



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

AKSELITIIVISTÄMISESTÄ JA SULKUAINEN KÄYTÖSTÄ PROSESSITEOLLISUUDESSA

Juho Kanto

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2019

TIIVISTELMÄ

Akselitiivistämisestä ja sulkuaineen käytöstä prosessiteollisuudessa

Juho Kanto

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2019, 37 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Tapio Korpela

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia prosessiteollisuudessa käytettäviä akselitiivistimiä, joita ovat punostiivisteet sekä mekaaniset ja dynaamiset tiivisteet. Työssä keskityttiin kuvaamaan niiden ominaispiirteitä, käyttöön liittyviä haasteita ja sulkuaineen eli tiivisteveden käyttöä tiivistämisen tukena. Työssä pyrittiin myös selvittämään tiivistämisen merkitystä kustannustehokkuuden näkökulmasta.

Tässä työssä tiivistämiseen perehdyttiin kirjallisuuden ja konkreettisen tehtaalla tapahtuvan havainnoinnin pohjalta. Kirjallisuuskatsaus koostuu kotimaisesta ja ulkomaisesta kirjallisuudesta sekä verkkolähteistä. Työ tehtiin yhteistyössä Efora Oy:n kanssa Stora Enson sellutehtaalla Oulussa. Tämän työn perusteella voidaan todeta, että tiivisteveden käyttöä on mahdollista rajoittaa yksinkertaisilla toimenpiteillä, kuten lämpötilaohjatulla venttiilillä. Sulkuaineen käytön minimoinnilla saavutetaan merkittävästi hyötyjä niin taloudellisesta kuin toiminnallisesta näkökulmasta. Työssä saadut tulokset ovat yleistettävissä samankaltaisiin tiivistämistarpeisiin.

Asiasanat: Akselitiivistäminen, prosessiteollisuus, mekaaninen tiivistin, sulkuaine

ABSTRACT

Shaft sealing and use of sealing liquid in process industry

Juho Kanto

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2016, 37 pp.

Supervisor at the university: Tapio Korpela

The aim of this bachelor's thesis was to research shaft seals which are used in process industry. The forms of shaft seals are stuffing box packing, mechanical seals and dynamic seals. The thesis focused on describing the characteristic of seals, the challenges related to their use and the use of sealing fluid as a support for sealing. The thesis also looked at the importance of sealing from a cost-effectiveness perspective.

In this thesis, sealing was researched based on literature and factory observation. The literature review consists of domestic and foreign literature and online sources. This project was done in cooperation with Efora Oy at the Stora Enso pulp mill in Oulu. Based on this work, it is possible to limit the use of sealing fluid by simple measures, such as a temperature-controlled valve. Minimizing the use of sealing fluid offers significant benefits both economically and operationally. The results obtained in the thesis can be generalized to similar sealing needs.

Keywords: shaft sealing, process industry, mechanical seal, sealing fluid

ALKUSANAT

Tämä työ on toteutettu osana tekniikan kandidaatin tutkintoa konetekniikan tutkinto-ohjelmassa. Työn päätarkoituksena on tutustua prosessiteollisuudessa käytettävien akselitiivistimien toimintaan ja sulkuaineen käyttöön. Työskentelin kesätoissa Stora Enson sellutehtaalla Oulussa, josta työni aihe sai alkunsa. Työ on toteutettu ajanjaksolla 1.9. – 14.10.2019.

Työ on tehty yhteistyössä Efora Oy:n kanssa ja haluaisinkin kiittää luotettavuusinsinööri Ville Keinästä työn aiheesta, ohjaamisesta ja työssä opastamisesta. Haluan kiittää myös Oulun yliopistolla työtäni ohjannutta ja tarkastanutta Tapio Korpelaa.

Oulu, 14.10.2019



Juho Kanto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	7
2 YLEISTÄ TIIVISTÄMISESTÄ.....	8
2.1 Tiivistämisen tarkoitus	8
2.2 Tiivistintyyppit.....	8
2.3 Sulkuaineen käyttö tiivistämisessä.....	9
3 TIIVISTÄMINEN PROSESSITEOLLISUUDESSA.....	10
3.1 Punostiivistin	10
3.2 Mekaaninen tiivistin.....	12
3.2.1 Tiivistimen toiminta	12
3.2.2 Liukurengastiivistimen käyttöalueet.....	13
3.2.3 Liukurengastiivistimet toiminnallisuutensa mukaan.....	13
3.2.4 Tasapainotettu ja tasapainottamaton mekaaninen tiivistin	14
3.2.5 Toisiotiiviste.....	16
3.3 Dynaaminen tiivistin	16
4 SULKUAINEJÄRJESTELMÄT JA NIIDEN TOIMINTA	18
4.1 Veden kanssa toimivat tiivistinratkaisut.....	18
4.2 Ilman vettä toimivat tiivistinratkaisut	19
4.3 Tiivisteveden kulutukseen vaikuttavat laadulliset tekijät.....	20
4.4 Tiivisteveden seurantalaitteet ja valvontajärjestelmät.....	21
4.4.1 Virtausmittari	21
4.4.2 Älykkäät tiivisteveden ohjausjärjestelmät	22
4.4.3 Laitekohtaiset suljetut järjestelmät	22
5 TIIVISTEIDEN VAURIOMEKANISMIT	23
6 CASE: AKSELITIIVISTÄMINEN SELLUTEHTAALLA	26
6.1 Efora Oy	26
6.2 Tiivistämisen nykytilanne.....	26
6.3 NF-GO™ Supply System.....	26
6.4 Tiivisteveden valmistus sellutehtaalla.....	28
6.5 Tiivistämisen kustannukset.....	29

6.6 Tiivisteveden käytön rajoittamisella saavutettavat hyödyt.....	31
6.7 Kehitysehdotuksia tiivistämisen optimoimiseksi.....	32
7 YHTEENVETO.....	34
LÄHDELUETTELO.....	36

1 JOHDANTO

Prosessiteollisuudessa havaitaan hyvin usein tilanne, jossa akselin ja esimerkiksi pumpun pesän välinen vuoto täytyy saada tiivistettyä. Tapahtuma kuulostaa yksinkertaiselta, mutta prosessissa käsiteltävät mahdollisesti myrkylliset, todella kuumat tai likaiset aineet aiheuttavat tiivistykselle omat haasteensa. Akselitiivistimet voidaan karkeasti jakaa kolmeen osaan: punostiivistimiin, mekaanisiin liukurengastiivistimiin ja dynaamisiin tiivistimiin. Jokaisella tiivistintyyppillä on omat hyvät ja huonot puolensa. Tiivistystapahtumaa joudutaan ajoittain tehostamaan syöttämällä tiivistetilaan paineistettua tiivistenestettä. Kun tiivistenestettä käytetään vuorokauden ympäri vuodesta toiseen, aiheutuu siitä tehtaalle mittavat kustannukset niin taloudellisesta, kuin kunnossapidon näkökulmasta. Tiivistenesteen käyttöä voidaan kuitenkin optimoida varsin yksinkertaisilla toimenpiteillä.

Tämän kandidaatintyön teoreettisen osan tarkoituksena on luoda lukijalle kattava käsitys siitä, millaisia akselitiivistimiä prosessiteollisuudessa käytetään ja mitä erityispiirteitä niihin liittyy. Työssä pyritään myös luomaan käsitys sulkunesteen käytöstä tiivistämisessä ja siihen vaadittavan laitteiston toiminnasta. Varsinainen työn aihe sai alkunsa Efora Oy:n ehdotuksesta tarkastella laskennallisesti tiivisteveden käytöstä aiheutuvia kustannuksia. Tavoitteena oli myös selvittää, voidaanko virtaamatonta tiivistevedettä käyttää ja onko sen käyttäminen taloudellisesti kannattavaa siihen vaadittavan laitteiston investoinnin näkökulmasta.

Tämä työ muodostuu kirjallisuuskatsauksesta liittyen akselitiivistämiseen prosessiteollisuudessa sekä toiminnallisesta havainnoinnista tehdasympäristössä. Työn tekeminen edellytti vierailun Stora Enson sellutehtaalla Oulussa. Tehdasympäristö ja tutkittavat asiat olivat tämän työn tekijälle jo ennestään tuttuja kesätöiden vuoksi, mikä helpotti havainnointia huomattavasti.

2 YLEISTÄ TIIVISTÄMISESTÄ

2.1 Tiivistämisen tarkoitus

Tiivistimien pääasiallisena tehtävänä on vähentää tai estää lian, nesteiden tai kaasujen siirtymistä kahden eri tilan välillä. Näin ollen tiivistyksen tarkoitus on estää tiivistettävän kohdan eri puolilla vaikuttavien aineiden sekoittumista tai paineiden tasaantumista. Tiivistimiltä ja niissä käytettäviltä materiaaleilta vaaditaan esimerkiksi lämpötilankestoa, muodonmuutoskykyä, lujuutta ja kemiallista kestävyyttä. (Kivioja 2009, s.163) Yksinkertaisimmillaan tiivistin voi olla kuminen O-rengas, mikä sijainnillaan estää kahden eri tilan välisen vuodon.

Tiivistyskohdan eri puolilla vaikuttavat aineet voivat olla kiinteitä, nesteitä tai kaasuja. Käytännön tapauksissa kiinteät aineet kuitenkin esiintyvät useimmiten nesteeseen tai kaasuun sekoittuneena. Tavallisimpia tiivistysongelmia koneenrakennuksessa ovat nesteen ja kaasun tai kahden kaasun erottaminen toisistaan, kun tiivistettävä paine on suurempi kuin ympäristön paine. Tiivistystarpeen määrittämiseen kuuluu ymmärrys siitä, onko aineiden vuoto johonkin suuntaan sallittua vai estetäänkö niiden sekoittuminen täysin. Joissain tapauksissa tiivistettävät aineet joudutaan täysin erottamaan syöttämällä tiivistyskohtaan kolmatta ainetta suuremmalla paineella kuin kumpikaan tiivistettävistä aineista. (Airila 1987, s.310)

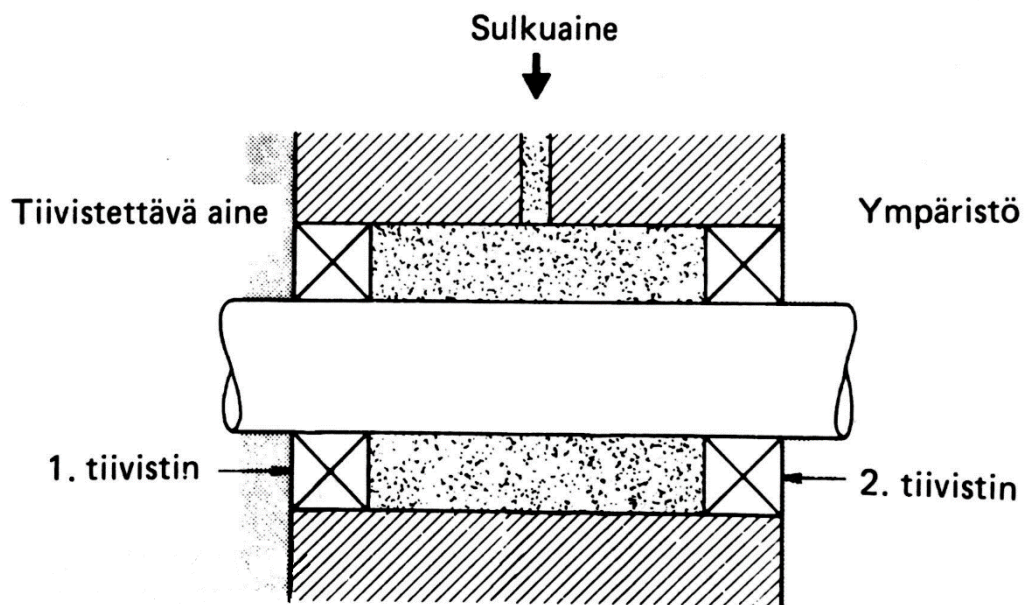
2.2 Tiivistintyyppit

Tiivistetyypin valintaan keskeisesti vaikuttava asia on tiivistyskohdassa esiintyvä liike. Liikemahdollisuuksien osalta samassa koneessa voi esiintyä hyvin monenlaisia tiivistystarpeita. Liikkeen luonteen perusteella tiivistimet voidaan jakaa viiteen pääryhmään: staattiset eli lepotiivistimet (esim. laippaliitos), puolistaattiset (esim. kalvorasia), pyörimisliikkeen (esim. säteishuulitiivistin), suoraviivaisen liikkeen (esim. hydraulikkasyylinteri) ja yhdistelmäliikkeen (esim. liikeruuvi) tiivistimet. (Miettinen 2014, s.405)

Tässä työssä keskitytään pyörimisliikkeen tiivistämisen ja sen toteuttamisessa käytettävän laitteiston tarkasteluun prosessiteollisuudessa.

