



Potkurilaitteen tiivisteiden monitorointi

Jerry Jantola

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2020

Konetekniikka
Lentokonetekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Lentokonetekniikka

JANTOLA, JERRY:
Potkurilaitteen tiivisteiden monitorointi

Opinnäytetyö 33 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Marraskuu 2020

Opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa tutkimuksen tilaa Kongbergin potkurilaitteissa käytettyjen tiivistetyyppien kulumisen ja vioittumisen suhteen, selvittää mitkä muuttujat niihin vaikuttaa, etsiä menetelmiä niiden mittaamiseen, sekä kehittää konsepti monitorointijärjestelmän toteutukselle. Kartoitus tehtiin käyttäen hyväksi julkisia lähteitä, kuten tieteellisiä tutkimusraportteja ja valmistajien julkaisuja ja katalogeja.

Kartoituksen tuloksena todettiin, että tiivisteiden monitorointia varten ei ole olemassa valmiita ratkaisuja, mutta kehitystyötä ja tutkimusta niiden eteen on tehty niin, että joissain kohteissa toimivia käytännön sovelluksia on jo olemassa laboratoriotasolla. Lisäksi on huomioitu tutkimustiedossa todettuja esteitä monitorointijärjestelmien kehitykselle, sekä katvealueita tiedossa, jotka saattavat piilottaa vielä tuntemattomia ongelmia.

Kartoitetusta tutkimustuloksesta kehitetty tiivisteen monitorointikonsepti on tehty ja toimitettu Kongsbergille ei-julkisena liitteenä tähän opinnäytetyöhön.

Asiasanat: tribologia, meriteollisuus, ehkäisevä huolto, seurantajärjestelmä, mekaaninen tiiviste

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Aircraft Engineering

JANTOLA, JERRY:
Monitoring of Seals in an Azimuth Thruster

Bachelor's thesis 33 pages, appendices 1 page
November 2020

The goal of the thesis was to survey the current state of research on the wearing and damage in seals such as those used in Kongsberg azimuth thrusters, to clarify what variables affect the wearing and damaging, as well as to search for methods for measuring them. Additionally, a concept for a monitoring system was to be created. The survey was done by reviewing public sources such as scientific research reports and manufacturer publications and catalogues.

As a result of the survey, it was noted that for the monitoring of seals there were no ready-made solutions, but research and development has been done to an extent that applications for some cases already exist on a laboratory proof of concept level. Additionally, obstacles for the development of monitoring systems found in research literature were noted, as well as blind spots in knowledge which could hide as yet unknown difficulties.

A monitoring concept was created from the results of the survey that was delivered to Kongsberg as a non-public appendix to this thesis.

Key words: tribology, marine, maintenance, monitoring system, mechanical seal

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
1.1	Yrityksen esittely	6
1.2	Aiheen esittely	7
2	TIIVISTEET JA NIIDEN MEKANIikka.....	8
2.1	Tiivistetyypit	8
2.1.1	Elastomeeristen ja muovisten tiivisteiden tyypit ja rakenteet	8
2.1.2	Elastomeeristen tiivisteiden mekaniikka	10
2.1.3	Mekaanisten tiivisteiden rakenteet ja materiaalit	11
2.1.4	Mekaanisten tiivisteiden mekaniikka.....	12
3	TIIVISTEIDEN KULUMINEN JA VIKAANTUMINEN	14
3.1	Elastomeeristen tiivisteiden kuluminen ja vikaantuminen.....	14
3.2	Mekaanisten tiivisteiden kuluminen ja vikaantuminen	20
4	TIIVISTEIDEN MONITOROINTI	22
4.1	Mekaanisten tiivisteiden monitorointi.....	22
4.1.1	AE -analyysin teoria.....	23
4.1.2	Mekaanisten tiivisteiden monitoroinnin koetuloksia	24
4.2	Elastomeeristen tiivisteiden monitorointi	27
5	MONITOROINTIJÄRJESTELMÄN KONSEPTI	29
6	POHDINTA	30
	LÄHTEET.....	32
	LIITTEET	34
	Liite 1. Opinnäytetyön suunniteltu rakenne	34

ERITYISSANASTO

AE	akustinen emissio
azimuth thruster	laivoissa käytetty kääntyvä potkurilaitte
dynaaminen tiiviste	tiiviste, jossa yksi kosketuspinta liikkuu tiivisteeseen suhteen
elastomeerinen tiiviste	kuminen tai muovinen tiiviste
kiertoratadiagrammi	suoran kulmaero tasoon nähden kahdella kulma-akselilla kuvattuna
liukurengastiiviste	mekaaninen tiiviste
mekaaninen tiiviste	tiiviste, jonka koskettavat dynaamiset pinnat ovat valmistettu kovasta aineesta kuten teräksestä
otsatiiviste	mekaaninen tiiviste
plastinen tiiviste	lasketaan tässä työssä elastomeerisiin tiivisteisiin
staattinen tiiviste	tiiviste, joka ei ole kosketuksessa liikkuvien pintojen kanssa
tiivistepinta	kosketuspinta

1 JOHDANTO

1.1 Yrityksen esittely

Yritys, jolle opinnäytetyö tehtiin, on Kongsberg Maritime Finland Oy, joka on osa suurempaa Norjalaista Kongsberg- konsernia, joka toimii meri- ja puolustusteollisuudessa ja tuottaa suurta kirjoa erilaisia tuotteita ja palveluita. Azimuth thrusterien tuotesasto kuului aiemmin Rolls Royce Commercial Marinelle, jonka Kongsberg osti huhtikuussa 2019 ja sittemmin integroi. Maritimen vuoden 2019 liikevaihto oli 16,038 miljardia Norjan kruunua, noin 1,44 miljardia euroa lokakuun 2020 valuuttakursseilla, josta 13 % kuului propulsioon ja moottorien tuotealueelle.



KUVA 1. US azimuth thruster. (Kongsberg)

Azimuth thrustereita löytyy yrityksen katalogista ottotehovälille 250-5000 kW ja potkurien halkaisijat ovat suurimmillaan 4,5 m. Tuotevalikoimaan kuuluvat mm. vakiopotkurilaitteiden US tuoteperhe, meren alla asennettavat UUC-trusterit, sekä aluksen sisään hydraulisyntereillä nostettavat UL -laitteet. Laitteita tehdään sekä mekaanisella voimansiirrolla, kuin sähköiselläkin. (Kongsberg 2019, 49-60)

1.2 Aiheen esittely

Opinnäytetyön aihe syntyi Kongsbergilla vuoden 2020 alussa tarpeena parantaa heidän valmistamiensa laitteiden huollettavuutta, jossa pääpainona oli laitteista löytyvät erilaiset tiivisteet. Osa tästä tutkimus- ja kehitystyöstä lohkaistiin aiheeksi opinnäytetyölle. Samaan aikaan tämän opinnäytetyön tekijä oli etsimässä juurikin sellaista, ja hänen ollessa yrityksessä aiempaan vuonna työskennelleenä, aihe ja tekijä valikoituivat näin luontevasti toisilleen.

Opinnäytetyön rakenne on kolmivaiheinen. Ensimmäiseksi täytyi selvittää, että mikä on tieteellisen ymmärryksen tila tiivisteiden kulumisesta ja vioittumisesta. Toiseksi täytyi selvittää, että miten tiivisteiden kulumiseen ja vioittumiseen vaikuttavia muuttujia voitaisiin mitata. Kolmantena ja viimeisenä askeleena oli pyrkiä kehittämään tiivisteitä monitoroivan järjestelmän konsepti. Ennen toista ja kolmatta askelta rajattiin niiden laajuutta yhdessä yrityksen kanssa sen perusteella mitä todettiin hyödylliseksi aiemman tutkimuksen ja Kongsbergin tavoitteiden kannalta. Liitteessä 1 esitetään opinnäytetyösuunnitelmassa kuvattu prosessi, joka sisälsi mahdollisen validointiaskeleen työn lopuksi, joka ei toteutunut.

Yritykselle on aiemmin tehty potkurilaitteiden tiivisteisiin liittyvä opinnäytetyö, jonka on tehnyt Häkkinen (2016). Työssä käsitellään potkurilaitteissa käytetyt erilaiset tiivistetyypit. Työtä on käytetty apuna tämän opinnäytetyön tekemisessä. Ei-julkinen versio, jossa on tarkempaa tietoa Kongsbergin laitteiden tiivisteistä, oli käytettävissä.

