



**KESKIPAKOPUMPPUJEN VIKAANTUMINEN, LUOTETTAVUUS JA
KUNNOSSAPITO**

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

Sustainable production in mechanical engineering, Master's thesis

2022

Jesse Rayo

Tarkastajat: TkT, Harri Eskelinen

TkT, Kimmo Kerkkänen

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Jesse Rayo

Failure, reliability and maintenance of centrifugal pumps

Master's thesis

2022

93 pages, 28 figures, 9 tables and appendices 8

Examiners: D.Sc. Harri Eskelinen and D.Sc. Kimmo Kerkkänen

Keywords: Centrifugal pump, Reliability, Maintenance

The failure of centrifugal pumps causes major issues to a facility from a maintenance and reliability viewpoint, therefore predicting and eliminating faults is crucial. To assess reliability tools such as failure modes and effects analysis, maintenance history and personnel expertise are used, consequently these tools are used to create procedures to improve reliability. These procedures are for instance preventative maintenance plans and actions as well as the implementation of tools for machine condition monitoring. Condition monitoring for centrifugal pumps is often carried out in the form of vibration analysis, in addition to oil analysis and following process data. Despite current actions failures occur, which is why the root causes are analysed in this research.

The literature review focuses on the structure, common components, and the working principle of a centrifugal pump, moreover, examines common failure modes, their occurrence and identification. The review delves into different machine condition monitoring techniques, their uses and the variables measured. It presents methods of preventative maintenance and standards used in the oil and gas industry.

According to research the most common modes of failure for centrifugal pumps are user-oriented errors in operating and designing and various leaks. Developing reliability and maintenance procedures was difficult due to defective maintenance job reports yet means to improve these aspects were found. Improvements needed to be done within designing, operating and preventative maintenance plans.

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Konetekniikka

Jesse Rayo

Keskipakopumppujen vikaantuminen, luotettavuus ja kunnossapito

Pro gradu -tutkielma

93 sivua, 28 kuvaa, 9 taulukkoa ja 8 liitettä

Tarkastajat: TkT Harri Eskelinen ja TkT Kimmo Kerkkänen

Avainsanat: Keskipakopumppu, luotettavuus, kunnossapito

Keskipakopumppujen vikaantuminen aiheuttaa kunnossapidon ja luotettavuuden näkökulmasta suuria ongelmia tuotantolaitokselle, jonka vuoksi niiden ennustaminen ja ennaltaehkäisy on tärkeää. Luotettavuuden arviointiin käytetään työkaluja, kuten kunnossapitohistoriaa, vika- ja vaikutusanalyysia, sekä henkilökunnan ammattitaitoa. Näitä vuorossaan käytetään luomaan toimenpiteitä, jotka parantavat luotettavuutta. Kunnonvalvontaa keskipakopumpuille suoritetaan värähtelymittauksina, sekä hyödyntämällä prosessidataa ja öljyanalyysia. Toimista huolimatta vikaantumisia ilmenee paljon, jonka vuoksi niiden juurisyihin perehdytään tutkimuksessa.

Kirjallisuuskatsauksessa paneudutaan keskipakopumpun rakenteeseen, komponentteihin ja toimintaperiaatteeseen. Tutustutaan myös yleisimpiin vikaantumismuotoihin ja niiden ilmaantumiseen, sekä todentamiseen. Teoriassa katselmoidaan kunnonvalvontamenetelmiä, niiden käyttöä ja suureita, joita mitataan. Esitellään myös ennakkohuoltomenetelmiä ja öljyteollisuudessa käytettäviä standardeja.

Tutkimuksen perusteella yleisimmät vikaantumismuodot olivat käyttäjähajaiset virheet operoinnissa, tai suunnittelussa ja erilaiset vuodot. Luotettavuuden ja kunnossapitotoimien kehittämistä hankaloitti kunnossapitotöiden puutteelliset raportit, mutta kehitysehdotuksia silti löydettiin. Kehityskohteita oli suunnittelussa, operoinnissa ja ennakkohuoltojen laatimisessa.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Nestettä mahdollisuudesta suoritta diplomityö, sekä antaa erityisen kiitoksen Jouni Paakkoselle ja Mika Raassinalle työn ohjauksesta, sekä Jesse Hongolle aiheen keksimisestä ja suuresta avusta sen eteenpäin viemisessä. Haluan myös kiittää kaikkia henkilöitä, joita haastattelin työhön liittyen, sekä heitä, jotka auttoivat omalla ammattitaidollaan työn suorittamisessa. Ilman kaikkia edellä mainittuja työtä ei olisi saatu päätökseen, joten iso kiitos siitä.

Kiitos LUT-yliopisto, Lappeenranta, skinnarila, kaikki opiskelutoverit ja opettajat viimeisestä viidestä opiskeluvuodesta. Koen saaneeni monipuolisen ja pätevän koulutuksen, jonka avulla lähden intoa täynnä työelämään ja kaikkiin sen tuomiin mahdollisuuksiin.

7.4.2022

Jesse Rayo



LYHENNELUETTELO

API	American Petroleum Institute
BB	Between Bearing
BEP	Best Efficiency Point
CCW	Counterclockwise
CW	Clockwise
DAO	Deasphalted oil
FCC	Flying catalytic converting
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
IOT	Internet of things
ISO	International Organization for Standardization
M+	OmaisuuDENhallinta- ja kunnossapitojärjestelmä
MKP	Magneettikytkinpumppu
NEXBTL	Next generation Biomass to Liquid
OH	Overhung
ODR	Operator Driven Reliability
Poksi	Mekaaninen tiiviste
SDA	Solvent Deasphalting
TA	Turnaround
TL	Tuotantolinja
TLV	Tuontantolinjavalmistus
Fluidi	Neste tai kaasu
VS	Vertically Suspended
VK	Vetykrakkaus
VVA	Vika- ja vaikutusanalyysi

Sisällysluettelo

Abstract

Tiivistelmä

Alkusanat

Lyhenneluettelo

1. Johdanto.....	10
1.1 Tutkimusongelma.....	11
1.2 Tutkimuskysymykset.....	12
1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaus.....	13
1.4 Tutkimusmenetelmien kuvaus.....	14
2. Kirjallisuuskatsaus.....	14
2.1 Kunnonvalvontamenetelmiä keskipakopumpuille.....	15
2.2 Ennakkohuoltomenetelmiä keskipakopumpuille.....	18
2.3 Öljyteollisuuden standardeja.....	19
2.4 Keskipakopumpun toimintaperiaate.....	21
2.5 Erilaiset keskipakopumput.....	25
2.6 Keskipakopumpun rakenne.....	28
2.7 Yleiset vikaantumismuodot.....	29
2.7.1 Hydrauliset viat.....	29
2.7.2 Mekaaniset viat.....	32
2.7.3 Muut viat.....	34
3. Luotettavuusmenetelmät.....	35
3.1 Luotettavuus.....	35
3.1.1 Juurisyyanalyysi.....	36
3.1.2 Vika- ja vaikutusanalyysi.....	37
3.1.3 Vikapuuanalyysi.....	38
3.1.4 Luotettavuuskeskeinen kunnossapito.....	39
4. Tilastollinen- ja case-tutkimus.....	41
4.1 Tutkimuksen suorittaminen.....	41
4.1.1 Case-tutkimuksen suorittaminen.....	42
4.2 Kunnonvalvontamenetelmät Porvoon jalostamolla.....	42

4.3 Ennakkohuollot Porvoon jalostamolla	45
4.4 Prosessiyksiköiden tutkimus	45
4.4 Case-merivesipumput	51
4.4.1 Kunnossapitokatsaus.....	53
4.4.2 Luotettavuuskatsaus	54
5. Tulosten analysointi	56
5.1 Tuotantolinja 4, asfalteenin erotus.....	56
5.2 Tuotantolinja 3, uusiutuvat polttoaineet.....	58
5.3 Tuotantolinja 2, leijukatalyyttinen krakkaus.....	60
5.4 Tuotantolinja 1, vetykrakkaus.....	61
5.5 Tuotantolinjojen yhteenveto	63
5.6 Case-merivesipumput	71
5.6.1 Ehdotetut toimenpiteet GA-8604-pumpulle.....	75
6. Pohdinta ja yhteenveto.....	80
6.1 Vertailu muihin tutkimuksiin.....	80
6.2 Tutkimuksen objektiivisuus.....	82
6.3 Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti	82
6.4 Keskeiset johtopäätökset	83
6.5 Tulosten hyödynnettävyys	86
6.6 Jatkotutkimusaiheet.....	87
6.7 Tutkimuskysymysten yhteenveto	88
Lähdeluettelo	90

Liitteet

Liite 1. Ennakkohuollon haastattelukysymykset

Liite 2. Konetarkastuksen haastattelukysymykset

Liite 3. Voiteluosaston haastattelukysymykset

Liite 4. FTA-poksivuodot

Liite 5. FTA-muut vikaantumismuodot

Liite 6. RCM-toimintamalli

Liite 7. Kriittisyysluokittelun kriteeritaulukko

Liite 8. Pumppukäyrä GA-8601---GA-8603

1. Johdanto

Neste Oyj on suomalainen öljyteollisuus alan yritys, joka tuottaa raakaöljystä jalostettavia fossiilisia polttoaineita, sekä uusiutuvista lähteistä valmistettavaa biodieseliä ja lentopetrolia. Nesteellä on Suomen lisäksi toimintaa Euroopassa ja Aasiassa, kuten esimerkiksi uusiutuviin polttoaineisiin keskittyvät jalostamot Rotterdamissa ja Singaporessa. Näiden lisäksi Nesteellä on esikäsittelylaitos Alankomaissa, jossa käsitellään tarvittavia raaka-aineita uusiutuvien polttoaineiden valmistukseen, sekä osaomistus öljytehtaasta Lähi-Idässä. (Neste(b).)