2.3 Sulkuaineen käyttö tiivistämisessä

Sulkuaineesta, tiivistenesteestä tai tiivistevedestä puhuttaessa tarkoitetaan tiivistimen apuna ja varmistuksena käytettävää ainetta (ks. kuva 1). Sulkuaineeksi valittava aine jäädyttää ja voitelee tiivistintä, ei reagoi tiivistettävän aineen kanssa eikä myöskään ole ympäristölle haitallista. Sulkuainetta käytetään, kun tiivistettävä paine on suuri ja halutaan helpottaa tiivistimen toimintaa. Tällöin sulkuaineen paine on pienempi kuin tiivistettävän aineen paine. Sulkuaineen käyttö on tarpeellista myös silloin kun tiivistettävää ainetta ei saa päätyä ympäristöön tai tiivistin tarvitsee jäähdystä ja voitelua. Tällöin sulkuaineen paineen tulee olla korkeampi kuin tiivistettävän paineen. (Airila 1987, s.331) Sulkuaineena käytettävä aine on yleensä vettä (Miettinen 2014, s.412).



Kuva 1. Sulkuaineen käytön periaate (Airila 1987, s.331).

3 TIIVISTÄMINEN PROSESSITEOLLISUUDESSA

Nesteiden vuotamista pumpun pesästä akselia pitkin on pyritty minimoimaan jo yli 100 vuoden ajan erilaisilla järjestelyillä ja materiaaleilla. (Mackay 2004, s.87) Prosessiteollisuudessa yleisimmin käytettävät akselitiivisteet voidaan jaotella kolmeen pääryhmään: punostiivistin, mekaaninen tiivistin ja dynaaminen tiivistin. Esimerkiksi paperiteollisuudessa akselitiivistimiä käytetään hyvin monenlaisissa kohteissa. Pääasiassa tiivistimet ovat käytössä esimerkiksi pumpuissa, sekoittimissa, lajittimissa ja jauhimissa. (Knowpap 2019)

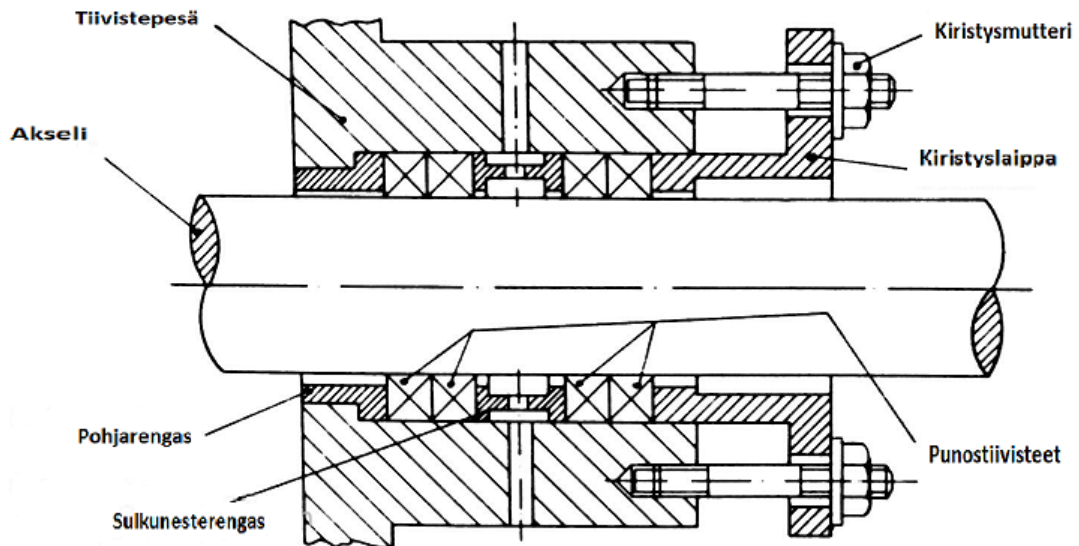
3.1 Punostiivistin

Punostiivistin (kuva 2) soveltuu käytettäväksi niin pumpunakseleiden kuin venttiilikarojenkin tiivistämiseen. Tiivistettävän akselin halkaisija tulee asettua alueelle 10...300mm, mutta jopa 1000mm halkaisijaltaan oleva akseli on mahdollista tiivistää. Tavallisesti punostiivistintä käytetään alle 100°C lämpötilassa ja liukunopeuden ollessa alle 15 m/s. Tiivistyskohdassa vallitseva paine-ero saa tyypillisesti olla enintään 10 bar. Näistä sekoista huolimatta oikeilla materiaalivalinnoilla ja huolellisella suunnittelulla vaatimaton punostiivistin menestyy hyvinkin vaativissa olosuhteissa. (Airila 1987, s.323)

Vaikka tiivistystekniikka on hyvin vanha, on sen suorituskyky saatu muutettua nykypäivän teollisuuden tarpeisiin, jonka vuoksi sitä käytetäänkin vielä monissa sovelluksissa. Tiivistys saadaan aikaan puristamalla tiivisterenkaita aksiaalisesti tiivistepesän pohjarengasta vasten. Tiivistemateriaali on synteettistä kuitumateriaalia, joka on punottu neliön muotoiseen johtoon, josta leikataan halutun kokoisia tiivisterenkaita. Edullisuus ja helppokäyttöisyys erottaa tiivistystekniikan muista tekniikoista, mutta verrattuna muihin on sen käyttöolosuhteet varsin rajoittuneita. (Flitney 2007, s.219-221) Punostiivistin on edullinen ratkaisu etenkin isojen akseleiden tiivistyksessä (Airila 1985, s.192).

Aksiaalinen puristus luo tiivisteeseen säteittäisen laajenemisen, josta tiivistysvoima on peräisin. Tiivistemateriaalin puristaminen akselia ja tiivistepesää vasten aiheuttaa väistämättä akselin kulumista. Yleensä käytetäänkin suojaholkkia punosten ja akselin välissä. Kulumistapauksissa suojaholkki on helppo vaihtaa pumpun lyhyen sammutuksen aikana. (Mackay 2004, s.87; Airila 1985, s.192-197). Tarvittavan puristuspaineen suuruus

vaihtelee hyvin paljon eri sovelluksien välillä. Nopeasti pyörivälle pumpunakselille riittää todella kevyesti kiristetty tiivistin. Hitaille nopeuksille ja venttiilien läpiviennille voidaan käyttää suurtakin kiristyspainetta. (Flitney 2007, s.221)



Kuva 2. Punostiivistin (Airila 1985, s.193).

Tiivistimen käyttöön kuuluu olennaisesti jatkuva vuotovirtaus. Vuoto mahdollistaa tiivistimen voitelun ja jäähdytyksen. Mikäli itse pumpattava tuote on tarkoitukseen sopivaa ja puhdasta, voidaan vuotovirtaus toteuttaa sen avulla. Tilanteissa, joissa pumpattava aine on ympäristölle haitallista tai epäpuhdasta, joudutaan käyttämään ulkopuolista tiivistenestettä. (Knowpap 2019) Punoksen materiaalilla voi myös olla voitelevia ominaisuuksia, kuten PTFE:n ja grafiittipohjaisten materiaalien tapauksessa. (Flitney 2007, s.222)

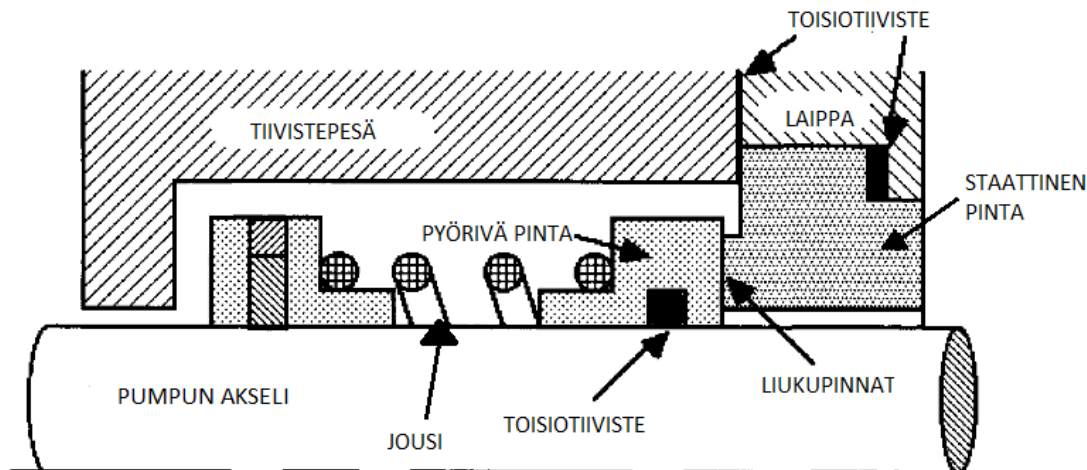
Tiivistenestettä pumpataan välirenkaaseen, joka sijaitsee punoksien välissä. Tiivistenesteen paine tulee olla suurempi kuin pumpun pesässä, tiivisten kohdalla vaikuttava paine, joten osa tiivistenesteestä päätyy väistämättä pumpattavaan tuotteeseen. Punostiivistintä voidaan käyttää kohteissa, joissa prosessinesteen vuoto tiivisten ulkopuolelle tai tiivistenesteen vuoto prosessiin on sallittavaa. (Knowpap 2019) Tiivisteneste voidaan johtaa tiivistimessä eri kohtiin sen mukaan mikä lopputulos tiivistenesteen käytöllä halutaan saavuttaa. Tiivisteneste johdetaan tiivistepesän pohjalle, kun halutaan suojata tiivisterenkaita. Jos tiivistenesteen sekoittuminen tiivistettävään tuotteeseen halutaan minimoida, johdetaan tiivisteneste tällöin lähelle ulointa

tiivisterengasta. Kun taas halutaan minimoida tiivisteneesten käyttö, se johdetaan tiivistimen keskelle. (Airila 1985, s.194)

3.2 Mekaaninen tiivistin

3.2.1 Tiivistimen toiminta

Mekaaniset tiivistimet ts. liukurengastiivistimet on kehitetty punostiivistimien tilalle, koska useissa paikoissa ei enää voida sallia prosessissa käsiteltävien aineiden vuotoa ympäristöön. Punostiivistimiin verrattuna liukurengastiivistimet ovat kalliita, sidottuja mittoihinsa ja niiden asennus tai korjaus edellyttää usein paljon purkamista (Kivioja 2009, s. 170). Mekaanisen tiivistimen toiminta perustuu kahteen liukupintaan, jotka painautuessaan toisiaan vasten saavat tiivistyksen aikaan (kuva 3). Toinen liukurengas on pyörivä ja kiinnitetty pumpun akseliin, toinen liukurengas taas paikallaan ja kiinnitetty tiivistimen runkoon. Toisiaan vasten liikkuvien renkaiden tiivistykseen tarvittava voima saadaan pumpattavan nesteen paineesta, sulkuaineen paineesta ja jousikuormitteisesta liukurenkaasta. (Mackay 2004, s.90; Flitney 2007, s.159)



Kuva 3. Liukurengastiivistimen perusrakenne (Mackay 2004, s.90).