2 TIIVISTEET JA NIIDEN MEKANIikka

2.1 Tiivistetyypit

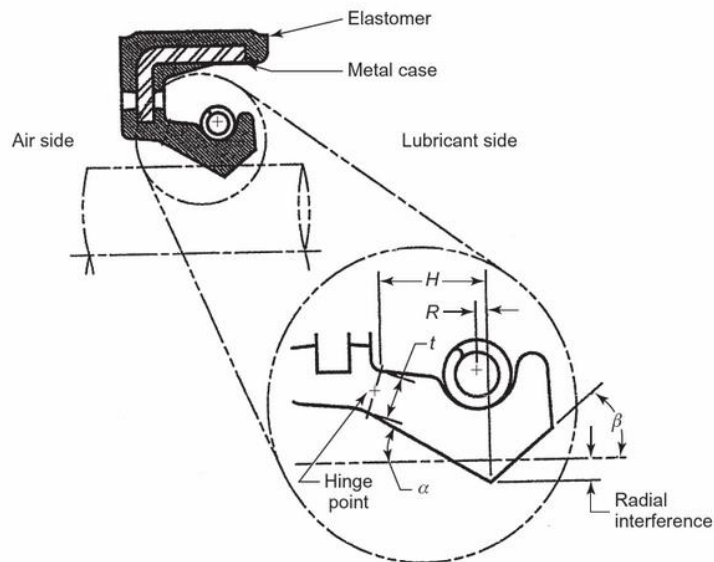
Tiivisteet jaetaan tavallisesti kahteen eri ryhmään niiden käyttötarkoituksen perusteella. Staattisilla tiivisteillä tiivistetään toisiinsa suhteen liikkumattomia pintoja ja dynaamisilla pintoja, jotka liikkuvat toisiinsa nähden.

Dynaamiset tiivisteet voidaan jakaa edelleen toimintatavan ja materiaalien mukaan. Potkurilaitteissa käytetyt tiivisteet kuuluvat pääosin huulitiivisteisiin ja muihin kumi- tai muovimateriaalista valmistettuihin tiivisteisiin, sekä mekaanisiin tiivisteisiin. Lisäksi laitteissa käytetään labyrinthitiivisteitä, mutta koska niiden kuluminen ei ole ongelma, niitä ei käsitellä enempää.

Tämä opinnäytetyö keskittyy dynaamisiin tiivisteisiin, jotka altistuvat pyörivälle liikkeelle, sillä niiden kuluminen ja vaurioituminen ovat merkittävimmissä asemassa Kongsbergin valmistamissa azimuth thrustereissa.

2.1.1 Elastomeeristen ja muovisten tiivisteiden tyypit ja rakenteet

Erilaisista kumi- ja muovimateriaaleista valmistetaan muun muassa säteishuulitiivisteitä, sekä O- ja V-renkaita. Suuri osa tiivisteistä ovat yhdestä, homogeenisestä materiaalista valmistettuja, mutta tämän lisäksi tiivisteissä saattaa olla esimerkiksi kankaisia tai muovisia kulutuspintoja, teräksisiä runkoja tai jousia, tai punottuja rakenteita. Kuviossa 1 esitetään erään säteishuulitiivisteiden rakenne.



Kuvio 1. Säteishuulitiivisteiden yleinen rakenne ja geometria. (Flitney 2017, 107)

Säteishuulitiivisteet ovat yleinen dynaamisen tiivisteiden tyyppi. Niitä löytyy paljon laivojen potkurinlaitteista, kuten muistakin koneista missä on pyöriviä akseleita. Tavalliset huulitiivisteet kestävät vain pieniä paine-eroja ($\leq 0,5$ bar) ennen liiallista kulumista (Flitney 2017, 141), joten korkeammat paineet vaativat erilaisia rakenteita ja materiaaleja. Kuvassa 1 esitetään korkeapainetiiviste, joka kestää painetta aina 700:n bariin.



Kuva 1. Korkeapainetiiviste R3. (AHP Seals)

Elastomeerisissa tiivisteissä voi olla rakenteellisia pumppausapuja, käytännössä uria, jotka toimivat niin, että ne pyrkivät valuttamaan tiivisteiden ulkopuolelta vuotanutta nestettä takaisin kohti kosketuspintaa, jolloin sitä pumppautuisi

takaisin tiivisteeseen sisäpuolelle. Nämä voivat olla joko yksi- tai molempipyörimissuuntaisia toiminnaltaan. Olennaista niille on kuitenkin, että urat jatkuvat aina kosketuspintaan asti ollakseen tehokkaita. (Flitney 2017, 115-116)

2.1.2 Elastomeeristen tiivisteiden mekaniikka

Säteishuulitiivisteiden toiminta perustuu makroskooppisiin ja mikroskooppisiin ilmiöihin. Mikroskooppiset ilmiöt johtuvat huulitiivisteiden asymmetrisestä rakenteesta, sekä tiivisteeseen ja akselin kosketuspintojen karheuksista. (Fitney 2017, 110)

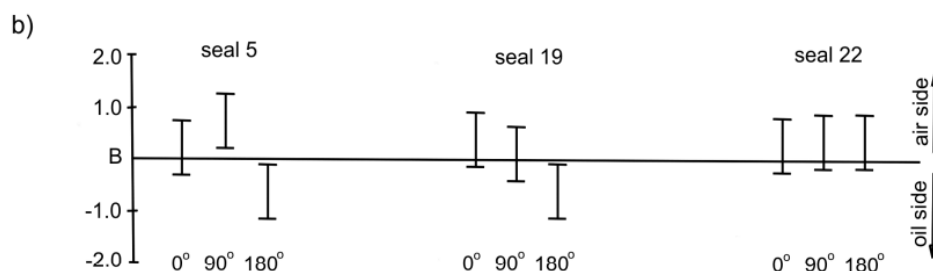
Säteishuulitiivisteeseen asymmetrisessä rakenteessa olennaiset tekijät ovat kulmaerot sisä- ja ulkopuolella, kuviossa 1 kulmat α ja β , sekä jousen sijoitus kosketuslinjan keskitasoa sisäpuolemmaksi. Nämä luovat asymmetrisen jännitysjauman tiivisteeseen kosketuspintaan, joka auttaa tiivistettä pumppaamaan nestettä sisäänpäin. (Fitney 2017, 106-107)

Elastomeerisen tiivisteeseen kuluessa sen kosketuspintaan tulee epähomogeeninen kiilamainen karheuskuvio, joka auttaa pumppaamaan nestettä tiivisteeseen kosketuspinnan alle molemmilta puolelta. Karheusjakauma on kuitenkin epäsymmetrinen niin, että tiivisteeseen huuli pumppaa enemmän ulkopuolelta sisään kuin sisäpuolelta ulos, jolloin se ei vuoda ulospäin. Tämä kulumisen aiheuttama karheusjakauma on positiivisilta käyttöominaisuuksiltaan yksisuuntainen, joten jos akselin pyörimissuuntaa käännetään, ominaisuudet menetetään, kunnes uusi päinvastainen kuvio on muodostunut. (Fitney 2017, 111)

Makroskooppiset ilmiöt liittyvät akselin ja tiivisteeseen rakenteeseen ja asennuksen epäakselisuuksiin ja muihin geometrisiin epätäydellisyyksiin, jotka aiheuttavat radiaalista ja siten aksiaalista liikettä kosketuspintojen suhteen akselin pyöriessä tiivisteeseen suhteen. Nämä ilmiöt aiheuttavat pyyhkimiseffektin, joka tehostaa tiivisteeseen toimintaa. (Fitney 2017, 114)

Tiivisteeseen asennuksen vaikuttaessa tiivisteeseen toimintaan, perustutkimusta asennuksen vaikutuksesta tiivisteeseen ja akselin välisestä kosketuksesta on tehnyt

mm. Gawlinski & Romanik (2014), jotka mittasivat säteishuulitiivisteiden huulen aksiaalisen aseman muutosta ennen ja jälkeen asennuksen, sekä kitkavoimaa asennuksen aikana, sekä kosketuspinnan leveyttä ja asemaa kehän eri kohdissa eri tiivisteillä. Kosketuspinnan asemasta saadut tulokset esitetään kuvassa 3. Tutkimuksessa käytettiin läpinäkyvää lasista akselia, jonka läpi tiivistettä pystyi tarkastelemaan optisesti. (Gawlinski jne. 2014, 294-298)



Kuva 3. Kosketuspinnan asema eri kohdissa eri tiivisteyksilöillä. (Gawlinski jne. 2014, 298)

Tutkimuksessa todettiin, että tiivisteiden kosketuspinnan asema ei ole ennustettavissa ennen asennusta, ja että se vaihtelee kehän eri pisteissä, mikä on merkittävää, koska se määrää yleisen ymmärryksen mukaan kosketuspaineen ja siten kulumanopeuden. Kulumaerot eri kohdissa näkyi myös huulien profiileissa kulutuksen jälkeen. (Gawlinski jne. 2014, 298, 300)