Uusiutuvissa polttoaineissa Neste on maailman suurin tuottaja ja osa tästä tuotetaan Suomessa Porvoon Kilpilahden jalostamolla NEXBTL-tekniikan avulla. Porvoon jalostamolla on neljä tuotantolinjaa, jotka pitävät sisällään yli 40 tuotantoyksikköä, joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on arviolta 12,5 miljoonaa tonnia vuodessa. Porvoon jalostamon tärkeimpiä tuotteita ovat liikennekäyttöiset polttoaineet (benssiini ja diesel), laivojen polttoaine ja voiteluöljy. Tuotteita varastoidaan jalostamon alueella säiliöissä ja maan alla kalliosäiliöissä, joiden yhteenlaskettu tilavuus on noin 8 miljoonaa kuutiometriä, eli noin 8 miljardia litraa. Käyttövalmiita tuotteita kuljetetaan Kilpilahdesta säiliöautoilla, sekä jalostamon omasta satamasta laivoilla. Porvoossa työskentelee vuoden ympäri noin 1 000 henkilöä ja jalostamo on hyvin moderni, sillä se on suurilta osin automatisoitu. Porvoon jalostamo kuuluu Euroopan tehokkaimpiin ja monipuolisimpiin jalostamoihin. (Neste(a).)



Kuva 1. Porvoon jalostamo (Neste(a)).

Jalostamon prosessien ylläpitämiseksi tarvitaan paljon erilaisia pyöriä laitteita, kuten pumppuja, puhaltimia ja kompressoreja. Pumppuja käytetään fluidien tai raaka-aineiden siirtämiseksi prosessissa eteenpäin, yleensä putkistoja pitkin. Kuten Porvoon jalostamon tuotantokapasiteetista voi päätellä, prosessit ovat kokoluokaltaan suuria, joten ne tarvitsevat paljon pumppuja fluidien liikuttamiseksi. Pumppuja on paljon erilaisia, joista suurin osa on keskipakopumppuja. Näiden pumppujen kunnossapito, valvonta ja huoltaminen on erittäin tärkeä osa jalostamon päivittäistä toimintaa. Edellä mainittuihin seikkoihin panostetaan, mutta olosuhteiden ja puutteellisten toimintatapojen vuoksi odottamattomia pumppurikkoja syntyy usein. Pumppujen ylläpitäminen on merkittävä kustannuserä kunnossapitoyksikölle ja odottamattomat pumppurikot tuovat huomattavasti lisäkustannuksia. Pahimmassa tapauksessa pumppurikko saattaa aiheuttaa kokonaisen yksikön alasajon, joka puolestaan vaikuttaa tuotantolinjalla muihin prosesseihin.

1.1 Tutkimusongelma

Keskipakopumput ovat maailmanlaajuisesti yleisin pumpputyyppejä kaikilla teollisuuden aloilla, niiden laajan soveltuvuuden vuoksi. Pumppujen luotettavuus paranee jatkuvasti

teknologian, kunnonvalvonnan ja ennakkohuoltojen kehittyessä, mutta silti niiden keskuudessa esiintyy useita vikaantuvuuksia. Pumppujen vikaantuminen aiheuttaa fluidien virtauksen alenemista putkistossa, joka puolestaan hidastaa tuotantoa, sekä fluidin päämäärää prosessissa. Usein prosessit ovat kytketty toisiinsa ja ne vaativat kaikkien vallitsevien prosessien virheetöntä toimintaa, jotta tuotantoa voidaan ajaa optimaalisesti. Yhden pumpun vikaantuminen saattaa aiheuttaa suuria ongelmia edeltävissä ja seuraavissa prosesseissa, joka puolestaan vahingoittaa tuotantoa. Tämän vuoksi pumppujen vikaantumisten tunnistaminen ajoissa, sekä hajonneiden pumppujen vaurioiden tutkiminen on tärkeää. (McKee & Forbes & Mazhar & Entwistle & Howard 2011, s. 1.)

Neste Porvoon jalostamolla on käytössä tuhansia erilaisia pumppuja, mitä käytetään prosesseissa liikuttamaan fluideja, joista selvästi suurin kategoria on keskipakopumput. Nämä pumput ovat siis kriittisessä roolissa jalostamon tuotannon ylläpitämisen kannalta. Pumput vikaantuvat jalostamo-olosuhteissa usein ja tämän vuoksi niiden kunnossapitoon, ennakkohuoltoon ja kunnonvalvontaan tulisi panostaa paljon. Pumppujen alkavia vikoja ennaltaehkäistään esimerkiksi suorittamalla kunnonvalvontaa tai ennakkohuoltoja. Pumppuja kuitenkin vikaantuu paljon odottamattomasti esimerkiksi, prosessi- ja operointivirheiden vuoksi, sekä mekaanisten komponenttien vaurioitumisten aiheuttamana. Varsinkin huoltoseisokkien aikana suoritettavat laajat prosessien ylös- ja alasajot aiheuttavat suuren määrän pumppurikkoja. Tällaisiin ongelmiin ei usein keskitytä tarpeeksi, vaan pumput korjataan, vika raportoidaan kunnossapitojärjestelmään ja unohdetaan tarkempi tutkinta juurisyistä. Raportointi kunnossapitojärjestelmään tehdään osittain puutteellisesti, jolloin historiaa tutkiessa saattaa merkittäviä seikkoja jäädä huomaamatta. Osa näistä ongelmista olisi kuitenkin vältettävissä, jos juurisyitä tutkittaisiin tarpeeksi ja ongelmiin löydettäisiin ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä.

1.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksen toteutus on rakennettu viiden tutkimuskysymyksen pohjalle, jolloin tulokset antavat vastauksen näihin kysymyksiin. Tutkimuskysymykset on lueteltu alla:

- Miksi keskipakopumput vikaantuvat ja mitkä ovat yleisimmät syyt siihen viimeisen 5–10 vuoden ajalta?
- Miten keskipakopumppujen vikaantumista voitaisiin vähentää?
- Miksi nykyisessä kunnossapitojärjestelmässä ja sen käytössä on puutteita? Mitä ne ovat? Mikä vaikutus niillä on?
- Mitä trendejä ja vikaantumistaajuksia keskipakopumpuilla on? Voidaanko vikaantumista ennustaa ja jos voidaan, niin miten?
- Miten paljon kustannusmielessä voidaan säästää tuntemalla laitteiden vikaantumisia tarkemmin?

1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaus

Koska odottamattomien vikaantumisten tutkiminen ja syiden etsiminen on osittain puutteellista, pyritään tutkimuksella tunnistamaan näitä syitä, sekä luomaan ennaltaehkäiseviä toimenpiteitä. Tutkitaan keskipakopumppujen vikaantumisten historiaa nykyisen kunnossapitojärjestelmän (M+) puitteissa, eli maksimissaan viimeisen 10 vuoden ajalta. Pumppujen kunnossapitohistoriaa tutkitaan myös Nesteen mekaanisten tiivisteiden ylläpitävältä ja toimittavalta taholta (John Crane). Case-tutkimuksessa tutkitaan jalostamon merivesipumppujen toimintaa kunnossapidon ja luotettavuuden näkökulmasta. Pyritään selvittämään kunnossapitohistorian avulla ennaltaehkäisevät toimenpiteet ja mahdolliset puutteet nykyisessä toimintamallissa. Case-tutkimuksen tavoitteena on luoda kokonaisuus kunnossapitoon liittyvistä seikoista merivesipumppujen ylläpidosta vastaavalle henkilökunnalle, sekä tuoda esiin luotettavuuskatsauksen avulla tämänhetkinen tilanne.

Dataa kerätään yllä mainituista järjestelmistä ja sitä hyödynnetään pumppujen luotettavuuden arvioinnissa, esimerkiksi käyttäen vika- ja vaikutusanalyysia, vikapuuanalyysi, sekä ennustamalla trendejä ja vikaantumistaajuuksia. Dataa kerätessä etsitään myös puutteita ja mahdollisia ongelmakohtia vikojen raportoinnissa. Luotettavuuden arvioinnilla pyritään löytämään konkreettisia toimenpiteitä, joilla vikaantumisia voidaan tulevaisuudessa estää. Luotettavuuden arvioinnissa pyritään myös

samalla tuomaan esiin mahdolliset kustannussäästöt, jota voidaan saavuttaa vikaantumisten tehokkaalla ennakkoinnilla.

Diplomityö toteutetaan Neste Oyj:n toimeksiantona. Tutkimuksessa perehdytään Neste Porvoon jalostamon prosesseissa käytettäviin keskipakopumppuihin viimeisen 5–10 vuoden ajalta. Tutkimus rajaa pois jalostamon satamassa käytettävät pumput, sekä rannikkoterminaalien pumput. Keskipakopumppu on laaja käsite, joten tutkimuksessa keskitytään yleisesti keskipakopumppuihin, eikä tutkimusta luokitella alakategorioiden perusteella.

1.4 Tutkimusmenetelmien kuvaus

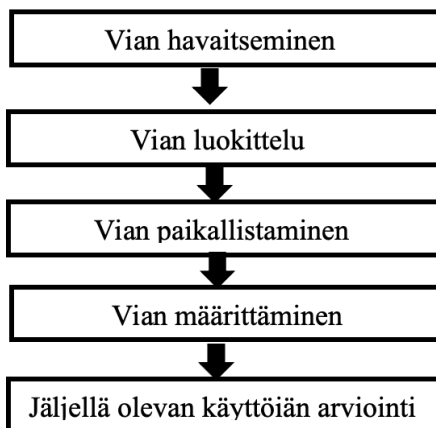
Kirjallisuuskatsauksen avulla haetaan olemassa olevaa tietoa keskipakopumpuista, niiden rakenteesta, toiminnasta, vikaantumisesta ja käytettävyydestä. Kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan myös kunnossapidon osa-alueita, kuten ennakkohuoltoa, kunnonvalvontaa ja luotettavuusmenetelmiä. Luotettavuusmenetelmät on valittu niiden soveltuvuuden pohjalta keskipakopumppujen vikaantumisen tutkimiseen. Luotettavuusmenetelmien avulla vikaantuminen pilkotaan juurisyihin asti, jonka avulla luodaan syy-seuraussuhteet vikaantumisten ja niiden juurisyiden välille. Juurisyiden tutkimisella ja syy-seuraussuhteen löytämisen avulla luodaan toimintatapoja, joilla pyritään estämään pumppujen vikaantumista.

2. Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaus kattaa teorian, jossa esitellään tarkemmin keskipakopumpun rakennetta, käytettävyyttä ja yleisiä vikakohteita. Osiossa tutustutaan myös prosesseihin, tuotteisiin ja olosuhteisiin, jossa keskipakopumppuja Neste Porvoon jalostamolla käytetään.