Jotta tiivistimen toiminta olisi mahdollista, täytyy liukupintojen välissä olla nestekalvo, joka voitelee ja jäähdyttää liukupintoja. Toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että kaikissa tilanteissa nestekalvo säilyy pintojen välissä ja, että pinnat pysyvät kiinni toisissaan. Liukupinnat eivät saa olla liian tiukasti toisiaan vasten, eivätkä myöskään liian

kaukana toisistaan, ettei tiivistin rikkoonnu tai ala vuotamaan. (Mackay 2004, s.91; Flitney 2007, s.161) Voitelukalvon pysyvyys edellyttää kuitenkin pientä vuotoa liukupintojen välistä. Vuotoa on hankala silmämääräisesti havaita, koska lähellä liukupintojen ilmakehän puoleista reunaa neste höyrystyy. (Knowpap 2019) Tyypillisesti vuoto on todella vähäistä n. 0,1-10 ml tunnissa, mikäli tiivistinpintojen tasomaisuus ei ole riittävä, saattaa syntyä hydrodynaaminen voitelutilanne, jolloin tiivistimen vuoto lisääntyy (Miettinen & Airila 1995 s.650).

Liukurengastiivistimen ollessa ns. levossa, tiivistys toteutetaan toisiotiivisteillä, jotka yleensä ovat O-renkaita. Ne voivat toimia myös liiketiivistyksen toisiotiivisteinä, mikäli tiivistinrakenne altistuu ylimääräiselle liikkeelle, esimerkiksi tärinälle. (Airila 1987, s.327)

3.2.2 Liukurengastiivistimen käyttöalueet

Liukurengastiivistimet soveltuvat todella moniin teollisuuden tarpeisiin. Tyypillisesti tiivistimen käyttölämpötila-alue on $-40...+120^{\circ}\text{C}$, mutta erityisjärjestelyin voidaan saavuttaa jopa $-200...+400^{\circ}\text{C}$:en käyttölämpötilat. Tiivistimen maksimipaine on tavallisesti 10 barin luokkaa, mutta erityisjärjestelyin voidaan saavuttaa jopa 1000 barin paineenkesto. Olosuhteiden mukaan tiivistimen sallittu liukunopeus on alueella 10-20 m/s, mutta olosuhteiden ollessa erityisen hyvät voidaan päästä jopa 50 m/s liukunopeuteen. Suurin sallittu käyttölämpötila määräytyy usein toisiotiivisteinä käytettävien O-renkaiden materiaalin lämpötilan keston mukaan. (Miettinen 2014, s.423)

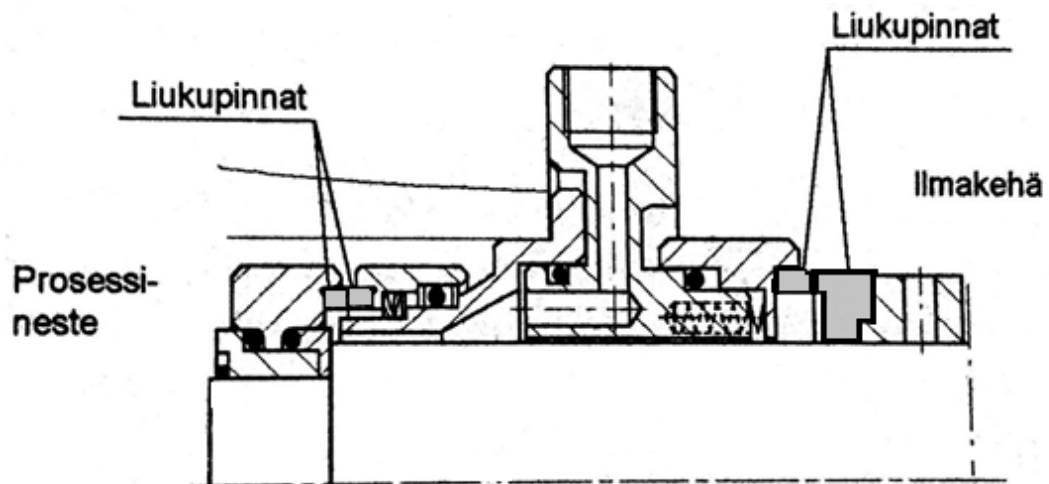
Liukurengastiivistimillä tiivistettävien aineiden kirjo on mittava. Tavallisimmat kohteet esimerkiksi paperiteollisuudessa voidaan tiivistää huoletta, kun tiivistimen materiaalit valitaan sopivasti ja käytetään sulkunestettä tarpeen vaatiessa. (Airila 1985, s.202)

3.2.3 Liukurengastiivisteet toiminnallisuutensa mukaan

Liukurengastiivistimet voidaan luokitella toimintansa perusteella seuraavalla tavalla:

1-toimisessa liukurengastiivistimessä on vain yksi liukupintapari. Sitä käytetään tiivistämään nesteitä, kun nesteen lämpötila on kiehumispisteen alapuolella ja sopivaa voitelemaan liukupintoja. Tiivistettävä neste ei saa kiteytyä joutuessaan kosketuksiin ilmakehän kanssa. Puhtaille nesteille on mahdollista käyttää sisäistä kiertoa, joka kulkee

pumpun painepuolelta tiivistimelle. Sisäisen kierron ansiosta tiivistimen käyttölämpötila voidaan nostaa nesteen kiehumispistettä korkeammaksi. (Knowpap 2019) Pumpattavan nesteen lisäkierrätys tiivistimen liukupintojen ympärillä vähentää lämpenemistä ja nesteen höyrystymistä, koska lämmönsiirtoon tarvittavaa väliainetta on enemmän saatavilla (Flitney 2007, s.190).



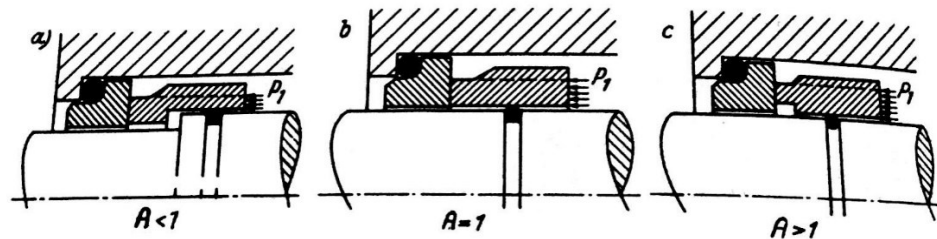
Kuva 4. 2-toiminen liukurengastiivistin. Liukupintojen välissä vaikuttaa paineistettu sulkuaine. (Miettinen 2014, s.413)

2-toimisessa liukurengastiivistimessä nimensä mukaisesti on kaksi liukupintaparia (kuva 4). Liukupinnat osoittavat vastakkaisiin suuntiin ja niiden välissä vaikuttava sulkuaine (tiivistevesi) estää tiivistettävän aineen pääsyn kosketuksiin ympäröivän ilmaston kanssa. (Miettinen 2014, s.413; Mayer 1969, s21-22) Sulkuaineen tulee olla aina korkeammassa paineessa kuin tiivistettävän nesteen. 2-toiminen tiivistin sisältää aina ylimääräisiä komponentteja tiivisteveden paineistamiseksi, kierrättämiseksi ja mahdollisesti jäähdyttämiseksi tai kuumentamiseksi. Näitä tiivisteitä suositellaankin vain, jos niitä pidetään tarpeellisena pumpun, henkilöstön tai ympäristön suojelemiseksi. (Nesbitt 2006, s.237) 2-toimista tiivistintä käytetään pääasiassa kaasujen, korkean kiintoainepitoisuuden omaavien nesteiden, kemiallisesti vaarallisten tai hyvin kuumien aineiden tiivistämiseen. (Mayer 1969, s.21-22; Mackay 2004, s.99-100)

3.2.4 Tasapainotettu ja tasapainottamaton mekaaninen tiivistin

Mekaanisen tiivisteiden tasapainotus (kuva 5) määrää liukupintoihin kohdistuvan niitä sulkevan voiman suuruuden. Voiman suuruus määräytyy tiivisteiden tehollisten

poikkipinta-alojen suhteena. Kun pinta-alasuhde on alle 1 puhutaan tasapainotetusta tiivisteestä ja vastaavasti kun suhde on suurempi kuin 1 puhutaan tasapainottamattomasta. Mitä pienempi pinta-alojen suhde on, sitä pienempi riski tiivistepintojen toisiinsa tarttumiseen on. Toisaalta, pinta-alasuhteen ollessa pieni kasvaa tiivistepintojen aukeamisen vaara. (Mayer 1969, s. 17-18)



Kuva 5. Tasapainottamaton ($A < 1$) ja tasapainotettu ($A > 1$) liukurengastiiviste. A = tehollisten poikkipinta-alojen suhde. (Mayer 1996, s.18)

Tasapainoton tiiviste altistaa koko pyörivän pinnan poikkileikkausalueen tiivistepesän paineelle, joten liukupintoja sulkeva voima on suuri. Tiivistepintoja sulkevan voiman suuruus on kaksinkertainen verrattuna niitä aukaisevaan voimaan. Tasapainottamattoman tiivisteeseen käyttöön kuuluu korkea käyttölämpötila ja nopea kulumisnopeus, joten niitä ei voi käyttää kohteissa, jotka ovat jo valmiiksi korkeassa lämpötilassa tai joissa tiivistettävä neste sisältää hankaavia partikkeleita. (Mackay 2004, s.94-96)

Tiivisteiden tasapainottaminen vähentää sulkuvoimaa ja pidentää tiivisteiden käyttöikää (Mackay 2004, s.94-96). Sulkuvoiman vähentäminen saavutetaan pienentämällä pyörivän pinnan tehollista poikkileikkausala käyttämällä porrastettua akselia tai holkkia. Porrastetun akselin valmistaminen ja käyttö on kustannuksien kannalta epätoivottavaa. Akselin porrastus saadaan aikaan vaihtoehtoisesti käyttämällä holkkia akselin ympärillä, mutta se aiheuttaa tarpeen ylimääräiselle staattiselle tiivistimelle, jotta vuotomahdollisuus akselin ja holkin välistä saadaan tukittua. (Mayer 1969, s.18)

Sulkuvoimaa ei kuitenkaan voida pienentää rajattomasti, koska on mahdollista, että tiivistepintojen välinen tila muuttuu epävakaaaksi ja tiivistepinnat aukeavat. Vaikka tasapainotetun tiivisteiden voisi kuvitella olevan ratkaisu kaikkiin tiivistystarpeisiin, ei näin ole, koska jotkut sovellukset voivat tarvita enemmän turvallisuutta kuin pitkää käyttöikää. Tällöin tarvitaan suurempaa voimaa, joka puristaa tiivistepintoja kiinni. Myös kylmää nestettä tiivistettäessä mahdollinen lämpötilan nousu ei ole merkittävä huolenaihe.