2.1.3 Mekaanisten tiivisteiden rakenteet ja materiaalit

Mekaanisessa tiivisteessä on kaksi tasaista radiaalipintaa, joista toinen pyörii kotelon ja toinen akselin mukana. Nämä kuuluvat liukurenkaille. Toinen pinoista liikkuu aksiaalisuunnassa, ja on esikuormitettu toista pintaa vasten jousen tai jousien avulla. Mekaanisessa tiivisteessä on myös toissijaisia staattisia tiivisteitä. Jousia käyttävissä mekaanisissa tiivisteissä tarvitaan myös dynaaminen toissijainen tiiviste tiivistämään aksiaalisesti liikkuva otsa. Rakenteissa, joissa elastomeerinen tai metallinen palje toimittaa jousen asemaa ei tällaista tarvita. (Fitney 2017, 162-163)

Mekaanisissa tiivisteissä koskettavat pinnat voivat olla esimerkiksi terästä, grafiittia tai karbidia. Otsat voivat olla joko samaa materiaalia, kuten piikarbidi-piikarbidi, tai eri materiaalia, kuten piikarbidi-grafiitti. On huomattu, että pehmeän ja kovan liukurengasmateriaalin yhdistelmä on paras monissa käyttötarkoituksissa, mahdollisesti koska sillä on pienin kitkakerroin kuivana, joka vähentää kosketuksessa syntyvää lämpöä (Towsyfyän 2016, 47).

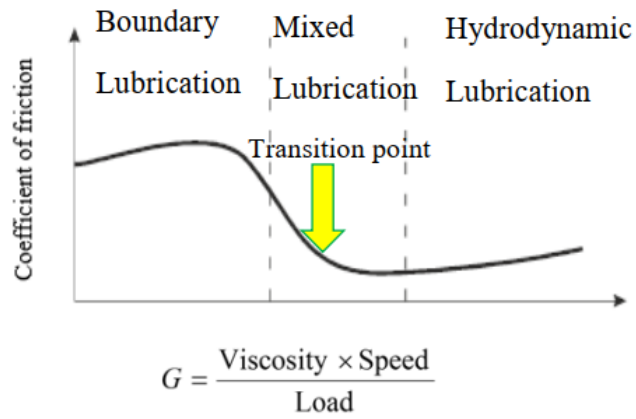
2.1.4 Mekaanisten tiivisteiden mekaniikka

Mekaanisten tiivisteiden mekaniikassa olennaisia käsitteitä ovat voimien tasapainoisuus, sekä voitelutila. Sanotaan, että tiiviste on balansoitu, kun otsien kosketuspinta-ala on suurempi kuin ympäröivän nesteelle aksiaalisuunnassa altis pinta-ala. Kun tilanne on päinvastainen, tiivistettä sanotaan ei-balansoiduksi, ja silloin tiivistettä voidaan käyttää ainoastaan matalassa paineessa. (Fitney 2017, 164-165)

Otsatiivisteiden voitelutiloja neljä erilaista. Kuiva kitka, jolloin otsien välissä ei ole lainkaan voitelua; raja-voitelutila, jolloin pintojen huiput kantavat kaiken kuorman kosketuksen kautta; osittainen voitelutila, jolloin liukurenkaiden tiivistepintojen huippujen välistä kosketusta esiintyy; sekä hydrodynaaminen voitelutila, jossa leikkausvoima nesteessä kantaa kaiken kuorman tiivisteiden yli. (Towsyfyän 2016, 24-25)

Kitkakerrointa eri voitelutiloissa kuvaa niin kutsuttu Stribeckin käyrä, joka esittää kitkakertoimen dimensiottoman toimintaparametrin G funktiona. Toimintaparametri yhtälössä 1 koostuu tiivistävän nesteen dynaamisesta viskositeetista η , pinnan keskihalkaisijan kehänopeudesta \bar{V} , tiivisteiden nettopuristusvoimasta F_c , sekä tiivisteotsan leveydestä b . (Towsyfyän 2016, 25-26) Stribeckin käyrä ja sen suhde voitelutilojen kanssa esitetään kuviossa 2.

$$G = \frac{\eta \bar{V} b}{F_c} \quad (1)$$



Kuvio 2. Stribeckin käyrä. (Towsyfyan 2016, 26)

Stribeckin käyrän minimipiste on merkittävä viitearvo, sillä siinä tiiviste toimii parhaiten ja kuluu vähiten. On kuitenkin huomattava, että tämä piste riippuu käytetystä tiivisteestä ja sen sijainti G -parametrilla vaihtelee jopa kahden suuruusluokan välillä (10^2). (Towsyfyan 2016, 26-28)

3 TIIVISTEIDEN KULUMINEN JA VIKAANTUMINEN

3.1 Elastomeeristen tiivisteiden kuluminen ja vikaantuminen

Elastomeeriset tiivisteet kuluvat menettämällä materiaalia kosketuspinnan alueelta johtuen mekaanisesta kuormasta. Kuluminen syyt voidaan jakaa eri mekanismeihin. Adhesiivinen kuluma johtuu kosketuspintojen tarttumisesta toisiinsa ja sitten liikkeen vuoksi irtoamisesta. Abrasiivinen kuluma aiheutuu kovemman materiaalin leikatessa pehmeämpää. Eroosiokulumaa esiintyy, kun kiinteä pinta on yhteydessä nestevirtauksen kanssa. (Frölich, Magyar & Sauer 2014, 74)

Yleinen elastomeerisen tiivisteen kuluminen mallinnukseen käytetty kaava on Archardin kaava 2, jossa V tarkoittaa kuluman tilavuutta, K' tarkoittaa empiiristä kulumakerrointa, Q kosketuksen normaalivoimaa, H pehmeämmän materiaalin kovuutta ja s pintojen suhteellista siirtymää, eli kehän pituus kertaa pyörimiskerrat. Yleisesti kerroin K' ja kovuus H yhdistetään empiiriseksi kertoimeksi K , jolloin saadaan kaava 3. (Frölich jne 2014, 74)

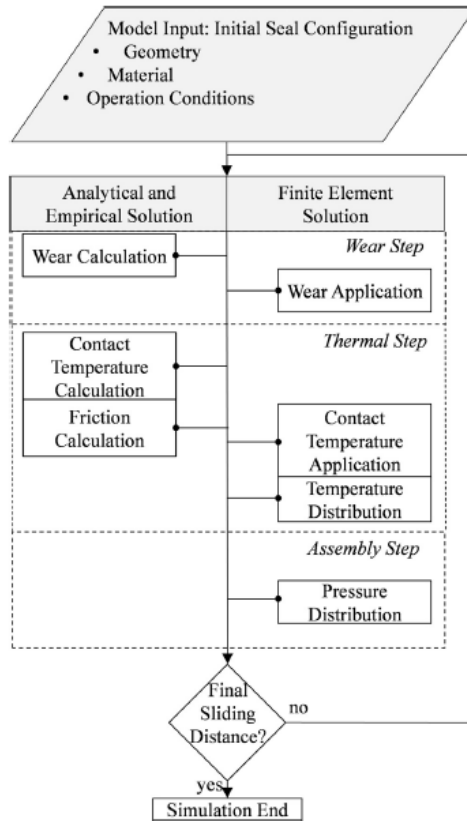
$$V = K' \frac{Q}{H} s \quad (2)$$

$$V = K Q s \quad (3)$$

On huomattava, että empiirinen kerroin K ei riipu ainoastaan materiaaleista, vaan myös olosuhteista. On huomattu, että esimerkiksi akselin kehänopeus, öljyn lämpötila, kosketusalueen pintapaine ja öljyn viskositeetti vaikuttavat siihen. Jotta näitä muuttujia voidaan ottaa huomioon mallintamisessa, on kehitetty mukautettuja kulumakaavoja, jotka sisältävät näihin sidottuja termejä. Mukautettuja kaavoja on kehitetty todella paljon. (Frölich jne 2014, 74-75)

Koska fyysisten kulumamittausten tekeminen on työlästä, tutkimustyön avuksi on kehitetty monimutkaisia numeerisia simulaatiomalleja, jotka perustuvat eri-

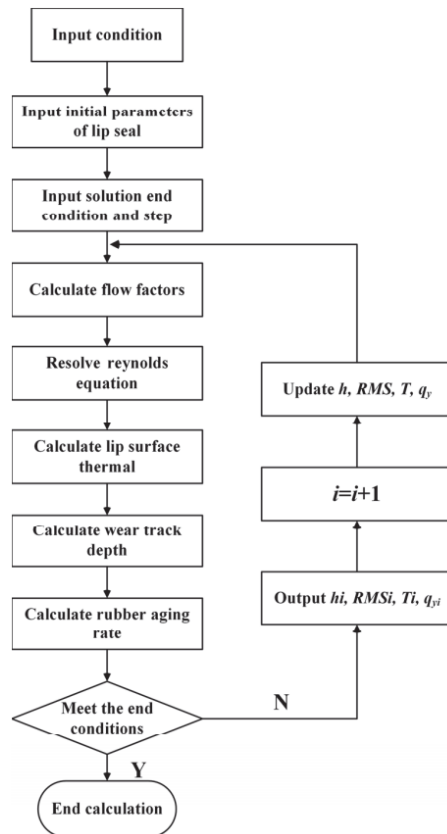
laisten analyttisten, empiiristen ja elementtimenetelmien käyttämiseen yhdessä. Kuvioissa 3 ja 4 esitetään ratkaisumallit, joilla päästään tulosten mukaan lähelle todellisuutta huulitiivisteiden kuluman ennustamisessa.