2.1 Kunnonvalvontamenetelmiä keskipakopumpuille

Kunnonvalvonnan tavoitteena on tutkia pumpun tilaa tiettyjen mitattavien suureiden avulla. Tehokkaalla kunnonvalvonnalla voidaan hyvissä ajoin havaita pumpussa alkavia vikoja ja ennakkohuoltojen avulla eliminoida niitä, ennen komponenttien hajoamista. Kunnonvalvonnalla on tärkeä rooli tuotantolaitoksen prosessien ylläpitämisessä, sillä sen avulla voidaan ennustaa ja eliminoida alkavia vikaantumisia prosessilaitteissa. Eliminoimalla alkavia vikoja, voidaan estää yllättävät kunnossapitotoimenpiteet, prosessiyksiköiden pysäyttäminen, sekä suunnitella tehokkaammat ennakkohuollot. Menetelmiä kunnonvalvonnalle on monia, mutta kaikki noudattavat pääsääntöisesti samoja perusaskeleita. Kuvassa 2 on esitetty nämä askeleet.



Kuva 2. Kunnonvalvontaprosessin askeleet (mukaillen, Marwala 2012, s.6).

Kunnonvalvontaprosessi alkaa vian havaitsemisella, joka voidaan havaita esimerkiksi liiallisena värähtelynä, prosessiarvojen muuttumisena tai väriaineella nähtävänä halkeamana. Havaitsemisen jälkeen vika luokitellaan. Luokittelussa käytetään erilaisia vikatyyppejä, joiden perusteella vika luokitellaan esimerkiksi vuodoksi. Luokittelun jälkeen vika paikallistetaan, eli etsitään vian aiheuttava komponentti. Vuototilanteessa kyseinen komponentti voi olla esimerkiksi pumpun mekaaninen tiiviste. Paikallistamisen jälkeen vika määritellään, eli todetaan vian vakavuusaste, eli esimerkin mukaan onko vuoto pieni, kohtalainen vai suuri. Vakavuusasteen perusteella pohditaan, ovatko huoltotoimenpiteet kiireellisiä. Viimeinen askel on jäljellä olevan käyttöiän arviointi, eli todetaan, onko

pumpulla vielä käyttöikä esimerkiksi seuraavaan huoltoon asti, vai tuleeko pumpun huoltoa ennenaikaistaa. (Marwala 2012, S. 5–7.)

Kunnonvalvontamenetelmistä monipuolisin on värähtelymittaus. Värähtelymittaus perustuu joko kiinteisiin- tai kannettaviin antureihin, joilla mitataan laitteen eri komponenttien värähtelyä. Kiinteät anturit on asennettu kiinni laitteen eri kohtiin, mittaamaan eri komponenttien värähtelyä ja niitä voidaan seurata etänä, kun taas kannettava laite tulee konetarkastajan itse asettaa haluamaansa kohtaan mitatakseen värähtelyä. Erilaiset vikatyypit aiheuttavat erilaisia värähtelyjä, joten analysoimalla värähtelyn kuvaajaa voidaan määrittää vikatyypin pysäyttämättä tai purkamatta pumppua. Laitteen eri osille on määritetty standardeissa sallitut värähtelyarvot, joten jos huomataan arvojen poikkeavan näistä, voidaan olettaa alkavaa vikaa. (Ahmed & Nandi 2020, S. 7.)

Moottorin virran kulutuksen ja pumpun suorituskyvyn mittausta voidaan myös käyttää pumpun yleisen kunnon määrittämiseen. Virrankulutusta seurataan etänä ohjaamosta, jossa nähdään reaaliajassa moottorin käyttämä virta. Moottorin virrankulutukselle on asetettu jokin viitearvo, johon normaalin ajon aikana tulisi päästä. Kun virrankulutus ylittää tämän arvon, mutta muut prosessiarvot pysyvät samana, moottori ottaa ylivirtaa eli jokin on pielessä. Ylivirralla voi olla syynä esimerkiksi laakerivika, jossa kitkavoimat kasvavat, jolloin pumppu tarvitsee enemmän virtaa päästäkseen samaan tuottoon. Suorituskyvyn mittauksessa pumpun tietyllä käyttöasteella tulisi päästä tiettyyn tuottoon normaalitilanteissa. Kun pumppua ajetaan samalla nopeudella, mutta tuotto laskee, voidaan todeta prosessissa olevan jokin häiriö. Häiriö saattaa olla esimerkiksi kavitaatio, jossa pumpun läpi kulkevan tuotteen määrä laskee kavitaatiosta syntyvien ilmakuplien vuoksi. (Ahmed & Nandi 2020, s. 8–10.)

Pumpuissa öljyä käytetään pyörivien osien kosketuspintojen voiteluun kitkan vähentämiseksi, joten sen toimivuus on erittäin tärkeää. Öljyanalyysilla voidaan määrittää sen kunto mittaamalla vesipitoisuutta ja muita arvoja. Öljyn sekaan saattaa kertyä vettä, joka alentaa öljyn viskositeettia, jolloin öljy menettää voitelukykyänsä. Voitelukyvyn heikkeneminen lisää kitkaa pyörivien osien välillä ja altistaa komponentteja ennenaikaiselle

vahingoittumiselle. Suurin osa laakerivaurioista syntyy öljyn puutteellisen voitelun seurauksena. (Ahmed & Nandi 2020, s. 8.)

Lämpökuvauksessa käytetään infrapunakameraa kuvaamaan pumppua ulkopuolelta. Pumppua kuvaamalla voidaan selvittää pumpun eri komponenttien lämpötilat ja täten arvioida niiden kuntoa. Esimerkiksi öljylle ja sen voitelussa oleville komponenteille on määritetty jokin lämpötilaraja, jonka yläpuolella vaurioita syntyy. Liian korkea lämpötila voi johtua esimerkiksi vuodosta tai öljyn puutteellisesta voitelusta. Puutteellinen voitelu aiheuttaa kitkaa, josta syntyy lämpöenergiaa liikkuviin komponentteihin. Lämpökuvauksessa suurena etuna on se, että kunnonvalvonta voidaan suorittaa pumpun ollessa ajossa ja purkamatta pumppua osiin. Eristeitä tai lämpösuojia saattaa joutua siirtämään onnistuneen lämpökuvauksen saamiseksi. (Ahmed & Nandi 2020, s. 9.)

Visuaalisella tarkastuksella voidaan tutkia pumpun komponenttien pintojen vaurioita joko silmämääräisesti tai korkean resoluution kameroiden avulla. Silmämääräisesti tarkastaessa etsitään selvästi näkyviä vikoja kuten halkeamia, pinnankarheutta ja kulumia. Korkean resoluution kameran avulla pystytään tutkimaan samoja asioita tarkemmin, hyödyntäen tietokonesovelluksia. Nämä sovellukset vertaavat otettua valokuvaa toiseen kuvaan, jossa komponentin pinta on hyväksytyllä tasolla. Visuaalisen tarkastuksen haittapuolena on se, että pumppu tulee purkaa osiin, jotta komponentteja päästään tarkastamaan. (Ahmed & Nandi 2020, s. 9.)

Modernin teollisuuden kunnonvalvonnassa hyödynnetään IOT-sovelluksia (internet of things) eli menetelmää, jossa laitteiden kunnonvalvontaa voidaan suorittaa etäyhteydellä käyttäen värähtelyantureita. Anturit ovat kytkettynä verkkoon ja niiden mittaamaa värähtelydataa voidaan seurata reaaliajassa etänä eli online-valvontana. Etuna manuaalisen värähtelymittaukseen on se, että värähtelydataa voidaan seurata kellon ympäri jatkuvasti, jolloin mekaanisten komponenttien alkava vikaantuminen voidaan havaita aikaisemmin. (Urbani & Petri & Brunelli & Collan 2020, s. 105–107.)

Digital twin (digitaalinen kaksonen) on menetelmä, jossa laitteesta tai komponentista luodaan virtuaalinen kopio, eli digitaalinen kaksonen. Tämä kopio tehdään oikeaa kappaletta vastaavilla dimensiolla, materiaaleilla ja olosuhteilla. Kaksosen avulla voidaan simuloida kappaleen käyttöä sille suunnitelluissa olosuhteissa, jonka avulla voidaan ennustaa ja ennakoida heikkoja kohtia ja mahdollisia vikaantumisia. Kaksosen avulla voidaan esimerkiksi simuloida, kuinka laite tai komponentti käyttäytyy 10 000 käyttötunnin aikana ja sen jälkeen, jonka avulla voidaan parantaa sen luotettavuutta korjaamalla ilmeneviä heikkouksia. (Urbani ym. 2020, s. 107–108.)

2.2 Ennakkohuoltomenetelmiä keskipakopumpuille

Ennakkohuolloilla pyritään ehkäisemään pumpuille tulevaisuudessa syntyviä vikoja vaihtamalla kuluvia ja viallisia osia, ennen niiden vikaantumista. Ennakkohuollot koostuvat huolloista, korjauksista, tarkastuksista, ja parannuksista. Huollot on aina etukäteen suunniteltu esimerkiksi pumpun käyttötuntien mukaan. Huollossa pumpun pysäytys on suunniteltu ja huolto on aikataulutettu niin, että prosessi ei pysähdy ollenkaan tai mahdollisimman lyhyeksi ajaksi. Huollossa on myös yleensä selkeä käsitys mitä pumpulle tulee tehdä huoltotoimenpiteen aikana. (Merkle 2014, s.111.)

Korjauksissa pumppu vikaantuu odottamattomasti, jolloin huoltoa ei ole suunniteltu tai aikataulutettu. Tällaisia tilanteita varten kriittisille pumpuille on usein olemassa varalaitte, joka voidaan päälaitteen vikaantuessa ottaa käyttöön pitämään prosessia yllä. Korjauksissa ei aina ole selkeää käsitystä mitä pumpulle tulee tehdä, sillä vika paikannetaan vasta kun pumppu on avattu ja komponentit tarkastettu. Korjauksen kokonaiskesto on usein huomattavasti pidempi, kuin huollon. (Merkle 2014, s.111.)