Tasapainotettua tiivistettä suositellaan, kun tiivistepesän paine ylittää 3 baria. (Mackay 2004, s.94-96)

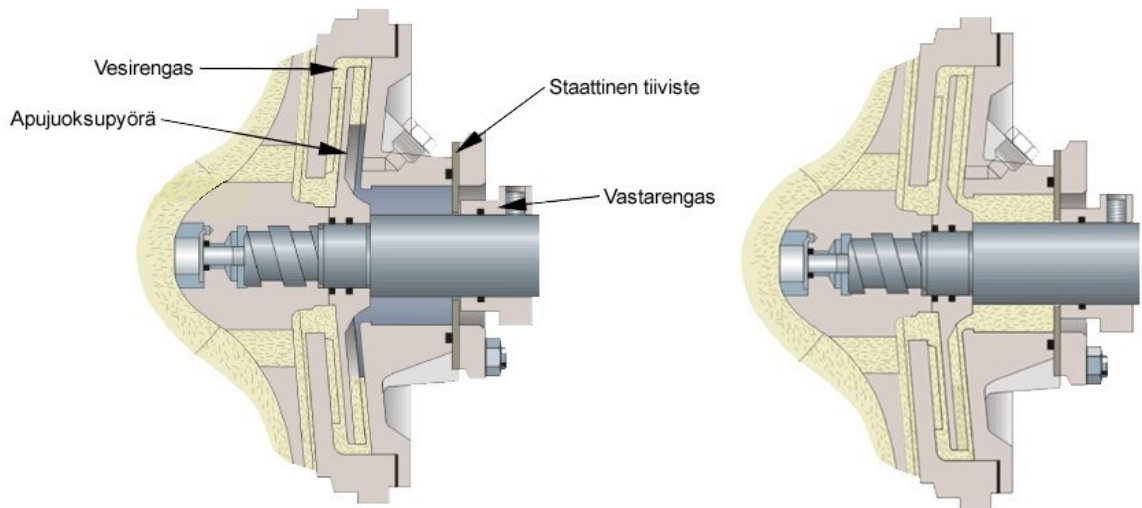
3.2.5 Toisiotiiviste

Yleensä toisiotiivisteinä käytetään kumista O-rengasta. Liukurengastiivistimessä liukupintojen väli on vain yksi mahdollisista vuotoreiteistä. Muita vuotoreittejä ovat akselin ja pyörivän tiivistinrenkaan väli ja paikallaan olevan tiivistepinnan ja pumpun pesän väli. Näiden tiivistämiseen on lukuisia renkaita, joiden poikkileikkaus vaihtelee ja joiden materiaalit ovat hyvin erilaisia. Käytännössä kumimateriaaleja käytetään pääasiassa, koska ne sopeutuvat hyvin suurempiin pinnankarheuksiin kuin jäykemmät materiaalit. Tiivistinrenkaita voidaan käyttää myös vääntömomentin siirtämiseen. (Mayer 1969, s.23)

Yksinkertainen ja pitkäikäinen O-rengas on tiivistysominaisuuksiltaan hyvä ja asennukseltaan helppo tiivistin. Staattisissa tiivistyskohteissa voidaan erikoisjärjestelyin O-renkaita käyttää jopa 350 barin paineeseen asti. Nitrilikumille soveltuvat olosuhteet ovat lämpötila-alueeltaan $-30\dots+100^{\circ}\text{C}$ ja silikonikumille $-60\dots+200^{\circ}\text{C}$. Kuluttaviin, kuumiin ja syövyttäviin olosuhteisiin on lukuisia erikoismateriaaleja. (Kivioja 2009, s.165)

3.3 Dynaaminen tiivistin

Dynaamisen tiivistimen (kuva 6) toimintaperiaate on, että pumpun akselille sijoitettu apujuoksupyörä pumppaa tiivistettävän nesteen pois tiivistepesästä, kun pumppu on käynnissä. Apujuoksupyörä muodostaa ulkokehälleen nesterenkaan, joka estää prosessinesteen pääsyn eteenpäin. Dynaamisen tiivistimen juoksupyörä toimii täysin samalla tavalla, kuin pumpun varsinainen juoksupyörä. Pumpun pysähtyessä myös apujuoksupyörä pysähtyy, jolloin tiivistysvaikutus lakkaa. Tiivistetilassa oleva seisontatiiviste painuu vastarengasta vasten tiivistetilan täytyessä pumpattavasta nesteestä, jolloin vuotoa ei pääse tapahtumaan. Pumpun käynnistyessä uudelleen apujuoksupyörä pumppaa tiivistetilan tyhjäksi ja seisontatiiviste vapautuu. (Vanhala 2001; Knowpap 2019)



Kuva 6. Dynaamisen tiivistimen rakenne (Knowpap 2019)

Kitkaton ja voiteluvapaa tiivistin tarjoaa kulutusta kestävän tiivistin ratkaisun, joka soveltuu hyvin erilaisille tiivistettäville aineille, poissulkien ympäristölle haitalliset ja myrkylliset aineet. Dynaaminen tiivistin soveltuu käytettäväksi kaikille niille nesteille ja kiintoainetta sisältäville tuotteille, joita yleensä prosessipumpuilla pumpataan. Tiivistimen käyttöikä määräytyy suoraan siinä käytettävistä materiaaleista, mutta yleensä voidaan käyttää samoja valumateriaaleja kuin pumpun painetta kantavien osien materiaali. Näin ollen tiivistimen ja pumpun muiden nesteen kanssa kosketuksissa olevien osien käyttöikä on sama. (Vanhala 2001; Knowpap 2019)

Dynaamisen tiivisteiden käytössä keskeinen tavoite on, ettei yhtäkkiä vikaantumisia tapahdu. Tiivistin ei myöskään tarvitse erillisiä voitelu- tai sulkunestejärjestelmiä, josta seuraa suoraan suuria säästöjä käyttö- ja kunnossapitokustannuksissa. Dynaamisen tiivisteiden käytölle on myös rajoitteita. Pääasiassa pumpattavan nesteen laatu, lämpötila ja tulopaineen taso ovat määrääviä tekijöitä. Pumpattavan nesteen tulee olla sen kiehumispisteen alapuolella, jotta dynaamista tiivistintä voidaan käyttää. Sallittava tulopaineen arvo taas riippuu tiivistimen pyörimisnopeudesta ja apujuoksupyörän halkaisijasta. On myös äärimmäisen tärkeää huomioida, että ympäristölle vaarallisia nesteitä tiivistettäessä dynaamisen tiivistimen käytössä on käytettävä harkintaa. Tiivistin on avoin ratkaisu, jolloin tiivistettävä neste pääsee kosketuksiin ympäröivän ilman kanssa. (Vanhala 2001; Knowpap 2019)

4 SULKUAINELAJÄRJESTELMÄT JA NIIDEN TOIMINTA

4.1 Veden kanssa toimivat tiivistinratkaisut

1-toimisia tiivisteitä flush-huuhtelulla käytetään, kun tiivistettävä aine on ominaisuuksiltaan kelpaamatonta tiivisteeseen voiteluun tai jäähdytykseen. Aine voi olla todella kuumaa, likaista tai kuluttavaa, jonka vuoksi se pitää eristää täysin liukupinnoista. Vesi tuodaan tiivistimelle suuremmassa paineessa, kuin pumpattava tuote. Näin ollen vesi laimentaa ja kuljettaa kaikki haitalliset hiukkaset pois liukupinnoilta ja toimii samalla liukupintojen voiteluaineena. Vesi johdetaan siis tiivistimen läpi pumpun pesään. Joissain tapauksissa tätä huuhtelutapaa ei voida toteuttaa, koska vesi voi olla haitallista prosessissa olevalle tuotteelle. (Mackay 2004, s.101-102; Nesbitt 2006, s.231)

Quench-huuhtelu tarkoittaa matalapaineista huuhtelua ja jäähdytystä, joka suoritetaan tiiviste-pintojen ulkopuolella. Mahdolliset vuodot, jotka pyrkivät kiteytymään poistetaan tiiviste-pintojen ulkopuolelta ilman, että huuhteluneste pääsee missään vaiheessa tiivistin-pintojen väliin. Korkean lämpötilan sovelluksissa käytetään höyryä tiiviste-pintojen jäähdyttämiseen ja kiteytymien liuottamiseen. (Mackay 2004, s.101-102) Viileällä nesteellä pyritään myös kondensoimaan mahdolliset höyrypäästöt, jotteivät ne pääsisi kosketuksiin ympäröivän ilman kanssa. Vaihtoehtoisesti quench-huuhtelussa voidaan käyttää lämmintä nestettä tai höyryä, jotta jään muodostuminen saadaan ehkäistyä, kun prosessinesteen lämpötila on alle 0°C. Kylmän huuhtelunesteen käyttöä suositetaan silloin, kun halutaan estää ilman pääsy prosessiin, kun prosessin paine on ilmakehän paineen alapuolella. (Nesbitt 2006, s.231)

2-toimisissa tiivistimissä vanhemmat ratkaisut ovat yleensä tasapainottamattomia, mikä käytännössä tarkoittaa, että liukupintojen pitäminen suljettuna edellyttää jatkuvaa ylipaineisen tiivistenesteen käyttöä. Jo hetkellinen tiivisteveden paineen lasku prosessipaineen alle aiheuttaa liukupintojen avautumisen ja tiivisteaurion. Jotta jatkuva ylipaine saadaan ylläpidettyä, ei tiivisteveden virtausta voida pienentää missään vaiheessa. Tiivistin on vaarassa vaurioitua jo pienestäkin häiriöstä tiivisteveden syötössä. (Knowpap 2019)

2-toimiset kaksoistasapainotetut tiivistimet toimivat niin, että liukupinnat eivät avaudu, vaikka prosessin ja tiivisteveden painesuhteet muuttuisivat. Ylipaineisen tiivisteveden

käyttöä kuitenkin suositellaan, varsinkin kuluttavissa olosuhteissa. Hetkelliset painevaihtelut eivät ole vaarallisia tiivistimen toiminnalle. Näin ollen tiivisteveden määrällä ja tietyllä painetasolla ei tarvitse varmistaa tiivistinpintojen kiinnipysymistä. (Knowpap 2019)

4.2 Ilman vettä toimivat tiivistinratkaisut

1-toimisia liukurengastiivistimiä voidaan käyttää ilman ulkopuolista tiivistenestettä silloin, kun tiivistettävä neste on voitelevaa, tiivistettävä paine on kohtuullinen, enimmillään 15 baria ja lämpötila alle 150°C. Tiivisteiden jäähdytys toteutetaan tiivisteveden sisäisellä virtauksella, joten tiivistettävälle aineelle vaaditaan riittävät lämmönsiirto-ominaisuudet. Tällaisia järjestelyjä käytetään esimerkiksi vesipumpuissa ja laimeiden massojen käsittelyssä. (Flitney 2007, s.186)