Kuvio 3. Simulointimallin kaavio. (Frölich jne 2014, 73)

Frölichin jne. malli perustuu kulmakertoimeen, joka on lämpötilan funktio, joka saatiin lineaarisesti interpoloimalla lämpötilaväli 60 °C - 130 °C aiemman tutkimustiedon mukaan, sillä siinä se on osoittautunut aiemmassa tutkimuksessa suureksi tekijäksi kulmakertoimelle suhteessa muihin muuttujiin. Lämpötila kosketuspinnalle saatiin ennalta tiedetyn normaalivoiman, siitä lasketun kitkatehon, josta ratkaistun lämpötilajakauman kautta. (Frölich jne 2014, 74-75)

Tulokset osoittivat heidän käyttämänsä mallin vastaavan hyvin empiirisiä mittaustuloksia mitä tulee tiivisteiden kosketuspinnan lämpötilan kehitykseen siirtymän suhteen ja siten myös kuluman suhteen. (Frölich jne 2014, 80)



Kuvio 4. Toinen simulointimallin kaavio. (Liu, Wang, Shi, Zhang & Tomovic 2016, 1080)

Liun jne. (2016) malli ottaa Frölichin jne. malliin verraten mukaan kumin ikääntymisen tiivisteiden suorituskykyä heikentävänä tekijänä. Ikääntymisvauhtia kuvataan Arrheniuksen mallilla, joka näkyy kaavassa 4. Mallissa k on ikääntymisnopeus, A on lämpötilasta itsenäinen vakio, R on kaasuvakio, E on kumin aktivoitumisenergia ja T on termodynaaminen lämpötila. Kumin ikä vaikuttaa kosketuspinnan karheuteen, joka taas vaikuttaa tiivisteiden suorituskykyyn. (Liu jne 2016, 1080)

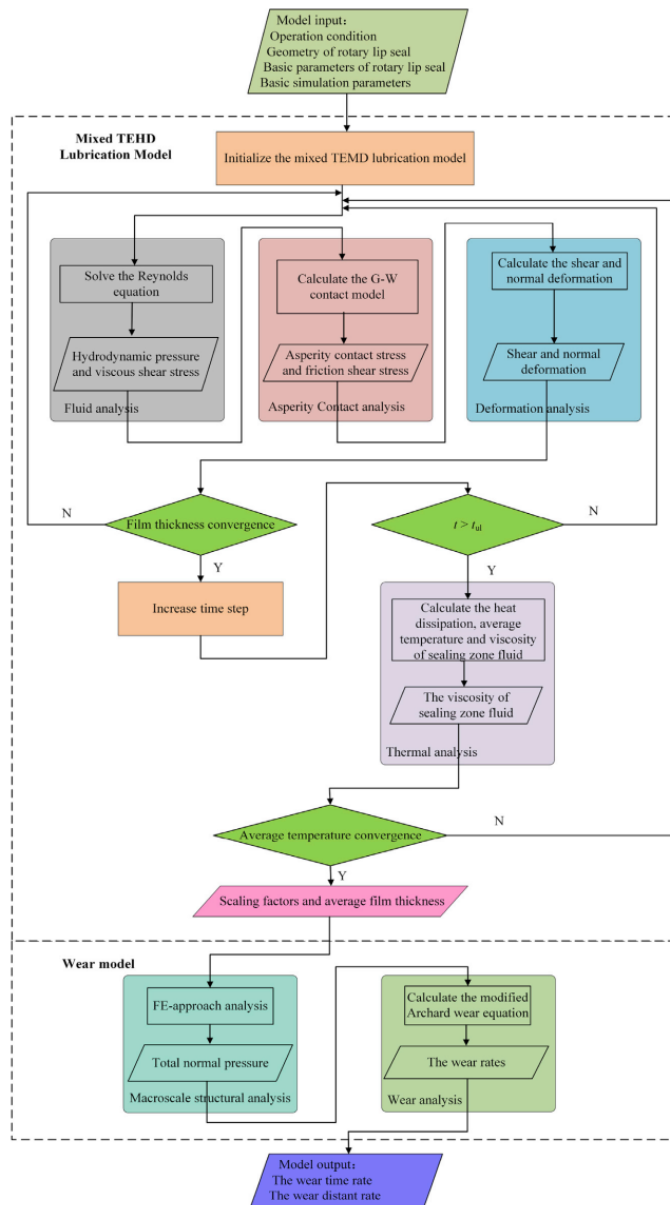
$$k = A \times \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4)$$

On huomattava, että mallissa käytettiin kuluman simuloimiseen analyttistä kaavaa, joka ratkaistiin numeerisesti, eikä elementtianalyysiä. Tutkimuksessa oletettiin hydrodynaaminen voitelutila, absoluuttisen sileä akseli, sekä adhesiivinen kuluma ainoana mekanismina. Liun jne. (2016) malli ottaa tiivisteiden suorituskykyyn mittareiksi kitkamomentin, sekä pumppaamisvauhdin. (Liu jne 2016, 1080-1081)

Tuloksista nähdään, että kumin ikääntyminen dominoi suorituskyvyn heikkene- mistä käyttöiän loppuvaiheessa, kun taas adhesiivinen (raportissa luki abrasiivi- nen, mutta oletettavasti tämä on kirjoitusvirhe) kuluma dominoi alkuvaiheessa, ja että kun ympäristön lämpötila ja pyörimisnopeus kasvavat, tiivisteiden suorituskky heikkene nopeammin. Tutkimus ei sisällä empiirisiä mittauksia, jolla vali- doitaisiin tuloksia. (Liu jne. 2016)

Weber & Haas (2007) tutkivat PTFE -huulitiivisteiden kulumista elementtimallia ja lineaarista kulumakaavaa käyttäen. Tässä mallissa ei huomioitu kemiallista ikääntymistä, sillä materiaali vastustaa sitä hyvin. Simulaatiolla päästiin lähelle empiirisillä kokeilla saatuja tuloksia, mutta huomioitiin, että aiemmassa tutki- mustiedossa on todettu, että PTFE -huulitiivisteillä on hyvin vaihteleva todelli- nen elinikä (1 700-11 800), ja että merkityksellisemmät tulokset vaativat hajon- tatietoa eivätkä ainoastaan keskiarvoja. (Weber jne. 2007, 7-11)

Liu, Wang & Zhang (2018, 190) loivat kolmannen mallin tiivisteiden kulumisen simuloinniksi osittaisen voitelun (mixed lubrication) tilassa, jolloin kosketuspinto- jen karheushuiput ovat suorassa kosketuksissa toistensa kanssa. Mallissa käy- tettiin hyväksi mikrotason termo-elasto-hydrodynaamista (TEHD) -mallia, jonka päälle lisättiin makrotason elementtimalli ja muokattu Archardin kaava kuluman selvittämiseksi. Kuviossa 5 esitellään mallin kaavio.



Kuvio 5. Kolmannen simulointimallin kaavio. (Liu jne. 2018, 196)

Mainitun tutkimuksen tuloksena todettiin, että pyörimisnopeuden korottaminen parantaa voitelua ja vähentää tiivisteiden kulumista, että akselin pinnankarheus nostaa kulumisnopeutta ja heikentää tiivistysominaisuuksia, ja että aksiaalisuuntaiset urat akselin pinnassa vähentävät tiivisteiden kulumisnopeutta, vaikka mahdollisesti heikentävät tiivisteiden pumppaustoimintaa. (Liu jne. 2018, 201)

Akselin tarkoituksellista karheuttamista on tutkittu Liun, Wangin, Zhangin & Tomovichin (2019) toimesta numeerisen mallin avulla, joka käytti myös avuksi muokattua Archardin kaavaa ja TEHD-mallia. Tässä tutkimuksessa mallinnettuun akseliin tehtiin kolmion, neliön ja ympyrän muotoisia matalia uppoumia

niin, että ne muodostivat rivejä aksiaali- ja kehäsuunnassa. Yksittäisen uppouman mitat olivat empiirisissä kokeissa $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ ja syvyys $4\ \mu\text{m}$, mutta numeerisessa tarkastelussa uppoumien suhteellisia mittoja vaihdeltiin. Kun numeerisia tuloksia verrataan empiirisesti saatuihin tuloksiin, voidaan todeta, että ne seurasivat hyvin toisiaan. (Liu jne 2019, 215-237) Tutkimuksen tuloksista yleensä voidaan todeta, että tarkoituksellisilla uppoumillä akselin pinnassa voidaan laskea tiivisteiden kulumisnopeutta sen pumppaustehon kustannuksella ja että ympyränmuotoiset uppoumat ovat siihen varsin hyvä vaihtoehto.