Tarkastuksissa ideana on tutkia pumpun kuntoa esimerkiksi tarkkailemalla prosessiarvoja, mittaamalla värähtelyä ja silmämääräisesti tutkia ulkopinnat. Tarkoituksena on saada tietoa pumpun kunnosta ja mahdollisesti tarvittavista korjaustoimenpiteistä. Tarkastuksissa voidaan huomata esimerkiksi pumpun kiinnityksessä halkeama, jonka seurauksena tehdään

parannus. Parannuksien ajatuksena on tunnistaa pumpun heikkoja kohtia ja luoda parempi ratkaisu kyseiselle komponentille, jotta välttyttäisiin enneaikaiselta vikaantumiselta. Parannuksia voi olla esimerkiksi öljyلاadun vaihtaminen tai tiivisteiden materiaalin parantaminen. (Merkle 2014, s.111.)

Valmistaja määrittelee pumpun komponenteille ennakkohuolto-ohjelman, jossa kerrotaan milloin ja miten eri komponentteja tulisi vaihtaa/tarkastaa. Huolto-ohjelman noudattaminen on myös usein ehtona takuun säilymiselle pumpussa. Pieniä ja halpoja pumppuja, kuten esimerkiksi isomman laitteen öljynkierrätyspumppu usein ei huolleta. Uuden pumpun hankintahinta on usein suhteessa niin edullinen, että on kannattavampaa vaihtaa uusi pumppu, kuin korjata vanha.

2.3 Öljyteollisuuden standardeja

Useat öljyteollisuuden toimialan yritykset, kuten öljyjalostamot vaativat käytettäville pumpuille standardien mukaista laatutestausta ja yhteensopivuutta. Standardit määrittelevät pumpuille vaadittavat testaukset, jotka on etukäteen arvioitu ja hyväksytty käytettäväksi öljyteollisuuden alalla. API 610 (American Petroleum Institute) on Amerikasta lähtöisin oleva standardi, jolla luokitellaan keskipakopumput eri kategorioihin niiden kiinnityksen mukaan. API-standardin mukaan valmistetut pumput on suunniteltu ja testattu olosuhteisiin, jossa ne altistuvat korkeille paineille, sekä lämpötiloille (Bachus & Custodio 2003, s. 58–59.)

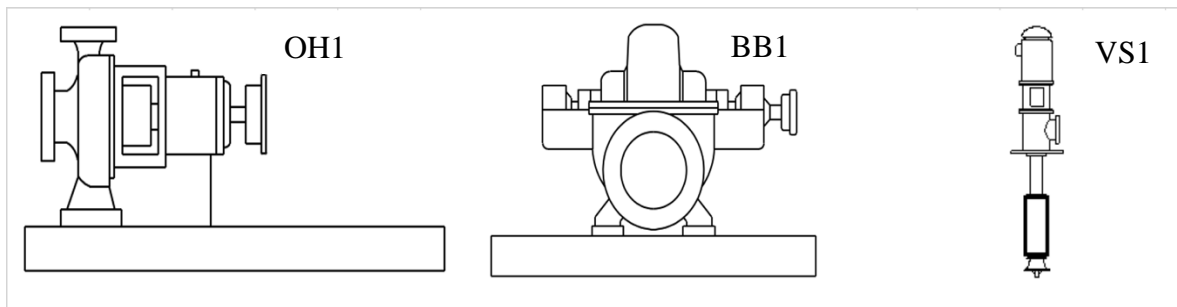
ISO 13709 (International Organization of Standardization) on hyvin samanlainen standardi, kuin API 610. Suurin ero näiden kahden välillä on se, että API-standardit ovat amerikkalaisen instituutin hyväksymiä, kun taas ISO-standardit ovat kansainvälisen organisaation hyväksymiä. Molempia standardeja kuitenkin käytetään öljyteollisuuden alalla ja monet pumppujen valmistajat, kuten Sulzer rinnastavatkin standardit samoiksi. Tämä tarkoittaa, että pumput ovat molempien standardien vaatimuksien mukaisesti

valmistettuja. (API 610 2021 & ISO 13709 pumps 2021.) Neste Porvoon jalostamolla on pääsääntöisesti käytössä API -610 standardi.

API -610 standardi luokittelee keskipakopumput kolmeen eri pääkategoriaan OH (over hung), BB (between bearings) ja VS (vertically suspended), joissa jokaisen kategorian sisällä on omat luokittelunsa. OH-luokalla tarkoitetaan keskipakopumppua, jonka juoksupyörä on kiinnitetty akselin päähän ja roikkuu laakeroinnin yli. OH-luokitus jaetaan kuuteen alakategoriaan kiinnityksen perusteella, kuten esimerkiksi jalkakiinnitys, keskilinjakiinnitys ja pystyrakenteiset. (API 610 2021.) OH-luokan pumput ovat jalostamolla kaikista yleisin pumpputyyppejä.

BB-luokalla tarkoitetaan pumppua, joka käyttää joko yhtä- tai useaa juoksupyörää akselilla ja on molemmista päistä laakeroitu. BB-luokan pumput ovat usein monivaiheisia pumppuja ja huomattavasti isompia kuin OH-luokan pumput. BB-luokan pumput jaetaan myös pienempiin alakategorioihin, joita on kuusi. Esimerkiksi aksiaalisesti-, radiaalisesti jaettu, sekä keskilinja- ja jalkatuettu. (API 610 2021.)

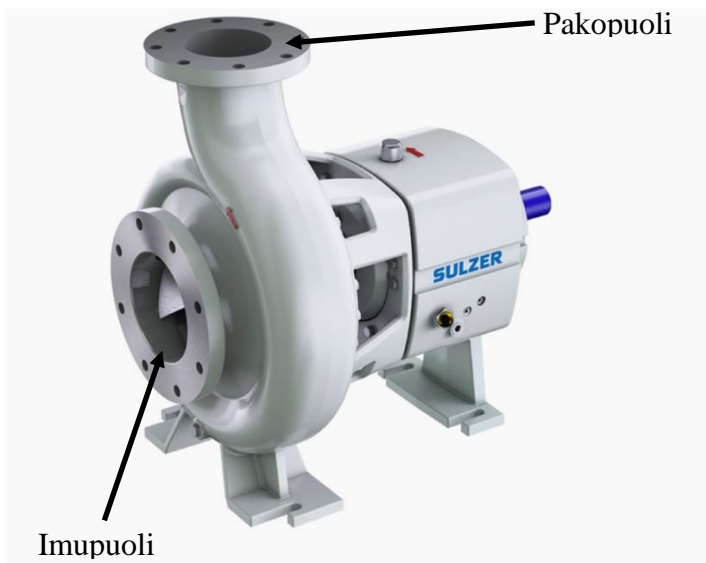
VS-luokalla tarkoitetaan ylhäältä pituussuunnassa ripustettua pumppua, joka upotetaan pumpattavaan fluidiin. Tämän luokan pumpuissa moottoriin on kiinnitetty pitkä akseli, jonka päässä on itse keskipakopumppu. Pumppu on upotettu fluidiin, josta se nostetaan ylös kolonnia pitkin. VS-luokan pumput ovat harvinaisempia ja niitä käytetään esimerkiksi rikkialtaiden tyhjentämiseen ja tuotteen nostamiseen kalliosäiliöstä. VS-luokassa on 7 alakategoriaa, johon kuuluu esimerkiksi yksi- ja kaksi pesäinen pumppu. (API 610 2021.) Kuvassa 3 on esitetty API 610 -standardin mukaiset pääluokat keskipakopumpuille.



Kuva 3. API 610 -pumppuluokat (API 610 2021).

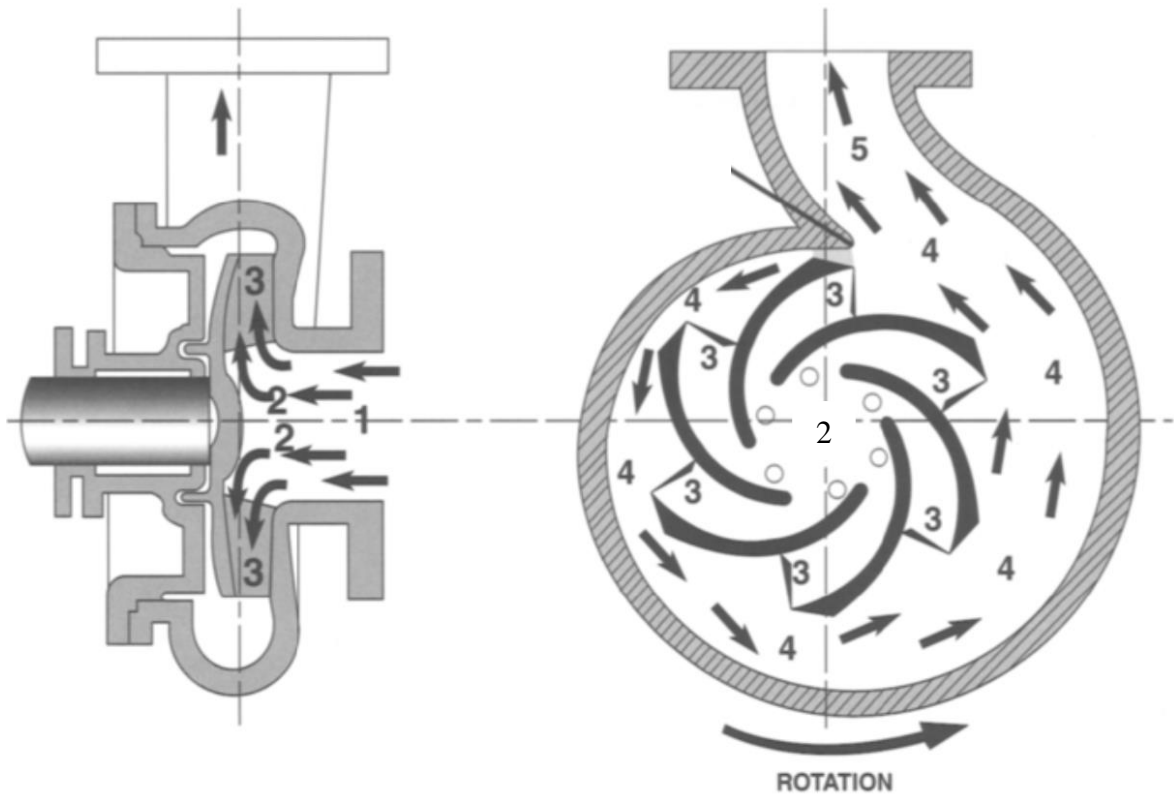
2.4 Keskipakopumpun toimintaperiaate

Keskipakopumppu on laite, joka muuttaa pyörivän juoksupyörän liike-energian pumpattavan fluidin mekaaniseksi energiaksi. Juoksupyörän pyöriminen saa aikaan keskipakoisvoiman, jonka avulla fluidi imetään pumpun imupuolelta juoksupyörälle. Juoksupyörä siirtää liike-energiansa fluidiin, jonka avulla se työnnetään ulos pumpun pakupuolelta. Kun fluidi poistuu pumpun pesästä, tulee sen liike-energiaa olla suurempi kuin prosessissa vallitseva virtausvastus liikkua eteenpäin. Virtausvastus syntyy putkiston seinämien ja fluidin välisestä kitkasta, sekä fyysisistä liikettä rajoittavista laitteista. Liikettä rajoittavia laitteita ovat esimerkiksi venttiilit, lämmönvaihtimet ja putkistoissa syntyvät korkeuserot. Kun liikkuvan fluidin liike-energia pienenee, eli vauhti hidastuu liikettä rajoittavien tekijöiden vuoksi, prosessin paine kasvaa. Paineen muuttuessa prosessissa, muuttuu myös pumpattavan fluidin ominaisuudet, kuten kiehumispiste ja lämpötila. Paineen nousun lisäksi liike-energiaa fluidista muuttuu ääneksi ja värinäksi. Fluidin juoksupyörältä saama liike-energia pienenee, mitä kauemmaksi välimatka pumpusta kasvaa. (Rajendran & Purushothaman 2012, s. 1–6.) Kuvassa 4 nähdään yksivaiheinen keskipakopumppu.