2-toimisia tiivisteitä voidaan käyttää virtaamattomalla tiivistevedellä silloin, kun tiivistimen voitelu- ja jäähdytystarve on minimoitu. Oikeanlaisella suunnittelulla tiivistimen liukupintojen kuormituskertoimet saadaan määriteltä siten, että tietyllä käyttöpainalueella liukupintoihin ei kohdistu liian suuria puristusvoimia, joista aiheutuisi ylimääräinen voitelu- ja jäähdytystarve. Tänä päivänä liukupintojen materiaalit ovat niin hyviä kitkaominaisuuksiltaan, että tiivistimen käytössä syntyvä lämpö pysyy tarpeeksi alhaisena. Liukupinnoissa käytettävät materiaalit ovat yleensä piikarbidia molemmat pinnat tai piikarbidia ja hiiltä. Esimerkiksi paperiteollisuuden pulppereiden, sekoittimien, pumppujen ja lajittimien tiivistimet voidaan voidella virtaamattomalla vedellä. (Knowpap 2019)

Vaihtoehtoisesti sulkuaineena voidaan käyttää myös paineistettua kaasua. Tällaista tiivistintä kutsutaan nimensä mukaisesti kaasutiivisteeksi. Tiivisteiden toimintaperiaate on, että 2-toimisen tiivisterakenteen pyörivät liukupinnat on varustettu dynaamisilla urilla, jotka pyörivät staattisia tasopintoja vasten. Urat sijoittuvat liukupinnan ulkokehälle, jolloin pyörimisen alkaessa urat alkavat ns. syöttämään kaasua pintojen väliin. Näin ollen pyörimisliikkeen seurauksena muodostuu kaasukalvo, joka pitää pinnat toisista erillään. Kaasukalvo estää tiivistinpintojen mekaanisen kosketuksen toisiinsa. Kun pyörimisliikettä ei esiinny, pinnat painautuvat toisiaan vasten ja näin ollen estävät tiivistimen vuodon. Kaasutiivisteitä käytetään esim. pyörivissä kompressoreissa.

Kaasutiivisteitä voidaan käyttää yksinään vaarattomien tuotteiden tiivistämisessä, mutta usein niitä käytetään yhteistyössä nestetiivistimien kanssa. (Flitney 2007, s.179-181)

4.3 Tiivisteveden kulutukseen vaikuttavat laadulliset tekijät

Useat tekijät voivat vaikuttaa siihen, kuinka paljon tiivisteveettä systeemi kuluttaa. Vaikuttavia tekijöitä ovat tuotteen lämpötila, pyörimisnopeus, tiivisteveden lämpötila ja paine sekä ympäröivän järjestelmän lämpötila. Tiivisteveden kulutuksen kuitenkin yleensä määrittää sen laatu. Heikkolaatuinen vesi pakottaa käyttäjän lisäämään tiivisteveden virtausnopeutta, jotta järjestelmän säätöventtiilien tukkeutuminen saadaan estettyä. Lisätty virtausnopeus johtaa tiivisteveden turhaan kulutukseen. (Sorvoja 2012) Useimmiten tiivistimelle riittäisi 0,5-1,0 l/min virtaus, mutta säätölaitteiden toiminnan takaamisen vuoksi virtauksen täytyy olla 2-5 l/min. (Knowpap 2019)

Tiivistevedelle asetettavat laatumääritykset ovat hankalia määrittää tarkasti, mutta on olemassa paljon erilaisia raja-arvoja, joiden sisällä vesiarvojen tulisi olla. Raja-arvot ovat yleisesti pumppu- ja tiivistevalmistajien määrittelemiä. (Knowpap 2019)

Sorvojan (2012) mukaan tiivisteveden laadun tulee täyttää seuraavat vaatimukset:

- Ei epäpuhtauksia, kuten savea
- Hiukkasten partikkelikoko max. 50 µm
- Silikaattipitoisuus max. 10 mg/l
- Orgaanisten epäpuhtauksien pitoisuus max. 30 mg/l
- Rautapitoisuus max. 1 mg/l
- Veden kokonaiskovuus < 10°dH

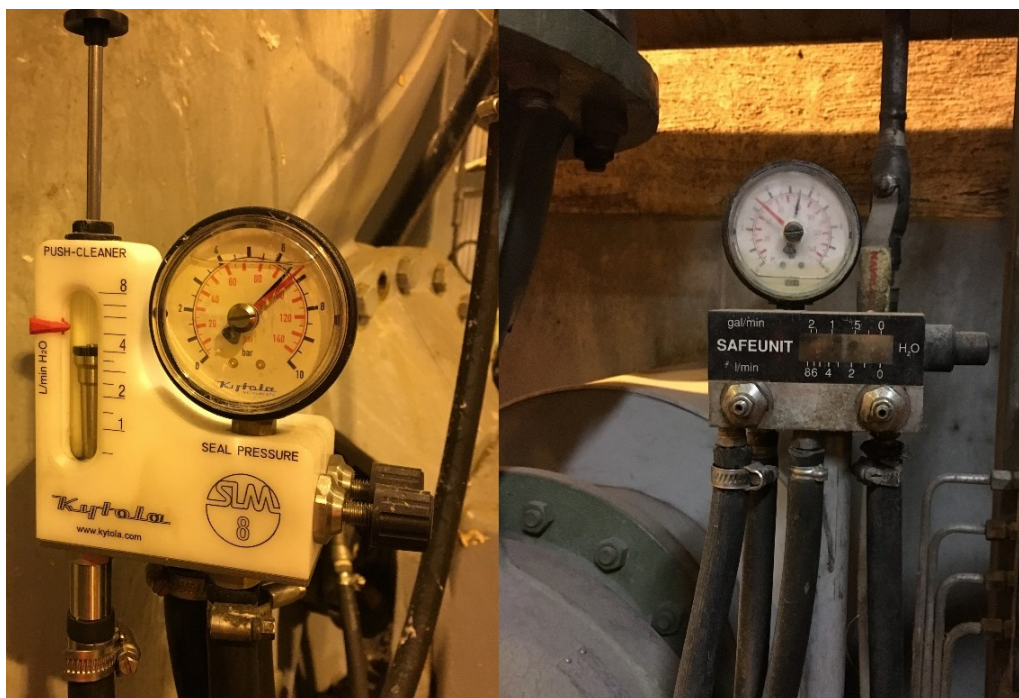
Edellä mainitut raja-arvot eivät kuitenkaan takaa veden soveltuvuutta tiivistevedeksi. Tehtaissa käytetyt vedet ovat luonnon pintavesiä, jonka vuoksi veden mukana on puhdistustavasta huolimatta pieniä hiukkasia ja lietettä. Nämä pienet partikkelit mahtuvat hyvin raja-arvojen sisälle ja ajan saatossa ne kertyvät tiivistevesiputkistoihin ja mahdollisesti irrotessaan tukkivat tiivisteveden säätölaitteita. (Knowpap 2019)

4.4 Tiivisteveden seurantalaitteet ja valvontajärjestelmät

Jokaiselle tiivistetyypille on määritelty tiivisteveden virtaus- ja painevaatimukset. Näiden vaatimusten ylittäminen ei tarjoa mitään etuja järjestelmän toiminnalle. Tiivisteiden voitelu ja epäpuhtauksien huuhtelu pois vaatii minimaalisen määrän tiivistevedettä. Yleensä tiivisteiden läpi virtaa aivan liikaa vettä verrattuna todelliseen tarpeeseen. Tiivisteveden kulutusta voidaan vähentää yksinkertaisten järjestelyjen avulla. (Sorvoja 2012)

4.4.1 Virtausmittari

Tiivisteveden käytöstä seuraa, että täytyy olla laitteisto, jolla tiivisteveden kulutusta ja painetta voidaan valvoa ja tarvittaessa säätää (kuva 7). Veden kulutuksen optimointi on tärkeää, koska puhtaan tiivisteveden valmistus ja vastaavasti jäteveden käsittely aiheuttaa suuria kustannuksia tuotantolaitokselle. Tiivisteveden seurantalaitteilla voidaan parantaa huomattavasti myös tiivisteiden kunnonvalvontaa, koska valvontalaitteista on nopealla vilkaisulla nähtävissä tiivisteveden paine ja virtaus. Laitteistoihin on mahdollista asentaa myös elektronisia paine- ja virtausmittareita, jotka voi tarpeen vaatiessa liittää ohjausjärjestelmiin ja saada reaaliaikaista tietoa tiivistimien kunnosta. Tiivisteveden seurantalaitteiden pääasiallinen tarkoitus on pienentää veden kulutusta. (Kytola Instruments Oy 2019)



Kuva 7. Tiivisteveden kulutuksen seurantaan ja säätöön tarkoitettuja virtausmittareita.

4.4.2 Älykkäät tiivisteveden ohjausjärjestelmät

Tiivisteveden kulutuksen optimoimiseksi on olemassa järjestelmiä, joilla voidaan vähentää jopa 97% tiivisteveden käyttöä verrattuna virtaus- ja painemittareihin. Järjestelmät säätelevät veden kulutusta tiivisteiden lämpötilan perusteella, antaen tiivisteveden virrata järjestelmän läpi vain, kun tiiviste tarvitsee jäähdytystä. Mahdollisuuksia lämpötilan tarkkailuun ja virtauksen säätelyyn on useita, järjestelmää voidaan ohjata esimerkiksi mm. aktivoituvalla muistimetallijousella tai induktiivisella kytkimellä. Toisin kuin virtausmittarit, älykkäät tiivistevesijärjestelmät voivat käyttää samaa vettä useampia kertoja. Kun tiivistevesi saavuttaa tietyn lämpötilan, järjestelmä aktivoituu ja vesi valuu tiivisteeltä pois. Lämpötilan laskiessa haluttuun arvoon, järjestelmä sulkeutuu ja tiivisteveden kulutus loppuu. (Sorvoja 2012)

Tällaiset ohjausjärjestelmät ovat parhaimmillaan, kun tiivistettävä kohde ei ole erityisen kuuma eikä kylmä. Jos lämpötila on liian matala tiivistin ei välttämättä tuota tarpeeksi lämpöä, jolloin säätölaite ei toimi halutulla tavalla. Tämä voi aiheuttaa veden pysymistä järjestelmässä pitkään vaihtumatta, joka johtaa mahdollisesti bakteeriston kasvuun. Korkean lämpötilan kohteissa järjestelmä taas on aktiivisena tiheämmin, mikä aiheuttaa veden kulutukseen kasvua. (Sorvoja 2012)

4.4.3 Laitekohtaiset suljetut järjestelmät

On myös olemassa laitekohtaisia suljettuja sulkuainejärjestelmiä. Niissä käytettävä sulkuaine on prosessinesteestä eroavaa, mutta kuitenkin yhteensopivaa sen kanssa, yleisimmin vettä. Järjestelmään kuuluu painesäiliö, joka tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle tiivistintä. Tapoja tiivistenesteen kierrätykseen on monia. Järjestelmät voivat toimia nesteen kierrätyspumppulla tai esimerkiksi tiivistenesteen lämpötilaerosta johtuvalla virtauksella, jolloin erillistä pumppausta ei tarvita. Painesäiliöön voidaan lisätä erillinen tiivistenesteen jäähdytys tai lämmitys. Järjestelmissä usein on myös seurantalaitteita, jotka hälyttävät, mikäli järjestelmän olosuhteet muuttuvat. Laitekohtaiset sulkuainejärjestelmät mahdollistavat tiivisteiden toiminnan tarkan valvomisen ja tiivistenesteen säästön. Suljetussa järjestelmässä sulkuaine voi olla nestettä tai kaasua. (Mackay 2004, s.103-104) Suljettuja järjestelmiä käytetään esimerkiksi silloin, kun tiivistettävä kohde on erillään muista tiivistekohteista, eikä tiivistevedettä ole helposti saatavilla. (Knowpap 2019)