Kaikki mainitut tutkimukset ovat oletaneet, että tiivisteiden ja akselin välissä oleva neste on puhdasta. Shen, Dong, Zhang, Meng & Peng (2016) tutkivat hiovien partikkelien vaikutusta tiivisteiden kulumiseen. Partikkelit voivat toimia joko kaksikappaleilmiönä, jossa hiovat partikkelit ovat upotettuna toiseen kosketuspintaan, tai sitten kolmikappaleilmiönä, jolloin partikkelit kulkevat vapaana kosketuspintojen välissä. Tutkimus keskittyi nimenomaan kaksikappaleilmiöön, jossa hiovana pintana toimi hiekkapaperi ja sen vastakappaleena nitrilikumi. Kokeissa kosketuspintojen väliä ei voideltu millään nesteellä. (Shen jne. 2016, 1-2)

Shenin jne. (2016) tutkimuksessa huomattiin, että kitkakertoimen minimi saavutettiin, kun keskimääräinen partikkelikoko oli n. $20\ \mu\text{m}$, joka vastaa P 800 -hiekkapaperia. Kulumisnopeus kuitenkin pieneni monotonisesti partikkelikoon pienetessä. (Shen jne. 2016, 4-5)

Shenin jne. (2016) tuloksissa todettiin, että kulumismekanismi vaihtuu lähinnä abrasiivisesta lähinnä adhesiiviseen partikkelikoon pienentyessä. Myös kumista irronneen materiaalin koko, muoto ja evakuointinopeus kosketuspintojen välistä vaihteli karheuden ja kosketusvoiman muuttuessa. (Shen jne. 2016, 9-10) Voidaan todeta, että kumin kulumisen on hyvin monimutkainen ilmiö, jota on vaikea kuvata. On myös huomattava, että tulokset eivät välttämättä ole vastaavia, edes samansuuntaisia, kun kosketuspintojen välissä on nestettä.

Tieteellisellä tasolla voidaan tutkia mitkä erilaiset fyysiset ja kemialliset ilmiöt kulluttavat tiivisteitä nopeammin tai hitaammin, mutta näiden lisäksi Lloyd Leugner

(2005, 27) esittää taulukosta 1 löytyvän listan erilaisista tiivisteiden pettämisen käytännön juurisyistä.

Taulukko 1. Tiivisteiden vioittumisen syyt.

1. Komponenttien kohdistusvirhe.
2. Huono laakerien voitelu.
3. Pyörivien komponenttien värähtely.
4. Nesteen kontaminaatio.
5. Vääntyminen riittämättömän jäykkyyden vuoksi.
6. Komponentit kiinnitetty heikosti alustalleen.
7. Roottorin epätasapaino.
8. Riittämätön tiivisteiden huuhtelu asennuksen tai korjauksen jälkeen.
9. Tiivisteiden tai laakerin huolimaton asennus.
10. Putkien venymä kohdistusvirheen tai lämpötilanmuutoksen vuoksi.
11. Ruuvien tai kiinnittimien löysyys.
12. Sopimaton neste tiivistemateriaalille.
13. Lämpötilan nousu tai dramaattinen muutos.
14. Epäpuhtaat käyttöolosuhteet.
15. Muutos suodatuskäytännöissä.
16. Huohotuksen tukkeutuminen.

3.2 Mekaanisten tiivisteiden kulumisen ja vikaantuminen

Siddharth (2018, 26) listasi 45 eri vikaantumismoodia mekaanisille tiivisteille, joista osa oli käyttökohde ja valmistusmateriaalikohtaisia. Hän myös listasi 13 vikaantumissyitä, joista kolme tärkeintä olivat huono voitelu, kavitaatio ja värähtelyt. Towsyfy (2016, 4) mainitsi kolme indikaattoria vikaantumisesta: Liiallinen nesteen väheneminen järjestelmästä, liiallinen paineen väheneminen järjestelmästä, sekä ulkopuolisen tai sisäpuolisen nesteen liiallinen ilmaantuminen väärälle puolelle. Kysely on paljastanut, että kuiva-ajo on suurin yksittäinen mekaanisten tiivisteiden vikaantumisen syy, ja että kuluma on suhteellisen vähäinen syy. Lisäksi hän mainitsi, että aiemmassa tutkimuksessa on luokiteltu yli 60 suoraa tai osallista vikaantumissyitä, jotka voidaan koota kolmeen ryhmään;

ympäristösyihin, suunnittelusta ja valmistuksesta johtuviin syihin, sekä käytöstä ja asennuksesta johtuviin syihin.

Towsyfyenin (2016) mukaan aiemmat tutkijat ovat löytäneet lähes 200 eri kulumakaavaa, jotka sisältävät valtavan määrän eri muuttujia, mutta niistä parhaimmallakin on vähän käyttöä, sillä ilmiö on niin monimutkainen. Mekaanisten tiivisteiden tapauksessa on kuitenkin harvinaista, että tiiviste pettää kuluman takia, vaan se yleensä tapahtuu jonkun satunnaisen vikaantumisen vuoksi. Joka tapauksessa, mekaanisille tiivisteille on olemassa kolme ominaista kulumismekanismia; adhesiivinen, abrasiivinen ja väsymiskuluma. (Towsyfyen 2016, 38)

4 TIIVISTEIDEN MONITOROINTI

4.1 Mekaanisten tiivisteiden monitorointi

Monitorointijärjestelmiä mekaanisille tiivisteille on kehitetty jo 80-luvulla. Insinööri Frank Olmos (1990) oli mukana kehittämässä monitorointijärjestelmää, joka mittasi niiden lämpötiloja ja paineita, tarkoituksena pidentää hydraulisissa pumpuissa käytettävien mekaanisten tiivisteiden elinikää etsimällä epäsäännöllisyyksiä datasta. Tämän järjestelmä ei ollut tarkoitettu yksittäisen tiivisteiden reaaliaikaiseen seurantaan vaan se oli suunniteltu asennettavaksi vähintään kahden kuukauden ajaksi sellaiseen tiivisteeseen, jonka tiedettiin vikaantuvan epätavallisen useasti. Monitoroinnilla pyrittiin löytämään vikaantumisen juurisyy, joka voitiin sitten korjata. (Olmos 1990, 9)

Järjestelmä maksoi noin \$ 2 - 4 000 sen aikaisessa rahassa ja vaati insinöörin läsnäoloa muutaman päivän ajaksi asennuksen jälkeen. Hänen tehtävänä oli asettaa raja-arvot, joiden ylittäminen aloittaa mittaustiedon tallennuksen, sekä tuoda mukanaan dataa alustavaa analyysiä varten. Se mittasi tiivisteiden otsalämpötilaa, kotelon lämpötilaa ja kotelon staattista, sekä dynaamista painetta. Eräessä tapauksessa sillä saatiin parannettua prosessiteollisuudessa käytetyn tiivisteiden käyttöikä moninkertaisesti. (Olmos 1990, 12)

Prosessiteollisuudessa on kehitetty monitorointijärjestelmiä mekaanisille tiivisteille, jotka perustuvat nesteiden vuodon mittaamiseen tiivisteiden yli. Mittaus itse tehdään pinnantas- tai painemittareilla. Jotkut näistä vaativat kahden tiivisteiden välillä olevan sulkunesteen, jolla on oma tankkinsa. (Huebner 2013, 2) Nämä järjestelmät eivät ole välttämättä soveltuvia prosessiteollisuuden ulkopuolelle.