Kuva 4. Yksivaiheinen keskipakopumppu (CPE ANSI process pumps range 2021).

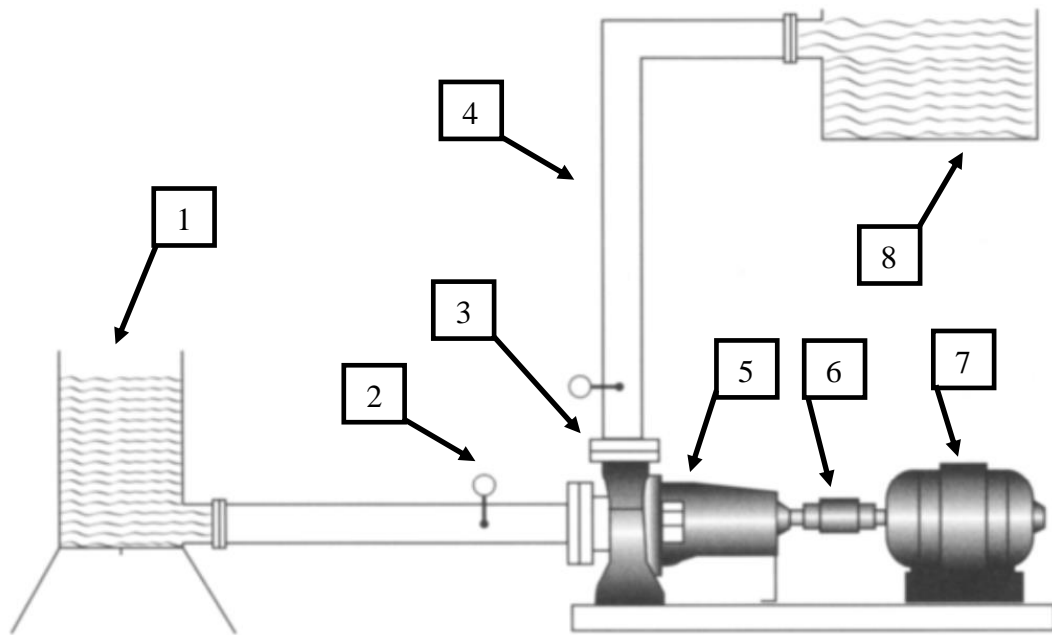
Kuvassa 4 nuolilla on osoitettu vasemmalla alhaalla pumpun imupuoli ja ylhäällä pakopuoli. Juoksupyörän liike aiheuttaa imun, jonka avulla fluidi imetään juoksupyörän ”silmaan”. Pumpattava fluidi liikkuu juoksupyörän siipien mukana kohti pumpun pesän seinämiä, jolloin fluidin nopeus kasvaa räjähdysmäisesti. Äkillinen nopeuden kasvaminen aiheuttaa juoksupyörän silmään matalapaineen alueen, joka on selitettävissä Bernoullin lailla. Tämän fysiikan lain mukaan fluidin nopeuden kasvaessa, sen paine pienenee ja päinvastoin. Kun fluidi irtoaa juoksupyörän siivistä ja osuu pumpun pesän seinämiin, sen nopeus pienenee rajusti. Tämän nopeuden laskemisen johdosta Bernoullin lain mukaan paine kasvaa, eli fluidin liike-energia muuttuu nosteeksi pumpun pakopuolella. Nosteella tarkoitetaan pumpun teoreettista korkeutta, jolle se voi nostaa pumpattavan fluidin kyseisellä pyörimisnopeudella. Kuvassa 5 on esitetty juoksupyörän toiminta. (Bachus & Custodio 2003, s. 54.)



Kuva 5. Juoksupyörän toimintaperiaate (muokattu, Bachus & Custodio 2003, s. 56).

Keskipakopumppu siis lisää virtaukseen painetta muuntelemalla sen nopeutta pesän sisällä. Kuvassa 5 vasemmalla puolella numero 1 kuvastaa pumpun imupuolta, josta fluidi imetään juoksupyörän silmään (2). Silmästä juoksupyörän siivet (3) liikuttavat nestettä kohti pumpun seinämiä samalla kasvattaen vauhtia, kunnes fluidi osuu pumpun pesän seinämiin (4) ja saavuttaa korkean paineen pisteen. Virtaus liikkuu kohti pumpun pakopuolta (5), josta se jatkaa eteenpäin putkistoa pitkin. (Bachus & Custodio 2003, s.56.)

Kuvassa 5 vasemmalla poikkileikkaus on pumpun sivusta päin katsottuna ja oikeanpuoleinen kuva on poikkileikkaus pumpun pesästä edestäpäin katsottuna. Pyörimissuunta on juoksupyörän suunnasta katsottuna vastapäivään (CCW = counter clockwise), mutta pyörimissuunta voi pumpun suunnittelusta riippuen olla myös myötäpäivään (CW = clockwise). Usein pumpun pyörimissuunta kuitenkin katsotaan kytkimen suunnasta, eli suunta olisi juuri päinvastoin kuin kuvassa 5, sillä kytkin sijaitsee moottorin päässä. Kuvassa 6 on esitetty pumppu, joka on kytketty prosessiin.



Kuva 6. Pumppu kytkettynä prosessiin (muokattu, Bachus & Custodio 2003, s.1).

Pumput toimivat siis paine-erojen avulla siirtäen fluidia matalapaineen alueelta korkean paineen alueeseen ja kuten aiemmin mainittiin, keskipakopumppu muuttaa virtauksen painetta juoksupyörän avulla. Kuvassa 6 nähdään juuri kyseinen tilanne, jossa tuotetta siirretään säiliöstä 1, säiliöön 8, keskipakopumpun avulla. Kuvassa nähdään myös, kuinka pumppu ja moottori on kiinnitetty prosessiin. Putkistossa on yleensä ennen pumppua ja sen jälkeen venttiili (2), jolla virtausta voidaan tarpeen tullen säätää tai pysäyttää kokonaan. Esimerkiksi vuototilanteessa tai huollon tarpeessa linja suljetaan venttiilin avulla, sekä laippaliitos (3) sokeoidaan. Sokeoinnilla tarkoitetaan prosessin fyysistä erottamista asettamalla laippojen väliin metallinen levy, jolla estetään fluidin eteneminen linjassa. Venttiilin sulkeminen jo itsessään estää virtauksen linjassa, mutta sokeointia käytetään turvallisuussyistä ns. ”tuplavarmistuksena”, sillä usein linjassa kulkee ihmiselle haitallisia aineita. Taulukossa 1 on annettu kuvan 6 osien nimet ja selitykset.

Taulukko 1. Kuvan 6 komponenttien nimet ja selitykset.

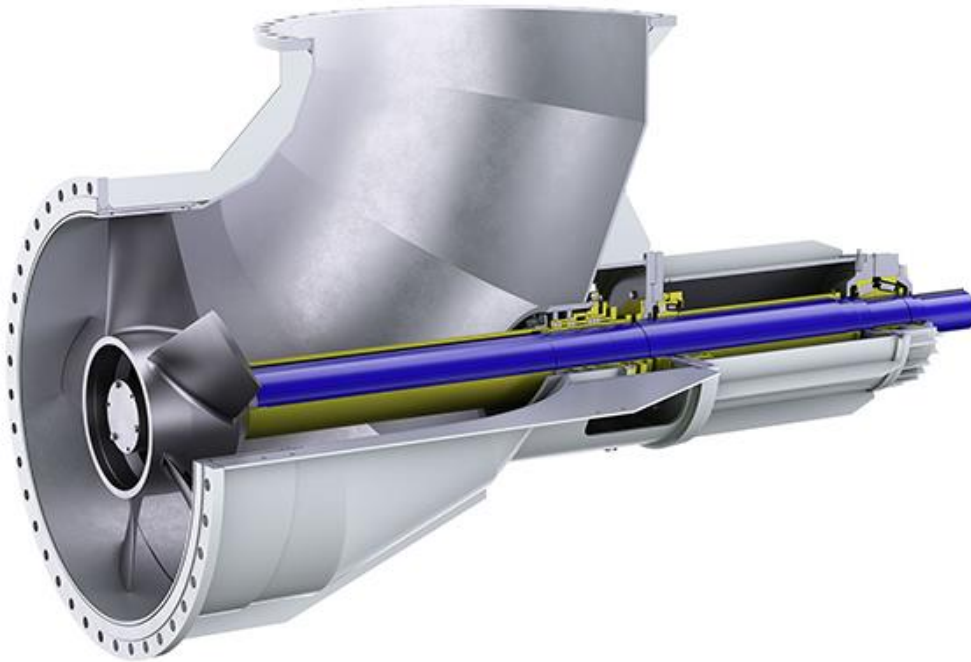
Numerointi	Kuvaus	Selitys
1	Matalapaineen alue	Alue, josta pumpun imupuoli ottaa virtauksen
2	Venttiili	Kytkin, jolla säädetään virtausta linjassa
3	Laippaliitos	Kiinnitys menetelmä linjan ja pumpun välillä
4	Putki/linja	Väylä, jota pitkin virtaus liikkuu
5	Pumppu	Laite, joka siirtää fluidia linjassa
6	Kytkin	Laite, jolla moottori siirtää pyörimisliikkeen pumpulle
7	Sähkömoottori	Laite, joka tuottaa pyörimisliikkeen pumpulle
8	Korkeapaineen alue	Alue, johon pumppu siirtää korkeapaineista virtausta

2.5 Erilaiset keskipakopumput

Kuten aiemmissa kappaleissa mainittiin, keskipakopumppu on yleisin käytettävä pumpputyyppejä ja öljyteollisuuden teollisuudessa jopa 90 % käytettävistä pumpuista on keskipakopumppuja. (Bachus & Custodio 2003, s. 56). Keskipakopumppu ei siis ole mikään yksittäinen pumppu vaan hyvin yleinen käsitys pumpuista, jotka hyödyntävät keskipakovoimaa fluidin liikuttamiseksi. Tämän vuoksi näistä pumpuista on olemassa kymmeniä eri variaatioita, jotka kaikki ovat erilaisia tietyillä ominaisuuksilla. Pumppuvalmistaja Axflow tarjoaa pelkästään keskipakopumpuista 34 eri sarjaa, joista jokaisessa sarjassa on vielä itsessään erilaisia pumppuja. (Axflow.)