5 TIIVISTEIDEN VAURIOMEKANISMIT

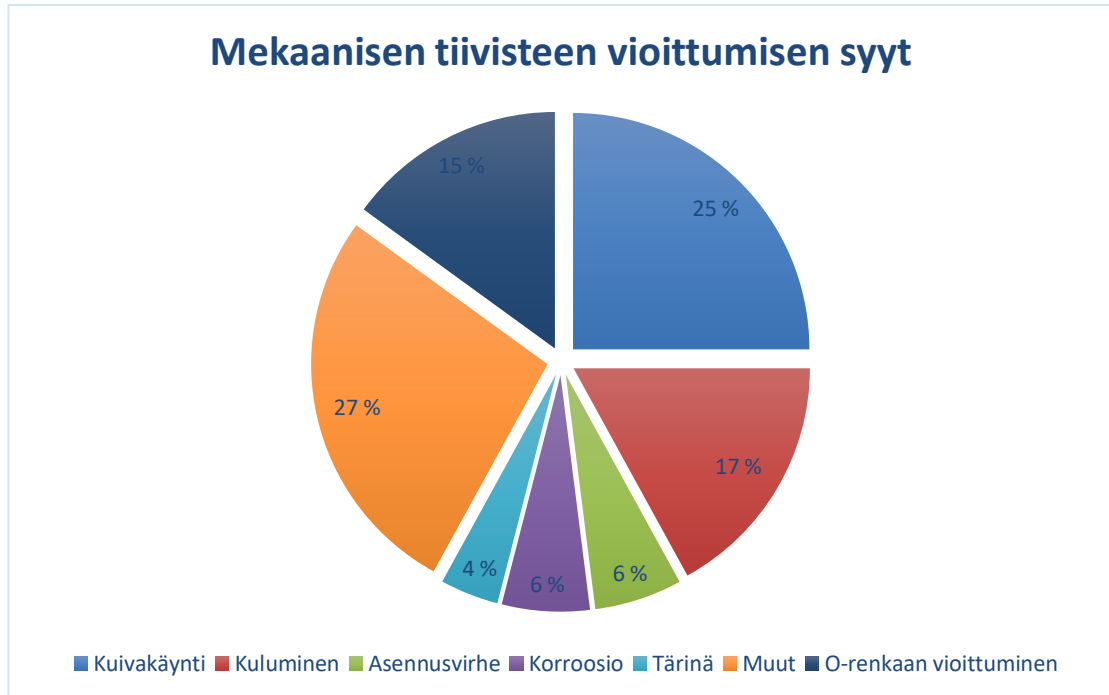
Tiivistimen toteaminen vaurioituneeksi tehdään kohonneen vuodon perusteella, joka voi ilmetä seuraavilla tavoilla: tiivistettävä aine vuotaa laitteesta ulos, tiivistettävän tilan paine laskee tai sulkunesteen kulutus kasvaa. Lisääntynyt vuoto ei välttämättä heti vaadi korjaavia toimenpiteitä, mutta suurissa tuotantolaitoksissa taloudelliset kustannukset alkavat nopeasti kasvamaan vuotojen seurauksesta. (Miettinen & Airila 1995 s.657)

Mekaanisen tiivisteiden vaurioitumisen syyn selvittäminen voi olla hankalaa ja edellyttää monimutkaisia tutkimuksia. Ilman perusteellista tietoa järjestelmän, koneen ja tiivistimen toiminnasta voi helposti ajautua harhaan vikaantumisen syytä etsittäessä. Vaurion syyn selvittämiseen osallistuvan henkilöstön tulisi omata tarpeeksi kattava kokemus näistä kaikista osa-alueista. (Flitney 2007, s.437-438)

Suuri osa mekaanisten tiivisteiden vioista johtuu tekijöistä, jotka eivät suoranaisesti liity tiivistimeen. Tutkimuksien mukaan monien vikaantumisten syynä on laitteiston väärinkäyttö, kuten pumppujen kuivakäynti, pumppaaminen suljettua venttiiliä vasten tai valvonnan laiminlyöminen. Mekaaniset tiivisteet ovat kuitenkin monimutkaisia rakenteita, joissa on useita komponentteja. Jokaisen yksittäisen komponentin vikaantuminen voi johtaa siihen, että tiivistimestä tulee käyttökelvoton. (Flitney 2007, s.437-438)

Oikean tiivistimen valinta käyttökohteeseensa ja sen oikein tehty asennus määrittävät tiivistimelle käyttöiän perustan. Näiden seikkojen jälkeen tiivistimen vaurioitumiseen vaikuttavat esim. liukukosketuksen voitelutilanne, kehittyvän kitkalämmön suuruus ja mahdolliset pintojen epätasaisuudet. Tarkkaa tiivistimen käyttöikä on vaikea määrittää. Suotuisissa olosuhteissa käyttöikä voi liukurengastiivistimellä olla jopa 20 vuotta. Tiivistimen vaurioitumista voidaan ennalta ehkäistä ja ennustaa käynninaikaisella kunnonvalvonnalla, mutta sitä käytetään yleensä vai koneen tai prosessin kannalta kriittisimmissä tiivistimissä. Valvottavia asioita voivat olla esim. sulkunestetiivistimien sulkunesteen virtaus ja paine tai tiivistimen lämpötila. (Miettinen & Airila 1995 s.657-

658)



Kuva 8. Vikaantumisen yleisimmät syyt ja niiden jakautuminen (Flitney 2007, s.437)

Kuvassa 8 on nähtävissä mitä yleisimmät vikaantumisen syyt ovat ja miten ne jakautuvat. Mekaanisen tiivisteän voittumisen suurin syy on tiivistimen kuivakäynti. Yleinen ja erittäin tärkeä sääntö on, että mekaanista tiivistettä ei saa koskaan käyttää kuivana vaan liukupintojen välissä tulee aina olla voiteleva nestekalvo. Kuivakäynti tapahtuu, kun voitelukalvo höyrystyy liukupintojen välistä liiallisen lämmön seurauksena. Kuivakäynti on mahdollista, vaikka pumpun pesä olisi täynnä nestettä. On olemassa erityisiä tiivistinratkaisuja, joita voidaan käyttää kuivana, mutta tiivisteän käyttöolosuhteista ja niihin kuuluvista yksityiskohdista täytyy olla täysin tietoinen. Kuten, että kuinka kauan tiivistin toimii ilman nestevoitelua ja jäähtytystä. (Nesbitt 2006, s.234)

Toiseksi suurin syy on kuluminen. Huonosti valituilla liukupintojen materiaaleilla kuluminen voi olla hyvin merkittävää. Käytännössä huonosti suunniteltu tiivistin yhteensopivilla liukupintojen materiaaleilla on parempi vaihtoehto kuin hyvin suunniteltu tiivistin huonoilla liukupintojen materiaali valinnoilla. Hyvissä materiaaleissa on havaittavissa pinnan huokoisuutta, jolloin ne kykenevät varastoimaan voiteluainetta itseensä. Huokoisuus on harmitonta niin kauan, kunhan pinnat eivät pääse hankaamaan toisiaan vasten. (Mayer 1969, s.94)

Punostiiviste harvoin täysin vaurioituu, mutta on helposti löydettävissä pääsyyt, joista vaurio voi syntyä. Huolimattomasta asennuksesta tai liiallisesta tiivistimen kiristämisestä voi seurata tiivisteiden palaminen, jonka seurauksena kitka akselin ja tiivisteiden välissä kasvaa, mikä vaurioittaa pahimmassa tapauksessa tiivistimen lisäksi myös akselin ja akseliholkin. Tiivisteiden vuotovirtauksen tai tiivisteveden puutos voi johtaa myös tiivisteiden palamiseen. Kohteeseen sopimaton tiivistemateriaali tai vääränlainen tiivistimen käyttöönotto johtaa myös ennen pitkään tiivistimen vaurioitumiseen. (Knowpap 2019)

6 CASE: AKSELITIIVISTÄMINEN SELLUTEHTAALLA

6.1 Efora Oy

Efora Oy on Stora Enson tytäryhtiö, joka tuottaa Stora Ensolle jatkuvia kunnossapitosopimuksia, engineering – palveluita sekä muita erikoispalveluita. Eforan toimenkuvaan kuuluu näin ollen tehtaan häiriöttömän toiminnan takaaminen, tuotantotehokkuuden maksimoiminen ja tuotantolinjojen elinkaaren hallinta. Efora vastaa mm. sahojen, sellutehtaiden, paperi- ja kartonkikonelinjojen, arkituslinjojen sekä tehtaiden voimantuotannon kunnossapidosta. Eforan tavoite on parhaiden toimittajien verkostoa, tiedonhallintaa ja oman tekemisen tehokkuutta apuna käyttäen kasvattaa elinkaariarvopohjaista liiketoimintaansa. (Efora Oy 2019)

6.2 Tiivistämisen nykytilanne

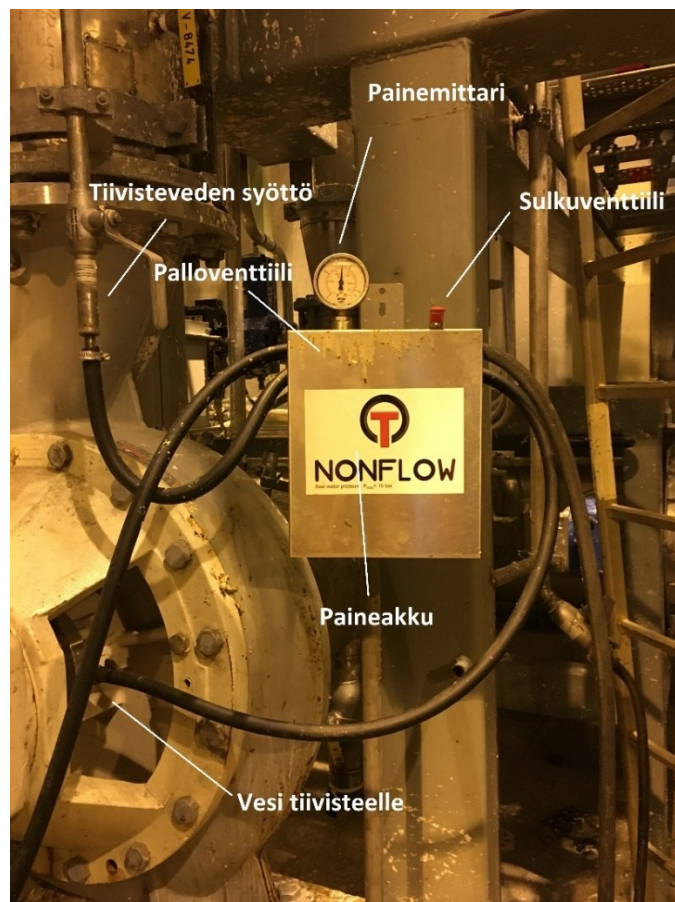
Stora Enson Oulun sellutehtaan nykytilanne tiivistämisen suhteen on seuraavanlainen. Useissa toimintopaikoissa on puutteita tiivistimen toiminnan tai virtausmittarin suhteen. Osassa tiivistimistä on vuotoja tai alkavia vuotoja, viallisia tai erittäin vanhoja virtausmittareita on useita ja osassa tiivisteistä tiivisteveden paine on alhainen. Virtausmittarien kunnossapito ja ennakkohuolto vaatii nykypäivänä huomattavan määrän resursseja, tämä työmäärä on mahdollista ohittaa yksinkertaisilla ratkaisuilla tiivistimien ja virtausmittarien valinnan suhteen. Työn tarkoituksena on selvittää, millaisia tiivisteitä ja tiivisteveden ohjauslaitteita vanhojen tilalle kannattaa investoida, jotta saavutettaisiin säästöjä kustannuksissa ja työpanoksessa. Tavoitteena on myös tarkastella, miten tiivisteveden kulutusta saataisiin taloudellisesti ja järkevästi vähennettyä. Sellutehtaalla on jo otettu käyttöön muutamissa paikoissa Tiivistetekniikka Oy:n NF-GO™ Supply System – järjestelmiä, joten tarkoituksena on myös selvittää, että kannattaako niitä investoida lisää.