Mekaanisten tiivisteiden reaaliaikaiseen seurantaan on laboratorio-olosuhteissa kehitetty neljä yleistä metodia. Ensimmäinen näistä on värähtelyanalyysi. Metodissa värähtelyä seurataan taajuus-amplituditasolla ja siitä etsitään muutoksia. Sitä käytetään yleisesti mm. laakerien kunnon seurantaan, mutta aiemman tutkimustiedon perusteella menetelmä ei ole sopiva tiivisteiden seurantaan, sillä se ei kykene mittaamaan ultraäänialuetta. (Towsyfyfan 2016, 71)

Toinen seurantaan käytetty menetelmä on pyörrevirtausten mittaus. Tällä tavalla on mitattu aksiaalisesti joustavan staattorin liikettä, sekä tiivistepintojen välistä etäisyyttä. Tämä menetelmä toimii ainoastaan, kun tiiviste on hydrodynaamisessa voitelutilassa, jolloin nestekerros erottaa tiivistepinnat toisistaan kokonaan, joka rajoittaa menetelmän käyttöaluetta. Aiemmissa kokeissa huomioitiin, että tiivistepintojen välinen etäisyys riippuu lähinnä operointipaineesta, eikä niinkään kierrosnopeudesta. (Towsyfyän 2016, 72)

Ultraäänimenetelmällä voidaan mitata tiivistepintojen kosketustilaa. Menetelmässä ultraäänilähetin lähettää leikkausaallon, joka vaimenee nesteessä tehokkaasti, jolloin ainoastaan suora kosketus pintojen välillä nostaa paluusignaalia. Aiemmassa tutkimuksessa on huomattu, että menetelmällä ei pysty mittaamaan nestekerroksen paksuutta hydrodynaamisessa tilassa, eikä kosketuksen suuruutta, joka rajoittaa menetelmän hyödyllisyyttä. On myös huomattava, että menetelmä vaatii tiivisteeseen muokkausta, sillä anturi on asennettava sen sisään. (Towsyfyän 2016, 73)

Neljäs tiivisteiden seurantamenetelmä on akustisten emissioiden seuranta. Menetelmällä voidaan potentiaalisesti paljastaa sekä vikaantumismoodit, että niiden vaikutukset tiivisteeseen toimintaan. Menetelmässä on kuitenkin ongelmana ei-haluttu kohina signaalissa, jolle on olemassa paljon mahdollisia lähteitä. (Towsyfyän 2016, 74)

Koska akustisella menetelmällä on saatu lupaavimpia tuloksia, on tässä työssä paneuduttu tarkemmin siihen kuin muihin menetelmiin. On kuitenkin huomattava, että akustinen metodi on edelleen vasta kehitystasolla, eikä vikojen diagnosointiin ole aina pystytty edes hallituissa olosuhteissa. (Towsyfyän 2016, 85).

4.1.1 AE -analyysin teoria

Akustiset emissiot tiivisteessä aiheutuvat liukuvien pintojen vuorovaikutuksesta keskenään (Towsyfyän 2016, 75). Vuorovaikutukset sisältävät niiden välisen suoran kosketuksen ja siihen liittyvät elastiset ja plastiset muodonmuutokset, mutta ei rajoitu siihen, vaan sisältää myös pintojen välissä olevassa nesteen paine- ja

leikkausvoimakenttien aiheuttamat vaikutukset pintojen huippuihin. Nämä ilmiöt aiheuttavat erilaisia akustisia emissioita. (Towsyfyan 2016, 93)

Akustisella anturilla saatua dataa voidaan tarkastella esimerkiksi aika-amplitudi-, taajuus-amplitudi- ja aika-taajuus-amplituditasoilla. Vikaantumistarkastelua varten on tehtävä määränsä puolesta vaativaa signaalinkäsittelyä tietokoneen avulla. Lisäksi datassa on merkittävä määrä ei-toivottua kohinaa, joka on huomioitava tiedon käsittelyssä. (Towsyfyan 2016, 78)

Käyttämällä yksinkertaisiakin tilastollisia menetelmiä, kuten keskiarvoa, keskihajontaa, RMS ja ääriarvoja, vinoutta ja huipukkuutta, huomataan aika-amplituditasolla yleensä tiivisteiden vahingoittuminen (Towsyfyan 2016, 78). Taajuus-amplituditasolla tehdyllä spektrianalyysillä voidaan paremmin kuin aikatasolla erottaa tietty vikaantumisen moodi järjestelmästä. Esimerkiksi adhesiivinen ja abrasiivinen kuluma voidaan erottaa toisistaan taajuustasolla. Taajuustaso on kuitenkin herkempi kohinalle. Näiden metodien lisäksi Towsyfyan käytti aika-taajuus-amplituditasoa hyväksi omassa tutkimuksessaan, lyhyen aikajänteen Fourier-muunnoksen (STFT) avulla. (Towsyfyan 2016, 82)

4.1.2 Mekaanisten tiivisteiden monitoroinnin koetuloksia

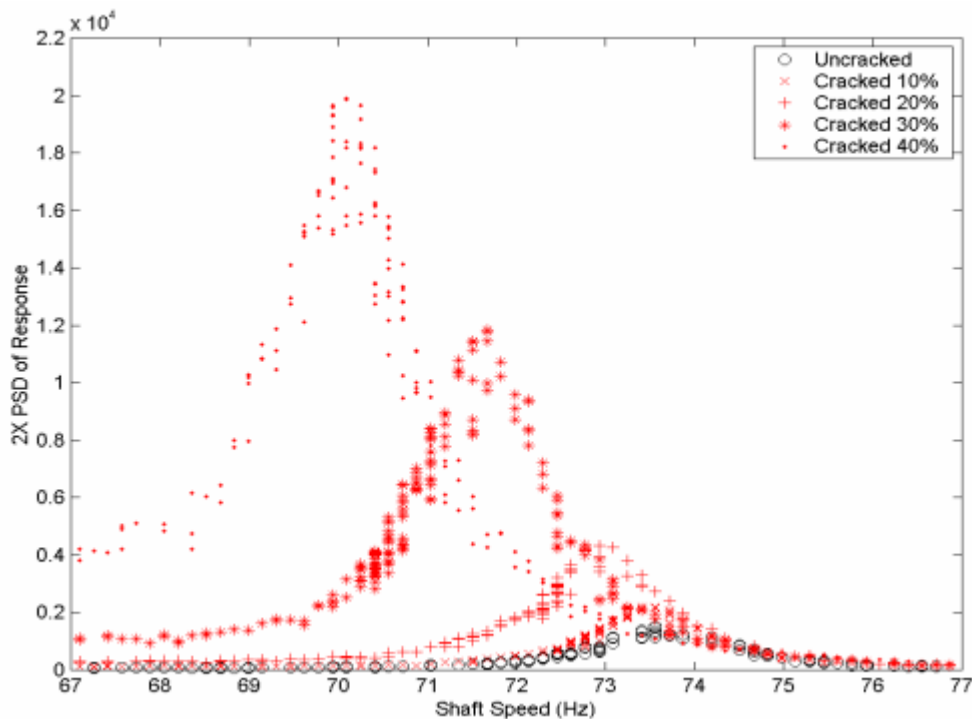
Zou & Itzhak (1998) tutkivat mekaanisen tiivisteiden dynaamista toimintaa järjestelmällä, joka staattoriin asennettujen kolmen pyörrevirtausanturin avulla pystyi reaaliaikaiseen mittaukseen ja analyysiin. Antureilla oli n. 10 kHz mittaustaajuus. Tutkimuksessa huomattiin, että tiivisteiden pintojen joutuessa suoraan kosketukseen, oli mahdollista todeta roottorin akselikulmaa näyttävällä kiertorata-diagrammilla, sekä taajuus-tehotasolla, suora kosketustila tiivisteessä (eli ei-hydrodynaaminen voitelutila), jossa suora kosketus aiheutti selviä piikkejä tietyille taajuuksille. (Zou jne. 1998, 423-430)

Zou, Dayan & Green (2000) tutkivat mekaanisen tiivisteiden dynaamista toimintaa aiempaa vastaavalla kolmen pyörrevirtausanturin järjestelmällä, tällä kertaa keskittyen hydrodynaamiseen voitelutilaan, jossa ei ole suoraa kosketusta. Voi-

telukerroksen paksuuden lisäksi signaalista löytyi tietoa roottorin kulmavasteesta, roottorin prekessiokulmasta, staattorin epäkeskoisuudesta ja staattorin kulmasta. (Zou jne. 2000, 1195-1206)

Zou, Casey, Green & Dayan (2003) raportoivat aiemman viiden vuoden tutkimuksen tulokset, jota oli tehty aiempia kokeita vastaavalla laitteistolla. Pelkän dynamiikan tutkimuksen lisäksi koelaitteistoon oli lisätty ohjausjärjestelmä, joka pystyi hallitsemaan tiivisteen toimintaa reaaliaikaisen monitoroinnin perusteella. Ohjausjärjestelmä sääti tiivistepintojen välystä säätämällä roottorin sulkeutumiskoitoa muuttamalla ilmanpainetta tiivisteen roottorikammiossa. Näin suora kosketusta tiivistepintojen välillä pystyttiin välttämään eri toimintatilanteissa. (Zou jne. 2003, 1-22)