Keskipakopumput voidaan jakaa hyvin monella tapaa pienempiin kategorioihin, joista eräs tapa on jakaa pumput aksiaalisiin ja radiaalisiin. Aksiaalisissa pumpuissa virtaus liikkuu juoksupyörän läpi lineaarisesti linjassa eteenpäin ja kyseisissä pumpuissa ei ole pesää, kuten radiaalisissa pumpuissa. Pumpun juoksupyörä on linjan sisällä ja pumpun muut osat on kiinnitetty linjan ulkopuolelle. Kuva 7 havainnollistaa kyseisen pumpun. Toimintaperiaate

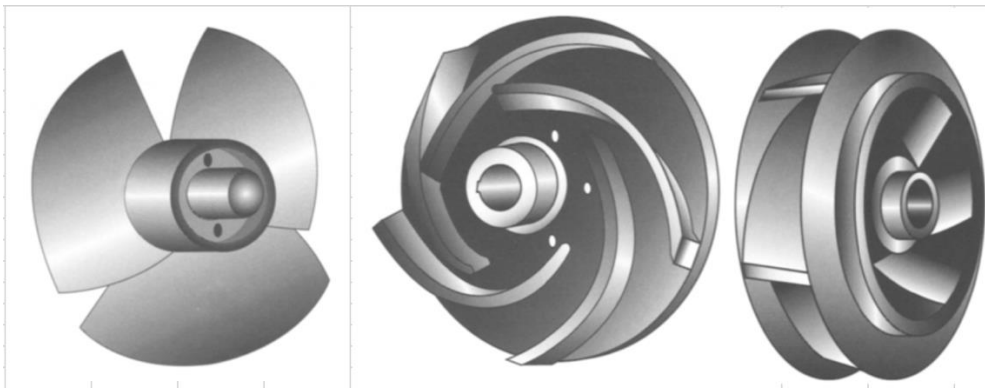
on kuitenkin samanlainen, eli juoksupyörä kiihdyttää fluidin virtausta ja saa aikaan paine-eron, jonka avulla tuote liikkuu linjassa eteenpäin. (Sulzer 2010, s.20.)



Kuva 7. Aksiaalinen keskipakopumppu (Axial flow pump type Ensival Moret CAHR 2021).

Radiaalisissa pumpuissa juoksupyörä kierrättää fluidia pumpun pesässä saadakseen aikaan halutun paine-eron. Jalostamo-olosuhteissa radiaaliset pumput ovat kuitenkin yleisempiä kuin aksiaaliset pumput, joten tutkimuksen kannalta tämä jako ei ole järkevä.

Kaikkia keskipakopumppuja yhdistää juoksupyörä ja sen avulla pumppuja voidaan myös jakaa pienempiin kategorioihin. Juoksupyörät voidaan luokitella kolmeen pääkategoriaan, avoin, puoliavoin ja suljettu. Kuvassa 8 on esitetty juoksupyörien kolme eri tyyppiä, vasemmalta oikealle katsottuna avoin, puoliavoin ja suljettu.



Kuva 8. Erilaiset juoksupyörät (muokattu, Bachus & Custodio 2003, s. 69–71).

Avoin juoksupyörä muistuttaa hyvin paljon veneen potkuria, joka käytännössä toimii samalla periaatteella. Avoin juoksupyörää siis ”leikkaa” vettä ja virtaus liikkuu aksiaalisesti juoksupyörän läpi. Tällainen juoksupyörä saa aikaan suuren virtauksen, mutta pumpun noste on pieni alhaisen paineen vuoksi. Avoin juoksupyörä saa aikaan alhaisen hyötysuhteen ja sitä käytetään prosesseissa, jossa ei tarvita suurta nostetta, vaan paljon virtausta. Tämän tyyppiseen juoksupyörään ei vaikuta pumpattavassa fluidissa olevat kiinteät partikkelit, kuten kivet ja lika. Avoin juoksupyörä löytyy useimmiten aksiaalisista keskipakopumpuista, kuten kuvan 7 pumpusta. (Bachus & Custodio 2003, s. 70.)

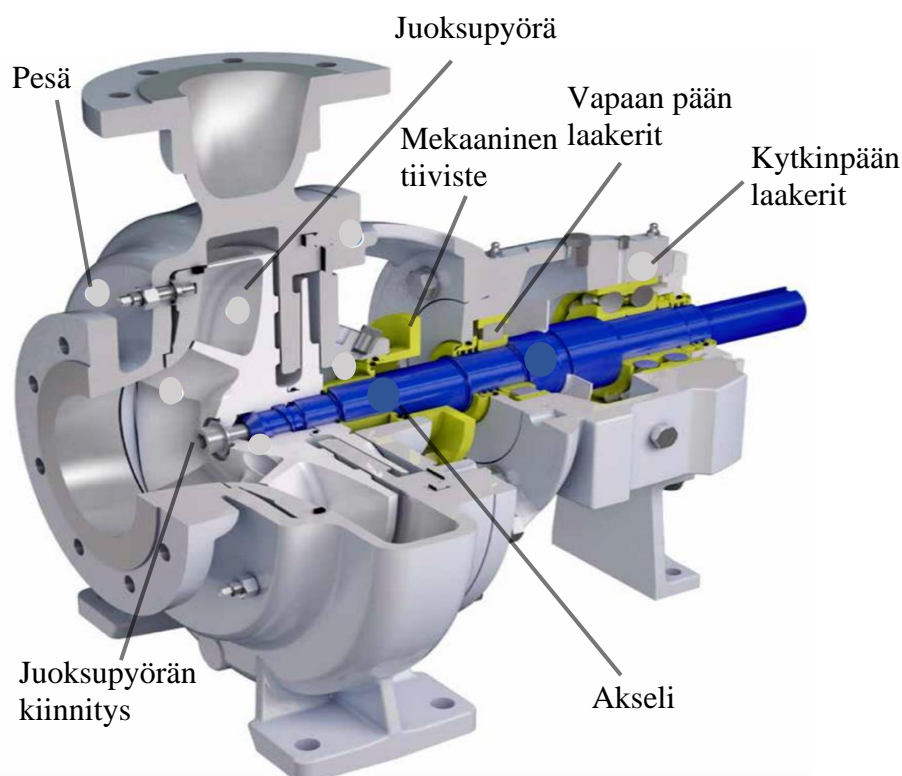
Puoliavoimessa juoksupyörässä siivet ovat esillä, mutta ne ovat kiinnitettynä tukilevyyn. Tällaisia juoksupyöriä käytetään fluideille, joissa on pieni määrä kiinteitä partikkeleita, kuten esimerkiksi sedimenttiä tankin tai joen pohjalla. Juoksupyörän siipien ja pumpun pesän väliset toleranssit ovat kohtuullisen suuret, jonka vuoksi pienet partikkelit eivät vahingoita sitä. Puoliavoimella juoksupyörällä saadaan aikaan avointa juoksupyörää parempi hyötysuhde, jonka seurauksena virtauksen määrä pienenee ja samalla pumpun noste paranee. Tämän tyyppinen juoksupyörä on yleinen radiaalisissa keskipakopumpuissa (kuvan 4 pumpu), joilla siirretään fluidia, jossa on pieni määrä partikkeleita. (Bachus & Custodio 2003, s. 70.)

Suljettu juoksupyörä on suunniteltu niin, että siivet ovat kahden tukilevyn välissä. Tämän juoksupyörän toleranssit ovat niin korkeat, että se soveltuu ainoastaan täysin puhtaisiin fluideihin. Juoksupyörä istuu pumpun pesään niin tiukasti, että minkäänlaiset kiinteät

partikkelit vahingoittavat sitä helposti. Suljetulla juoksupyörällä saadaan aikaan korkea hyötysuhde, sekä noste. Haittapuolena suljetussa juoksupyörässä on se, että pumpattavan fluidin ominaisuudet, sekä pumpun mekaanisten osien kuluminen heikentävät sen tarkkaan asetettuja toleransseja. Esimerkiksi fluidin aiheuttama eroosio, kavitaatio (kts. kappale 2.7.1) ja voiteleva vaikutus heikentävät toleransseja. Myös pumpun laakereiden ja akselin kuluminen haittaavat toleransseja, jonka seurauksena juoksupyörän hyötysuhde kärsii. (Bachus & Custodio 2003, s. 70.)

2.6 Keskipakopumpun rakenne

Keskipakopumpun rakenne vaihtelee valmistajan ja pumputyyppin mukaan, mutta perusosat pumpuissa ovat kuitenkin samat. Kuvassa 9 on esitetty Sulzerin valmistama yksivaiheinen radiaalinen Ahlstar-keskipakopumppu mekaanisin osineen.



Kuva 9. Sulzer-keskipakopumppu (muokattu, AHLSTAR end-suction single-stage centrifugal pumps, 2021).