6.3 NF-GO™ Supply System

NF-GO™ Supply System on Tiivistetekniikka Oy:n valmistama sulkunestejärjestelmä yrityksen Nonflow™ - rakenteisille, kaksitoimisille LP-D – liukurengastiivistimille. Tiivistimien sisäinen jäähdytyskierto mahdollistaa tiivistimen käytön ilman läpivirtaavaa

tiivisteettä. Järjestelmässä (kuva 9) on paineakku, joka ylläpitää sulkunesteen paineen ja tasaa vesilinjan painenvaihtelut esimerkiksi tilanteissa, kun vesilinja tukkeentuu. Paineakku kykenee pitämään sulkunesteen paineistettuna useidenkin päivien ajan. Järjestelmässä ei ole pieniä virtauskanavia, eikä jatkuvasti virtaavaa vettä tarvita, joten tiivisteelle päätyvän kiintoaineen määrä vähenee huomattavasti. Järjestelmän tarkoituksena on tarjota käyttäjälle kustannussäästöjä ja tiivisteelle paremmat toimintaolosuhteet. (Tiivistetekniikka Oy 2019)

Järjestelmän toiminta perustuu siihen, että sulkuneste syötetään takaiskuventtiilin kautta tiivistimeen. Tiivistimen jälkeen sulkuneste virtaa sulkuventtiilille, johon nesteen virtaus loppuu. Tiivisteettä voidaan käyttää tiivistimen läpi normaalisti, mikäli sulkuventtiili aukaistaan. Joissain tilanteissa se on välttämätöntä, kuten järjestelmän ilmauksen tai lämpötilan liiallinen nousu yhteydessä. Järjestelmä ei kuitenkaan ole suljettu, koska vesisyöttö on koko ajan aktiivinen. Mikäli tiivistin vuotaa, vettä on kuitenkin saatavilla. Järjestelmään on mahdollista asentaa virtaus-, paine- ja lämpötila-anturit, joilla esim. tiivistimen vuoto on helppo todeta. (Tiivistetekniikka Oy 2019)



Kuva 9. NF-GO™ Supply System asennettuna paikalleen.

Järjestelmää asennettaessa ja käytettäessä on huomioitava, että se on asennettu korkeammalle kuin liukurengastiiviste. Sulkunesteen paineen tulee olla jatkuvasti 2 Bar korkeampi, kuin tuotteen paine, mutta kuitenkin suurimmillaan 10 Bar. Tiivistevesilinjan paine siis määrää sulkunesteen paineen. On myös huomioitava, että tiivistimen kotelorenkään lämpötila ei saa nousta yli 110°C, näin käydessä tulee sulkuventtiili avata ja jäähdyttää tiivistin omatoimisesti. Kotelorenkään lämpötilan tulee pysytellä alle 60°C. (Tiivistetekniikka Oy 2019)

6.4 Tiivisteveden valmistus sellutehtaalla

Tiivistevetenä käytetään tehtaan vesilaitoksella kemiallisesti puhdistettua vettä. Vesi pumpataan puhdistuslaitokselta tiivistevesisäiliöön, josta se pumpataan tiivistevesiverkostoon verkkosuodattimien (kuva 10) läpi. Verkkosuodattimien suodatuskyky on 40-60 µm, mutta Knowpap (2019) oppimisympäristön mukaan jatkuvaa alle 50 µm suodatustulosta on hankala saavuttaa. Tiivistevesiverkosto on jaettu kahteen osaan: matalapaineiseen ja korkeapaineiseen verkostoon. Tiivisteveden pumppaus hoidetaan kahdella kahdenetulla pumppausyksiköllä, toinen yksikkö matalapainepuolelle ja toinen korkeapainepuolelle. Näin ollen yksikköön kuuluvista pumpuista toinen on varalla, kun toinen on käynnissä. Tiivistevesi pumpataan virtausmittareiden kautta tiivistimelle ja tiivistimeltä kanaalin kautta jätevesilaitokselle.



Kuva 10. Tiivisteveden suodattimet.

6.5 Tiivistämisen kustannukset

Tiivistämisen kustannuksia tarkasteltaessa, on kulut laskettava riittävän pitkältä ajalta. Tiivistämisen merkittävimpiä käynninaikaisia kuluja ovat: jatkuva huolto- ja seurantarve, kuluneiden osien vaihto ja huoltaminen, tiivisteveden ja energian kulutus. Tiivisteveden hintaa tarkastellessa on olennaista ottaa huomioon sen valmistus-, investointi ja hävityskulut. (Knowpap 2019)

Kustannuksia laskettaessa tulisi huomioida myös mahdolliset kunnossapidosta johtuvat tuotannon pysäytykset ja tuotannonvajaudet, tarvittavat varaosat ja niiden vaihtotyöstä aiheutuvat kustannukset, ylimääräinen valvonta- ja raportointityö ja linjan uudelleen käynnistäminen. (Knowpap 2019)

Tiivistämisen kustannuksia lähdettiin lähestymään siitä näkökulmasta, että laskentaajaksi valittiin yksi vuosi ja tarkasteluun yksi mekaaninen tiiviste. Tarkoituksena oli laskennallisesti selvittää, kuinka paljon yksi mekaaninen tiivistin aiheuttaa kustannuksia

vuodessa ja mitä toimenpiteitä on kannattavaa tehdä, jos esimerkiksi virtausmittari täytyy uusiksi. Kiersimme satunnaisen otannan eri tiivisteillä ja katsoimme virtausmittarin lukemia, lähes jokaisessa virtaus oli n. 4 l/min, joten laskenta suoritetaan sillä arvolla. Laskennan ei ole tarkoitus olla absoluuttinen totuus vaan realistista suuntaa antava arvio. Kustannuksissa on lähes mahdotonta ottaa huomioon kunnossapidosta ja kunnonvalvonnasta aiheutuvia kuluja. Tarkemmat tiedot laskennassa käytettävistä arvioista on taulukossa 1.

Taulukko 1. Tiivisteveden kulutus ja kustannukset

Tiivisteveden kulutus	4 l/min
Aika (arvioidaan, että tiivisteveettä ei käytetä 10 päivänä vuodessa johtuen seisakeista.)	60min*24h*355d
Kemiallisesti puhdistetun veden valmistus	X € / 1 000 000 l
Jäteveden käsittely	X € / 1 000 000 l
Tiivisteveden pumppaukseen kuluva energian: n. 10% kemiallisesti puhdistetun veden hinnasta.	X € / 1 000 000 l
Veden kulutus vuodessa	4 l/min * 60min*24h*355d = 2 044 800 l
Kustannukset vuodessa	X / 1 000 000 l = X € / 1 000 000 l
Yhteensä	X € / vuosi

Näin ollen yksi mekaaninen tiiviste, jossa käytetään sulkuaineena tiivistimen läpi virtaavaa vettä, kustantaa tehtaalle noin 400 € vuodessa. Seuraavaksi tarkastellaan, että minkälainen ratkaisu viollisen virtausmittarin suhteen kannattaa tehdä.

- Uusi normaalitoiminen virtausmittari X €
- NF-GO™ Supply System – järjestelmä X €

Perinteisten virtausmittarien uusimisen sijaan kannattaa investoida järjestelmään, joka ei käytä koko ajan virtaavaa tiivisteveettä. Järjestelmän takaisinmaksuaika on uusinta vaiheessa yksi vuosi, jonka jälkeen siitä saa säästöä vuodessa tiivisteveden kustannuksien verran, koska läpivirtaavaa vettä ei enää tarvita. Läpivirtaamatonta järjestelmää ei välttämättä joka paikkaan ole mahdollista laittaa, mutta niissä paikoissa, joissa se on asennettavissa, kannattaa se ottaa käyttöön.

6.6 Tiivisteveden käytön rajoittamisella saavutettavat hyödyt

Tiivisteveden kulutusta vähentämällä ei ainoastaan vähennetä kustannuksia tiivisteveden valmistuksessa ja jäteveden käsittelyssä, vaan sillä voidaan parantaa tiivisteiden toiminnan luotettavuutta. Tiivisteveden kulutuksen vähentämisen myötä vähenee myös tiivistevesijärjestelmien ja tiivisteiden kunnossapitoon käytetyt kustannukset. Arviolta 59% tiivisteveioista aiheutuu tiivisteveeten liittyvistä ongelmista. Suurin syy on, että tiivisteveeten jää aina pieniä partikkeleita puhdistustavasta huolimatta, jotka lopulta aiheuttavat virtausmittareiden tukkeutumista ja näin ollen tiivisteiden kuivakäyntiä. Vähentämällä tiivisteveden kulutusta saadaan pidennettyä korjausten välistä aikaa, joka taas tarkoittaa pienempiä ylläpitokustannuksia, pidempää laitteiden käyttöaika ja parempaa järjestelmän suorituskykyä. (Sorvoja 2012)

Stora Enson sellutehtaalla Oulussa tiivistimien vikahistoriaan liittyi vahvasti tiivistevedestä johtuvat ongelmat. SAP-järjestelmästä oli havaittavissa, että lähes jokainen vika- ja korjausilmoitus koski virtausmittarin tukkeutumista, kunnostamista tai uusimista. Perinteiset virtausmittarit vaativat jatkuvaa kunnonvalvontaa ja huoltamista. Tehtaalla käytössä olevat virtaamatonta tiivisteveettä hyödyntävät laitteistot eivät ole vaatineet asennuksensa jälkeen minkäänlaista huolenpitoa, joten on selvästi nähtävissä positiivisia vaikutuksia, kun tiivisteveden kulutusta on vähennetty tiivistimillä.