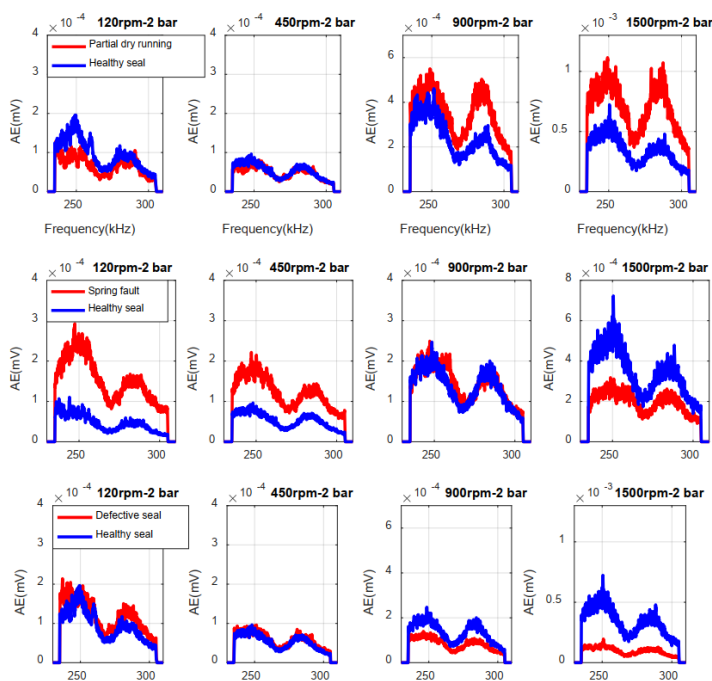
Pyörrevirtausantureihin perustuva järjestelmä pystyi myös diagnosoimaan liukurenkaihin muodostuneet halkeamat, jotka näkyivät spektrin tehottiheyden (PSD) kasvuna, sekä toisen harmonisen taajuuden tehottiheyden huipun siirtymisenä matalammalle akselin pyörimisnopeudelle, kuten kuviossa 6 näkyy. Vian pystyi myös diagnosoimaan kiertoratadiagrammista. (Zou jne. 2003, 22-29)



Kuvio 6. Halkeaman vaikutus roottorin dynamiikkaan. (Zou jne. 2003, 26)

Towsyfyenin (2016) kokeissa tiivisteiden asennuksella matkittiin sellaista kuin se olisi prosessiteollisuuden pumpussa. AE-sensori kiinnitettiin radiaaliseen tiivistekasettiin, jolloin se olisi mahdollisimman lähellä kosketuspintoja, sekä mahdollisimman harvan rajapinnan takana. (Towsyfyen 2016, 139)

Kuviossa 7 nähdään Towsyfyenin mittaustuloksia eri vikaantumismodeilla ja kierrosnopeuksilla. Ylimmällä rivillä vikaantumismoodina tiivisteiden kuiva-ajo, keskellä jousen pettäminen ja alimmaisena tiivistepintojen vahingoittuminen. (Towsyfyen 2016, 147)



Kuvio 7. Mittausten tuloksia. (Towsyfyen 2016, 181)

Kuiva-ajoa simuloitiin ajamalla koejärjestelmää matalalla paineella, jolloin voitelukalvo tiivistepintojen välissä ei ollut tarpeeksi suuri pitämään huippuja irti toisistaan. Jousien vikaantumista simuloitiin poistamalla kaksi joustakasetti tiivisteiden kahdestatoista riviin asennetusta jousesta, joka laskee tiivisteiden sulkeutumisvoimaa. Kolmansissa kokeissa tiivistepintoja vahingoitettiin tarkoituksella simuloimaan käytössä niihin aiheutuvia vaurioita. Lisäksi kokeita tehtiin eri paineilla, joista voidaan sanoa yleisesti, että ero hyväkuntoisen ja viallisen tiivisteiden emissioiden välillä on sitä suurempi mitä suurempi paine-ero tiivisteiden yli on. Tuloksia analysoitiin myös eri tasoilla, mutta taajuustaso valittiin kokonaisuutta hyvin kuvaavaksi. (Towsyfyen 2016, 175)

Tuloksista voidaan huomata, että mekaanisen tiivisteiden vikaantuminen voi vaikuttaa joko emissioiden nousuun tai laskuun tavallisesta ja että erotuksen suuruus ja suunta riippuu pyörimisnopeudesta.

Zhi, Erqing & Pan (2014) kehittivät empiiriseen moodihajotelmaan (Empirical Modal Decomposition) perustuvan signaalinkäsittelymenetelmän, jolla pystytään suodattamaan kohinaa akustisesta signaalista. Menetelmällä pystyi selvittämään tiivisteiden kitkatilan.

Junkai, Erqing, Zhendi & Pan (2015) kehittivät monitorointijärjestelmän, jossa AE -signaalia käsiteltiin partikkelisuodattimen avulla, jonka jälkeen sitä käsiteltiin BP neuroverkon avulla, joka arvioi tiivisteiden välisen nestekerroksen paksuuden. Neuroverkko pystyi asettamaan arvioiden paksuuden yhteen kolmesta nestekerroksen paksuusvälistä 100 %:ssa tapauksista.

Xiaohui, Pan, Kan, Zhibin & Erqing (2016) kehittivät akustisten emissioiden signaalinkäsittelymenetelmän, joka perustui geneettiseen partikkelisuodattimeen autoregression kanssa (AR-GPF), sekä hyperpallotukivektorikoneeseen (HSSVM). Tutkimuksen tulosten mukaan menetelmällä pystyttiin selvittämään mekaanisen tiivisteiden kosketustila, joko kosketus, avautuva tai eronnut, 95,8 %:n keskiarvon tarkkuudella, joka oli parempi kuin aikaisemmat matemaattiset menetelmät.

4.2 Elastomeeristen tiivisteiden monitorointi

Artikkelissa vuodelta 2005 esitellään kuva 3D-mallista, joka esittää Chicago Rawhide-yrityksen kehittämää säteishuulitiivistemodulia johon on integroitu monitorointijärjestelmän sensori. Artikkelissa ei käsitellä miten järjestelmä toimii, vaan ainoastaan todetaan, että vaikka elastomeeritiivisteet eivät ole kalliita, niitä käytetään luotettavuutta vaativissa sovelluksissa ja että niiden seurantajärjestelmät tulevat yleistymään autoteollisuudessa. (Anderson 2005, 31) Ei kuitenkaan

vaikuta, että näitä järjestelmiä olisi ikinä kaupallistettu, vaikka niitä onkin kehitetty jo 2000-luvun alussa, sillä niihin ei löydy viittauksia kirjallisuudesta, eikä tiivistevalmistajien verkkosivuilta tai katalogeista.

Vaikka elastomeeristen tiivisteiden monitorointijärjestelmiä ei ole ainakaan vielä jalkautunut tuotetasolle, niitä on kehitelty kuitenkin laboratoriokäyttöön, tutkimuksen ja tuotekehityksen vuoksi. Belforte, Mazza & Visconte (2011) esittivät kontaktittoman laseretäisyysmittaukseen perustuvan järjestelmän, joka mittasi säteishuulitiivisteiden huulen kulumaa. Järjestelmä vaati kokoonpanon avaamisen ja teräsholkin asettamisen huulen taakse, jotta se palautuisi varmasti takaisin kulumattomaan asemaansa. Kokeet osoittivat, että mittauspisteen sijainti aksiaalisuunnassa ei ole kovinkaan merkityksellinen, mutta että tiiviste kului epätaisisesti kehäaseman suhteen, ja että kulumaa tapahtui suurella nopeudella lähinnä heti käyttöönoton jälkeen ja ennen lopullista vikaantumista, joka sitten johti tiivisteiden vuotamiseen. Suurimmassa osassa käyttöikästä (mitattu kilometreissä siirtymänä s) tiiviste ei juurikaan kulunut. (Belforte jne. 2011, 73)

Eräässä laboratoriotutkimuksessa säteishuulitiivisteiden kulumista seurattiin mikroskoopilla asentamalla tiiviste läpinäkyvän akryyliputken ympärille (Frölich jne. 2014, 73). Toisessa taas käytettiin lasista akselia vastaavaan tarkoitukseen Gawlinski jne. 2014).

Raadnui (2015) tutki elastomeerisen tiivisteiden kuluman arviointia kumista irronneiden jäänteiden perusteella ennakoivan huollon tarpeisiin. Tutkimuksessa elastomeeripalaa painettiin kuivana pyörivää teräsrengasta vasten ja tutkittiin neljää eri kulumismoodia, abrasiivista, adhesiivista, kulumista hapon vaikutuksen jälkeen ja kulumista materiaalin paisumisen jälkeen. Tutkimuksessa todettiin, että neljästä eri kulumismoodista, kaikki jättivät toisistaan muotonsa perusteella erotettavissa olevia jäänteitä. Näitä jäänteitä arvioitiin ihmisen toimesta mikroskoopilla. (Raadnui 2015, 490-497)

5 MONITOROINTIJÄRJESTELMÄN KONSEPTI

Potkurilaitteen potkuriaksin tiivisteiden monitorointijärjestelmän konsepti on tehty ja se on toimitettu Kongsbergille salassa pidettynä liitteenä.