Kyseinen Sulzerin-keskipakopumppu on yleinen öljyteollisuuden teollisuudessa käytettävä prosessipumppu. Kuvaan merkityt mekaaniset komponentit löytyvät lähes kaikista keskipakopumpuista. Rakenteen kuvaamiseen on käytetty radiaalista pumppua, koska se on huomattavastasi yleisempi aksiaaliseen verrattuna.

2.7 Yleiset vikaantumismuodot

Keskipakopumppujen vikaantumista on tutkittu paljon ja yleisesti viat voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan. Hydrauliset viat ovat itse pumpattavan fluidin aiheuttamia vikoja, jotka syntyvät usein paineen, lämpötilan ja virtausnopeuden muutoksien takia. Mekaaniset viat ovat pumpun mekaanisten komponenttien vaurioitumista, kuten laakeri-, tiiviste- ja väsymisviat. Muut viat ovat prosessin ulkopuolisten tekijöiden aiheuttamia vikoja, kuten esimerkiksi pumpun eroosio ja korroosio. (McKee ym. 2011 s. 2–10.)

2.7.1 Hydrauliset viat

Kavitaatio on ilmiö, jossa pumpattavaan nesteeseen syntyy ilmakuplia paineen laskiessa alle nesteen kiehumispisteen. Nesteiden kiehumispiste on siis verrannollinen prosessissa vallitsevaan paineeseen, joten paineen laskiessa kiehumispiste alenee ja paineen noustessa myös kiehumispiste nousee. Keskipakopumpuissa tämän ilmiön aiheuttaa imupaineen aleneminen, imupuolelta prosessiin tulevan nesteen lämpötilan kohoaminen tai virtauksen nouseminen suunniteltua korkeammaksi. Keskipakopumput suunnitellaan niin, että sitä ajetaan 85–110 % välillä sen parhaan hyötysuhteen alueesta. Parhaan hyötysuhteen alueesta käytetään lyhennettä BEP (Best Efficiency Point). Usein pumppuja kuitenkin joudutaan ajamaan tätä korkeammalla tuotolla, jonka seurauksena riski kavitointiin nousee. (McKee ym. 2011, s. 2.)

Kavitaation seurauksena syntyneet ilmakuplat aiheuttavat monia ongelmia pumpulle, joista näkyvin on juoksupyörän eroosio. Juoksupyörä siirtää nestettä prosessissa eteenpäin siipiä pitkin, jolloin kavitaation seurauksena syntyneet kuplat osuvat siipiin ja puhkeavat. Kuplien

puhkeaminen aiheuttaa suurta räsitusta puhkeamiskohtaan, joka paikoittain saattaa olla materiaalin vetolujuutta suurempi. Kuplien puhkeaminen tuhoaa materiaaliin pinnan syömällä sitä pois, joka näkyy juoksupyörän siivissä ja pumpun pesän sisäseinämissä. (McKee ym. 2011, s. 2–3.)

Muita havaittavia ongelmia kavitaatiosta on pumpun liiallinen värinä ja ääni, sekä pumpun tehokkuuden laskeminen. Ilmakuplien puhkeamisen aiheuttaa ylimääräistä värinää ja sekä terävää rätisevää ääntä. Kavitaation synnyttämää ääntä kuvaillaan usein kuin pumpulla pumpattaisiin kiviä. Ääni on siis selvästi tunnistettavissa pumpun normaalin käyntiäänen seasta ja äänen voimakkuuden, sekä sijainnin perusteella voidaan määrittää kavitaation vakavuusaste. Kavitaatio myös laskee pumpun virtauksen määrää, sillä syntyvät ilmakuplat syrjäyttävät tilavuutta pumpattavasta nesteestä. (McKee ym. 2011, s. 2–3.) Kuvassa 10 on esitetty kavitaation aiheuttamaa eroosioaurioita juoksupyörälle.

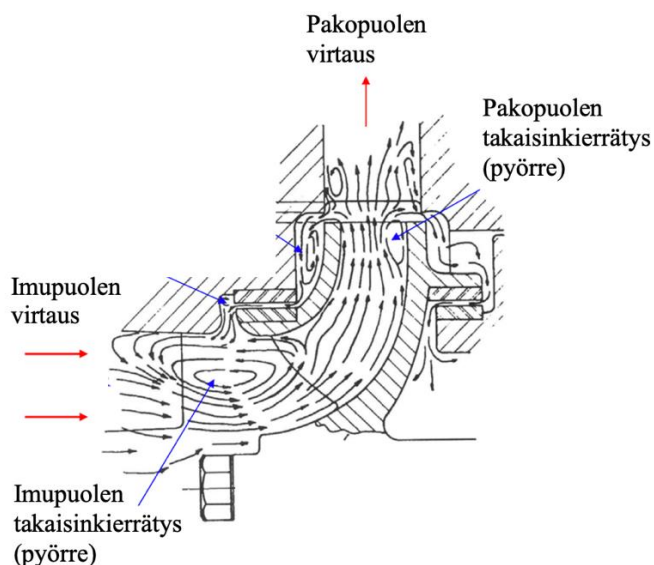


Kuva 10. Kavitaatio (Morais & Pereira & Siquera & Moino 2017, s.5).

Radiaalinen ja axiaalinen työntövoima kohdistuu pumpun roottoriin staattisena työntövoimana suhteessa pumpun ajoon. Kun keskipakopumppua ajetaan sen BEP-alueella, tämä kyseinen staattinen voima on minimissään. Staattinen voima kasvaa, kun pumppua ajetaan alhaisella ja korkealla virtauksella, mutta suurimman arvonsa se saa korkealla

virtauksella. Koska keskipakopumput on suunniteltu ajettavaksi niiden BEP-alueella, on myös komponentit suunniteltu kestävänsä sen mukaisia rasituksia. Kun pumppua ajetaan yli sen suunnitellulla virtauksella, radiaaliset ja axiaaliset työntövoimat kasvavat, jonka seurauksena pumpun mekaaniset komponentit kärsivät. Korkea staattinen voima roottorille voi aiheuttaa akselille liiallista myötämistä, mekaanisen tiivisteiden enneaikaisia vaurioitumista, sekä pahimmassa tapauksessa akselin pettämistä. Korkea aksiaalinen työntövoima aiheuttaa myös laakereiden lämpenemistä, joka johtaa niiden enneaikaiseen kulumiseen ja rikkoutumiseen. Tätä on kuitenkin hankala yhdistää radiaalisiin voimiin, sillä laakereiden lämpenemiselle on monia muitakin yleisiä syitä, kuten puutteellinen voitelu ja akselin huono tasapainotus. (McKee ym. 2011, s. 4–5.)

Pumpattavan nesteen takaisinkierätykset syntyvät, kun virtausta pienennetään. Takaisinkierätyksessä pumpattava neste muodostaa pyörteen joko imu- tai pakopuolelle, mikä saa aikaan nesteen virtaamisen molempiin suuntiin. Takaisinkierätykset aiheuttavat vastaavanlaisen kovan äänen kuin kavitaatio, mutta ääntä kuvaillaan intensiteetiltään kovemmaksi ja enemmänkin kolisevaksi. Takaisinkierätykset saavat aikaan pumpattavan nesteen lämpötilan nousun ja samalla paineen muuttumisen. Nämä tekijät altistavat pumpun kavitaatiolle ja mekaanisten osien enneaikaiselle kulumiselle. (McKee ym. 2011, s. 5–6.)
 Kuva 11 esittää kyseisen ilmiön imu- sekä pakopuolella.

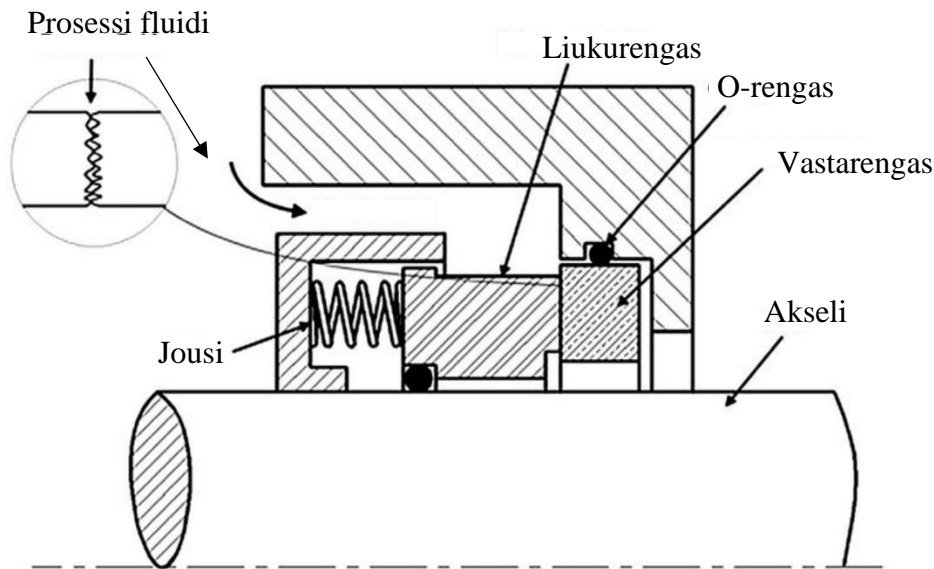


Kuva 11. Takaisinkierätyksilmiö (muokattu, Hodkiewicz 2005, s.34).

2.7.2 Mekaaniset viat

Laakereiden vikaantumisen voi aiheuttaa usea eri syy, kuten öljyn puutteellinen voitelu, kiinteiden partikkeleiden aiheuttama kuluminen ja liiallinen lämpö laakerissa. Öljyn puutteellinen voitelukyky johtuu yleensä sen kontaminoitumisesta ulkoisen tekijän vuoksi. Kontaminoituminen syntyy, kun öljyn sekaan pääsee vettä, pumpattavaa tuotetta tai likaa. Vesi laimentaa öljyä ja alentaa sen viskositeettia, joka aiheuttaa öljyn voitelukyvyyn heikkenemistä, jolloin kitka laakerissa kasvaa ja lämpötila kohoaa. Pumpattavan tuotteen sekoittuminen öljyyn aiheuttaa tuotteesta riippuen, joko syöpymistä, korroosiota tai viskositeetin alenemaa. Lika öljyn seassa tunkeutuu laakereiden sisälle, joka aiheuttaa niiden jumiutumista, kulumista tai kitkan nousua. Laakereiden liiallinen lämpeneminen voi johtua edellä mainituista seikoista, mutta myös epätasapainoisista osista, linjausvirheistä tai valmistusvirheestä. Öljyn vaihdon laiminlyöminen lisää myös riskiä laakereiden ennaaikaiselle vaurioitumiselle, sillä ajan myötä öljy kerää itseensä epäpuhtauksia ja menettää voitelukykyään. Kosteus, tuote tai lika sekoittuu öljyyn yleensä, kun pumpun jokin tiiviste vuotaa tai on viallinen. Pumpun mekaanisen tiivisteiden tarkoitus on eristää pumpattava tuote ympäristöstä, sekä pumpun sisuskaluista. Kun tämä tiiviste vuotaa, pääsee tuote ja sen mukana olevat mahdolliset partikkelit sekoittumaan öljyyn pumpun sisällä. (McKee, ym. 2011, s. 6–7.)