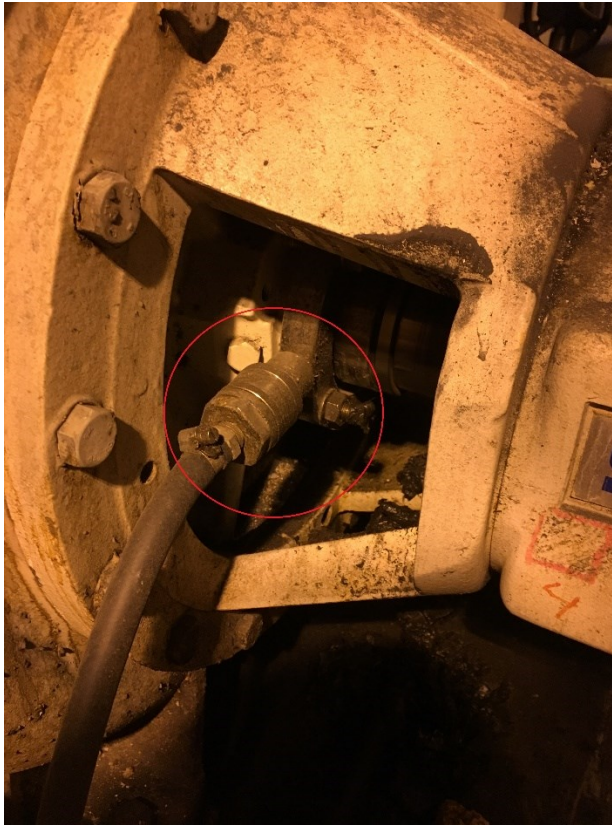
Tiivisteveden käytön vähentäminen auttaa myös täyttämään ympäristöstandardit. Useat hallintoelimet ovat tiukempia liiallisen veden käytön suhteen ja painostavat vähentämään puhtaan- ja jäteveden kokonaiskulutusta. Nykyisillä tiivistetekniikoilla tiivisteveden käyttäminen järkevästi on helppoa. Sijoittamalla järjestelmiin ja noudattamalla hyviä

käytäntöjä tiivisteveden käytön suhteen voi saavuttaa mittavia taloudellisia-, toiminnallisia- ja ympäristöhyötyjä. (Sorvoja 2012)

6.7 Kehitysehdotuksia tiivistämisen optimoimiseksi

Tehtaalla suoritettuun käyntiin ja teoreettisen viitekehyksen tarkasteluun perustuen voidaan todeta seuraavat kehitysehdotukset:

1. Vanhojen tai puutteellisesti toimivien virtausmittareiden korvaaminen läpivirtaamattomilla tiivistevesijärjestelmillä olisi taloudellisesti kannattavaa. Virtaamattoman tiivisteveden hyödyntäminen vaatii oikeanlaisen 2-toimisen liukurengastiivisteen, joten muutos tiivisteveden käyttöön on järkevää tehdä, mikäli se on mahdollista.
2. Yksi mahdollisuus tiivisteveden kulutuksen vähentämiseen olisi ottaa käyttöön lämpötilan noususta aktivoituvia ”venttiilejä” (kuva 11). Muistimetallijousella toimiva venttiili antaa tiivisteveden virrata tiivistimen läpi ainoastaan silloin, kun tiivisteveden lämpötila nousee tiettyyn pisteeseen. Sellutehtaalla on käytössä yksi tällainen venttiili ja kokemuksen mukaan se on toiminut moitteettomasti useita vuosia. Näin ollen on saavutettu säästöjä niin tiivisteveden kulutuksessa kuin kunnossapidon kustannuksissa. Tällainen ratkaisu on myös mahdollinen ainoastaan 2-toimisille tiivisteille, joiden ominaisuuksiin kuuluu voiteltu virtaamattomalla vedellä.



Kuva 11. Muistimetallijousella toimiva lämpötilasta aktivoituva ”venttiili”.

3. Tehtaalla käytössä olevat tiivisteet ovat hyvin erilaisia, joten niitä on kokonaisuutena hankala hallita. Mahdollisuuksien mukaan tiivistekantaa voisi yhtenäistää ja pyrkiä korvaamaan aina vaihdettava 2-toiminen tiivistin sellaisella tiivistimellä, joka pystyy hyödyntämään läpivirtaamatonta tiivisteveettä. Lähes jokaisessa tiivistettävässä kohteessa sellutehtaalla olisi mahdollista hyödyntää läpivirtaamatonta tiivisteveettä, jos tiivistin on siihen soveltuva.

7 YHTEENVETO

Prosessiteollisuudessa esiintyvät tiivistystarpeet ovat monipuolisia, mutta pääasiassa tiivistäminen keskittyy pumppujen pesän ja akselien välin tiivistämiseen. Akselitiivistykseen yleisimmin käytettyjä tiivistimiä prosessiteollisuudessa ovat punostiivistin, mekaaninen ja dynaaminen tiivistin. Tiivistystapahtumaa voidaan tehostaa käyttämällä sulkuainetta, joka jäähdyttää ja voitelee tiivistintä. Tiivisteiden vaurioituminen yleensä johtuu kuivakäynnistä, mikä syntyy helposti, kun sulkuaineen syöttö katkeaa. Sulkuaineena käytetään yleensä puhdasta vettä.

Punostiivistimellä tiivistys saadaan aikaan puristamalla akselin ympärillä olevia tiivisterenkaita tiivistepevän pohjaa vasten. Punostiivistimellä ei saavuteta täysin tiivistävää vaikutusta, koska sen toimintaan olennaisesti kuuluu jatkuva vuotovirtaus. Mekaaninen tiivistin toimii kahden toisiaan vasten painautuneen liukupinnan avulla. Toinen rengas pyörii akselin mukana ja toinen pysyy paikallaan kiinnitettynä tiivistimen runkoon. Liukupintojen toiminta edellyttää niiden välissä pysyvän nestekalvon. Liukurengastiivistiä voidaan rakenteensa mukaan kutsua 1-toimiseksi tai 2-toimiseksi, sen mukaan montako liukupintaparia tiivistimessä on. Sekä punos- että liukurengastiivistimen kanssa voidaan käyttää sulkuainetta. Dynaaminen tiivistin toimii kuten keskipakopumppu. Tiivisteiden akselille on sijoitettu juoksupyörä, joka akselin pyöriessä pumppaa tiivistetilan tyhjäksi. Pumpun pysähtyessä tiivistyksen saa aikaan seisontatiiviste, joka painautuu pumpattavan nesteen vaikutuksesta vastarengasta vasten.

Sulkuainetta voidaan käyttää monella tavalla, kuten paineettomasti, paineellisesti, virtaavasti tai virtaamattomasti. Sulkuaineena voidaan käyttää myös paineistettua kaasua. Tiivisteveden kulutukseen vaikuttaa olennaisesti veden laatu, koska heikkolaatuinen vesi pakottaa käyttäjän lisäämään sen virtausnopeutta, jotta laitteisto ei tukkeudu. Tiivisteveden säätöä ja valvontaa suoritetaan erilaisilla keinoilla. Virtausmittareilla voidaan säätää virtausta ja painetta, mutta ne edellyttävät jatkuvasti virtaavaa tiivisteveettä. On olemassa myös älykkäämpiä järjestelmiä, jotka käyttävät vettä ainoastaan tarvittaessa. Suljetut tiivistevesijärjestelmät ovat laitekohtaisia, joissa sama sulkuaine kiertyy toistuvasti. Niihin voidaan lisätä sulkuaineen jäähdytys tai lämmitys.

Tiivisteveden kulutuksen vähentämisellä saavutetaan mittavia hyötyjä niin taloudellisesti, kuin toiminnallisestikin. Tiivistämisen kustannuksia laskettaessa kävi

ilmi, että on kannattavaa siirtyä virtaamattoman tiivisteveden käyttöön, mikäli se on mahdollista. Kustannuksien vähenemisen myötä vähenee myös kunnossapitotarve. SAP-järjestelmästä kävi ilmi, että lähes jokainen vika- ja korjausilmoitus koskee tiivisteiden virtausmittarin tukkeutumista tai huoltoa. Tiivisteveden kulutuksen vähentäminen on myös osaltaan ympäristöystävällinen teko.

Tiivistämisen optimoimiseksi heräsi työn teoriaosan ja tehtaalla tehtyjen havaintojen perusteella seuraavat asiat. Vanhat ja puutteellisesti toimivat virtausmittarit kannattaa vaihtaa läpivirtaamatonta tiivistevedettä hyödyntäviin järjestelmiin, mikäli se on mahdollista. Tiivisteveden kulutusta voitaisiin vähentää ottamalla käyttöön lämpötilasta aktivoituvia muistimetallilla toimivia venttiilejä. Yksi venttiili on ollut käytössä vuosia, eikä se ole aiheuttanut minkäänlaista huoltotarvetta kunnossapitohenkilöstön mukaan. Kolmas vaihtoehto on yhtenäistää tehtaan monipuolista tiivistekantaa helpommin hallittavaan muotoon ja pyrkiä tiivisteiden vaihdon yhteydessä korvaamaan viallinen tiivistin 2-toimisella liukurengastiivistimellä, joka ei tarvitse toimiakseen virtaavaa tiivistevedettä.

LÄHDELUETTELO

Airila, M., 1985, Tiivistimet. Teoksessa: Airila, M. (toim.) Koneenosien suunnittelu 4 erityisalueet. Porvoo: WSOY, s. 166-236 ISBN 951-0-13223-3

Airila, M., 1987, Tiivistimet. Teoksessa: Airila, M. (toim.) Koneenosat. Porvoo: WSOY, s. 310-341 ISBN 951-0-14338-3

Efora Oy, 2019. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.efora.fi/> [viitattu 3.10.2019]

Flitney, R., 2007, Seals and Sealing Handbook. Fifth Edition. UK: Elsevier Science, 632 s. ISBN 1-85617-461-1

Kivioja, S., 2009, Konetekniikka. 7.painos. Helsinki: Hakapaino Oy, 346 s. ISBN 978-951-672-364-1

KnowPap - Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisjärjestelmä, 2019 [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun yliopisto. [viitattu 12.9.2019]

Kytola Instruments Oy, 2019, Tiivistevesimittari SLM, Esite [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.kytola.com/images/FlowMeters/SLMSealWaterFlowMeters/ModelSML/fi-modelslm.pdf> [viitattu 19.9.2019]

Mackay, R., 2004, The Practical Pumping Handbook. UK: Elsevier Ltd, 281 s. ISBN 1856174107

Mayer, E., 1969, MECHANICAL SEALS. Third Edition. London Iliffe books Ltd, 206 s.

Miettinen, J. & Airila, M., 1995, Erityisalueita/Tiivistimet. Teoksessa: Airila, M. (toim.) Koneenosien suunnittelu. Juva: WSOY, s. 636-668 ISBN 951-0-201-72-3

Miettinen, J., 2014, Erytyisalueita/Tiivistimet. Teoksessa: Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J. ja Salonen, P. (toim.) Koneenosien suunnittelu. 6.Painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy, s. 405-420 ISBN 978-952-63-0798-5

Nesbitt, B., 2006, Handbook of Pumps and Pumping. First edition. Oxford: Elsevier Science, 470 s. ISBN 9781856174763

Sorvoja, J., 2012, Seal Water Use [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.pumpsandsystems.com/seals/october-2012-seal-water-use> [viitattu 24.9.2019]

Tiivistetekniikka Oy, 2019, NF-GO™ Supply System, esite [verkkodokumentti]
Saatavissa: [file:///C:/Users/OMISTAJA/Downloads/NF-GO_SUPPLY-SYSTEM_fin-ID-72611-ID-72759%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/OMISTAJA/Downloads/NF-GO_SUPPLY-SYSTEM_fin-ID-72611-ID-72759%20(4).pdf) [viitattu 25.9.2019]

Vanhala, J., 2001, Dynamic Seal for Ahlstar Pumps [verkkodokumentti]. Sulzer technical review 1/2001. Saatavissa: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/pumps/single-stage-pumps/technical-articles/2001_01_26_vanhala_e.ashx?la=en [viitattu 15.9.2019]