6 POHDINTA

Kirjallisuuden kartoituksessa huomattiin, että tiivisteiden kulumiselle on olemassa valtava määrä matemaattisia malleja, joiden tarkkuus ja yleispätevyys ovat jokseenkin kyseenalaisia. Elastomeerisen tiivisteiden kuluminen riippuu malli- ja materiaalikohtaisista tekijöistä, jotka on selvitettävä empiirisesti. Lisäksi niiden kuluminen riippuu jossain määrin niiden asennuksesta, jota ei pysty etukäteisesti ennustamaan millekään yksittäiselle tiivisteelle, sekä ympäristötekijöistä kuten haitallisten partikkelien joutumisesta tiivisteeseen kosketusalueelle, joiden mallintamiselle ei ole olemassa juurikaan valmista tutkimustietoa. Huomattiin myös, että tiivisteiden tavallinen kuluminen on merkittävämpi tekijä sen lopullisessa vikaantumisessa elastisille tiivisteille, kun se on mekaanisille.

Mekaaniselle tiivisteelle on ominaista sen satunnainen vikaantuminen kauan ennen sen suunnittelueliniän täyttymistä. Niille mahdollisia vikaantumissyitä ja vikaantumismooodeja on todella paljon. Tästä syystä monitorointijärjestelmien toimintaperiaatteet ovat tiivistetyyppikohtaisia.

Opinnäytetyön tuloksena voidaan arvioida otolliset kehityssuunnat elastisten ja mekaanisten tiivisteiden monitoroinnille. Mekaanisten tiivisteiden tapauksessa tieteellisestä kirjallisuudesta löytyi valmiita esimerkkejä, miten kunnonseuranta-järjestelmä voitaisiin rakentaa. Prosessiteollisuudessa tiivisteiden kuntoa mitataan epäsuorasti sen läpi vuotavan nesteen määrää mittaamalla. Näissä käytetään joskus sulkunestettä kahden tiivisteiden välissä, jolla on oma tankkinsa. Eräs akustiseen mittaukseen perustuva järjestelmä pystyi ainakin yhdessä tutkimuksessa diagnosoimaan tiivisteiden vikaantumisen monella eri moodilla reaaliaikaisesti. Lisäksi toinen pyörrevirtamittaukseen perustuva järjestelmä pystyi diagnosoimaan vian tiivisteessä, mutta vain yhden moodin. Lisäksi tiivisteiden toimintaparametreja on tutkimustarkoituksessa mitattu akustisesti, pyörrevirtausanturilla, sekä ultraäänellä.

Elastomeeristen tiivisteiden tapauksessa ei ole olemassa kaupallisia tuotteita seurantajärjestelmälle, vaikka sellaisia on ilmeisesti joskus kehitetty. Näiden toimintatavasta ei ole tietoa. Kirjallisuudessa on kuitenkin teoreettista pohjaa tiivisteiden vikaantumisen arviointiin kuluman kautta, ja kuluman arviointiin tarvittavista mitattavista tekijöistä. Sellaista kulumanseurantajärjestelmää ei kuitenkaan ole rakennettu, joka mittaisi sen tarkkuutta realistisissa käyttöolosuhteissa ja joka olisi prosessoinut mittaamansa datan reaaliajassa.

LÄHTEET

AHP Seals. R3 tiiviste. Luettu 16.11.2020.

<https://www.ahpseals.com/wp-content/uploads/2016/05/ultra-high-pressure-internal-swivel-seal.jpg>

Anderson, W. 2005. Tribology & Lubrication Technology 61 (2). 26-33

Belforte, G., Mazza, L. & Visconte, C. 2011. Tribology International 48. 73-77.

Flitney, R. 2014. Seals and Sealing Handbook. Oxford: Elsevier Science & Technology.

Frölich, D., Magyar, B., Sauer, B. 2014. A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals. Oxford: Elsevier

Gawlinski, M. & Romanik, G. 2014. Oil Lip Seal and Shaft as a Specific Friction Couple. Applied Mechanics and Materials 630. 294-300.

Huebner, M. 2013. LEAKAGE DETECTION AND CONTAINMENT IN ARRANGEMENT 1 SEALS. International Pump Users Symposium 29.

Häkkinen, N. 2016. DYNAAAMISET TIIVISTEET POTKURILAITTESSA. Pori: Satakunnan ammattikorkeakoulu.

Junkai, Z., Erqing, Z., Zhendi, G. & Pan, F. 2015. Mechanical Seal End Faces Friction Condition Monitoring Based on Particle Filter. Applied Mechanics and Materials 713-715. 526-533.

Kongsberg. 2019. MARINE PRODUCTS AND SYSTEMS. Kongsberg: Kongsberg.

Kongsberg. US potkurilaite. Luettu 16.11.2020.

<https://www.kongsberg.com/contentassets/5ac8de0e9ff144f0a65081a8f9015dd2/azimuthing-thruster-750x1329.jpg?w=750&quality=50&format=jpg>

Leugner, L. 2005. Machinery & Equipment MRO. 9/2005. 26-27

Liu, D., Wang, S., Shi, J., Zhang, C. & Tomovic, M. 2016. Numerical analysis of rotary lip seal performance deterioration. IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) 11. 1078-1083.

Liu, D., Wang, S., Zhang, C. & Tomovic, M. 2019. Numerical study of the effects of textured shaft on the wear of rotary lip seals. Tribology International 138. 215-238.

- Liu, D., Wang, S., Zhang, C. 2018. A multiscale wear simulation method for rotary lip seal under mixed lubricating conditions. *Tribology International* 121. 190-203.
- Olmos, F. 1990. EVOLUTION OF A MECHANICAL SEAL CONDITION MONITORING SYSTEM. Proceedings of the international pump user's symposium 7. 9-14
- Raadnui, S. 2015. Seal wear debris characterization for predictive maintenance. *Wear* 330-331. 490-497.
- Shen, M., Dong, F., Zhang, Z., Meng, X. & Peng, X. 2016. Effect of abrasive size on friction and wear characteristics of nitrile butadiene rubber (NBR) in two-body abrasion. *Tribology International* 103. 1-11.
- Siddharth, C. 2018. Monitoring of Mechanical Seals in Process Pumps. Tuusula: Kungliga tekniska högskolan
- Towsyfyhan, H. 2017. INVESTIGATION OF THE NONLINEAR TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF MECHANICAL SEALS FOR ONLINE CONDITION MONITORING. Department of Mechanical Engineering. University of Huddersfield. Väitöskirja.
- Weber, D. & Haas, W. 2007. Wear behaviour of PTFE lip seals with different sealing edge designs, experiments and simulation. *Sealing Technology*. 2/2007. 7-12.
- Xiaohui, L., Pan, F., Kan, C., Zhibin, L. & Erqing, Z. 2016. The Contact State Monitoring for Seal End Faces Based on Acoustic Emission Detection. *Shock and Vibration* 2016.
- Zhi, Z., Erqing, Z. & Pan, F. 2014. Mechanical seal condition monitoring technology research. *Applied Mechanics and Materials* 529. 344-348.
- Zou, M., Casey, C., Green, I. & Dayan, J. 2003. REAL-TIME MONITORING AND CONTROL OF MECHANICAL FACE SEAL DYNAMIC BEHAVIOR. The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering. Georgia Institute of Technology. Raportti.
- Zou, M., Dayan, J. & Green, I. 2000. Dynamic simulation and monitoring of a non-contacting flexibly mounted rotor mechanical face seal. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 214 (9). 1195-1206.
- Zou, M., Itzhak, G. 1998. Real-time Condition Monitoring of Mechanical Face Seal. Teoksessa Dowson, D. jne. (toim.) *Tribology for Energy Conservation*. Amsterdam: Elsevier, 423-430.

LIITTEET

Liite 1. Opinnäytetyön suunniteltu rakenne

Mitä sisältyy?

Niiden muuttujien selvittäminen mitkä vaikuttavat tiivisteiden kulumiseen.

Niiden sensorien selvittäminen millä valittuja muuttujia voidaan seurata.

Mitä Kongsbergin tiivisteitä voidaan seurata valituilla sensoreilla.

Mitkä kombinaatiot ovat kustannustehokkaita viedä kentälle asti.

Valittujen ratkaisujen validointi.