Mekaanisessa tiivisteessä toiminta perustuu tiivistepintaan, jonka muodostaa akselin mukana pyörivä liukurengas, sekä sitä vastassa oleva rengas. Näitä kahta pintaa puristaa kokoon jousi, joka sijaitsee liukurenkaan takana. Tiivistepinnan väliin muodostuu ohut kalvo nestettä, joka on joko pumpattavaa fluidia, tai erillistä tiivistenestettä. Liukurengas pyörii pumpun akselin mukana ja vastarengas pysyy paikoillaan. Kalvo pintojen välissä estää kosketuspintojen suoran kontaktin toisiinsa voitelemalla niitä, sekä samalla jäähdyttää kitkasta syntyvää lämpöä. O-rengas vastarenkaan takana estää tiivistenesteen tai tuotteen pääsyn öljyn sekaan. Kuvassa 12 on esitetty mekaanisen tiivisteiden pääkomponentit (Xiao & Khonsari 2013, s.1.)



Kuva 12. Mekaaninen tiiviste (muokattu, Xiao & Khonsari 2013, s. 2).

Yleisesti mekaaniset tiivisteet vikaantuvat tiivisteiden komponenttien vahingoittuessa tai kun pumppua ajetaan kuivana. Kun pumppua ajetaan kuivana, tiivistepinta vahingoittuu, sillä voitelevaa kalvoa ei synny ilman tiivistenestettä tai pumpattavaa tuotetta. Komponenttien vahingoittuessa tiivistepinnalle syntyvä kalvo ei pysy tasaisena tai on puutteellinen, jonka seurauksena kitkan nousee, jonka vaikutuksesta mekaaninen tiiviste lämpenee liikaa ja vaurioituu. (McKee ym. 2011, s. 7.)

Ylimääräinen värinä keskipakopumppua ajettaessa on myös hyvin yleinen vikaantumisten aiheuttaja. Värähtelyn ylärajat on määritelty ISO 10816 mekaanisten värähtelyn standardissa, pienille, keskikokoisille ja suurille laitteille. Värähtely pumppua ajettaessa voi johtua useasta eri syystä, kuten pumpun liikkuvien osien epätasapainoista, fluidin käyttäytymisestä prosessissa (esim. kavitaatio ja takaisinkierrätys) ja prosessiin kiinnitettyjen linjojen liikkumisesta. Juoksupyörän epätasapaino on yleinen värähtelyn aiheuttaja ja se johtuu usein mekaanisten komponenttien vaurioista, kuten mekaanisen tiivisteiden ja laakerien vaurioista. Myös hydrauliset viat kuten ilmaloukut ja epätasainen virtaus aiheuttava juoksupyörälle värähtelyä. Pumpun pohjalevy puutteellinen suunnittelu ja asennus myös altistaa ylimääräiselle värähtelylle. (McKee ym. 2011, s. 7–8.)

Liiallinen värähtely saattaa ajan myötä aiheuttaa pumpulle ja sen rakenteille väsymistä. Väsyminen jaetaan kolmeen pääkategoriaan: syklinen rasitus, materiaalin väsyminen ja olosuhteiden aiheuttama väsyminen. Syklistä rasitusta esiintyy pumpun liikkuvissa ja pyörivissä komponenteissa, kuten akseli, juoksupyörä ja laakerit. Suurin osa pumpun materiaalivalinnoista ja komponenttien suunnittelusta tehdään niin, että niiden käyttöikä ideaali olosuhteissa kattaa läpi pumpun elinkaaren. Ennenaikaisia komponenttien vikaantumisia kuitenkin ilmenee oikeissa olosuhteissa, jossa fluidi ei ole täysin puhdasta, virtaus aiheuttaa ylimääräisiä rasituksia komponentteihin ja liiallinen värinä saa aikaan materiaalin väsymisen. Kaikki nämä tekijät ja moni muu saa aikaan syklistä rasitusta komponenteille, joka johtaa ennenaikaiseen materiaalin väsymiseen. (McKee ym. 2011, s. 7.)

Olosuhteiden aiheuttama väsyminen näkyy usein korroosiona pumpun ulkopinnoilla, jossa pinnan koostumus muuttuu materiaalin syöpymisen vuoksi. Pumppujen ulkopinnat käsitellään maalilla, jonka avulla estetään materiaalin ruostuminen. Ajan myötä maali voi alkaa halkeilemaan ja esimerkiksi työkalujen osuessa maalipintaa, saattaa maali vaurioitua. Tämän seurauksena alla on paljas metalli, joka alkaa ruostumaan. Ruostuminen heikentää ehjän materiaalin ominaisuuksia ja täten altistaa sen väsymiselle. (McKee ym. 2011, s. 7.) Jalostamo-olosuhteissa käsitellään usein myrkyllisiä aineita, jotka saattavat aiheuttaa nopeaa korroosiota.

2.7.3 Muut viat

Eroosiota syntyy pumpun mekaanisissa osissa monessa eri muodossa, kuten hankaavana ja hiovana kulumisena. Hankaavaa kulumista esiintyy, kun kaksi metallipintaa ovat kosketuksissa toisiinsa ilman voitelua. Pinnat hankaavat toisiaan ja kuluttavat materiaalia aiheuttaen vaurioita. Hiova kuluminen usein esiintyy pumpuissa fluidin mukana tulevien partikkeleiden aiheuttamana. Usein keskipakopumpuilla pumpataan fluideja, jotka eivät ole täysin puhtaita, eli ne sisältävä partikkeleita. Fluidin mukana kulkevat partikkelit hiovat pumpun pesää, juoksupyörää ja mahdollisesti mekaanista tiivistettä, sekä laakereita. (McKee ym. 2011, s. 9.)

Korroosiota ilmenee pumpussa olosuhteiden vaikutuksesta ulkopuolella, mutta myös sisäpuolella. Korroosiota esiintyy usein pumpuissa, joilla pumpataan happamia fluideja, jotka aiheuttavat pumpun komponenteissa kemiallisia muutoksia. Näitä muutoksia voi olla esimerkiksi hapettuminen, jossa materiaalien pinnoitus syöpyy pois ja itse materiaalia alkaa syöpyään hapettumisen seurauksena. Korrosio ei vielä pienissä määrin aiheuta suuria huolia, mutta tarpeeksi edetessään vahingoittaa pumpun komponentteja. (McKee ym. 2011, s. 10.)

Kun keskipakopumpun rakenne, yleisimmät osat ja toimintaperiaate on esitelty, voidaan niiden perusteella siirtyä valitsemaan tutkimukseen sopivat luotettavuusmenetelmät. Luotettavuusmenetelmät on valittu niiden soveltuvuuden perusteella keskipakopumppujen vikaantumisen tutkimiseen. Luotettavuusmenetelmiä tarvitaan muutama erilainen, toisiinsa sidoksissa olevia, jotta saadaan muodostettua kattava kokonaisuus vikaantumisen tutkimiseen ja luotettavuuden arviointiin.

3. Luotettavuusmenetelmät

Luotettavuusmenetelmät-luvussa esitellään tutkimuksen suorittamisessa käytettävät luotettavuusmenetelmät ja kuinka niitä sovelletaan tutkimuksen suorittamiseen. Kappaleessa kuvataan myös, kuinka tutkimus käytännössä suoritetaan. Eriteltyjen tutkimusmenetelmien lisäksi havainnointia pumppujen käyttäytymisestä ja vikaantumisesta käytetään työkaluna luotettavuuden tutkimisessa.

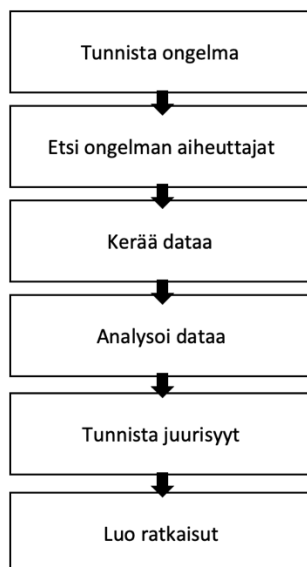
3.1 Luotettavuus

Luotettavuudella ilmaistaan todennäköisyyttä, jolla laite suorittaa toimintonsa annetussa ympäristössään, elinkaarensa aikana, vikaantumatta. Luotettavuuden tavoitteena on siis käyttää laitetta vikaantumatta ja luotettavuusmenetelmien avulla tutkitaan mahdollisia vikaantumismuotoja. Menetelmiä on paljon erilaisia, jotka kaikki soveltuvat eri

tarkoituksiin. Tämän vuoksi on tärkeää valita oikeat menetelmät tutkimiseen, jotta tuloksia voidaan pitää luotettavana. (Biolini 2014, s.1–2.)

3.1.1 Juurisyysanalyysi

Juurisyysanalyysissa on nimensä mukaisesti tarkoitus löytää esiintyvälle ongelmalle sen perinpohjainen syy. Analyysin periaatteena on, että ongelma tutkitaan perinpohjaisesti ja selvitetään mitä, miksi ja miten ongelma syntyi. Keskittymällä vain näkyvään ongelmaan, saadaan aikaiseksi vain väliaikainen ratkaisu, kun taas juurisyihin paneutumalla voidaan eliminoida ongelma kokonaan. Juurisyysanalyysille ei ole yhtenevää määritystä, miten se tulisi suorittaa, mutta alla olevassa kuvassa 13 on esitetty eräät askeleet, jonka pohjalta analyysi voidaan suorittaa. (Andersen & Fagerhaug 2006.)



Kuva 13. Juurisyysanalyysi (Andersen & Fagerhaug 2006).

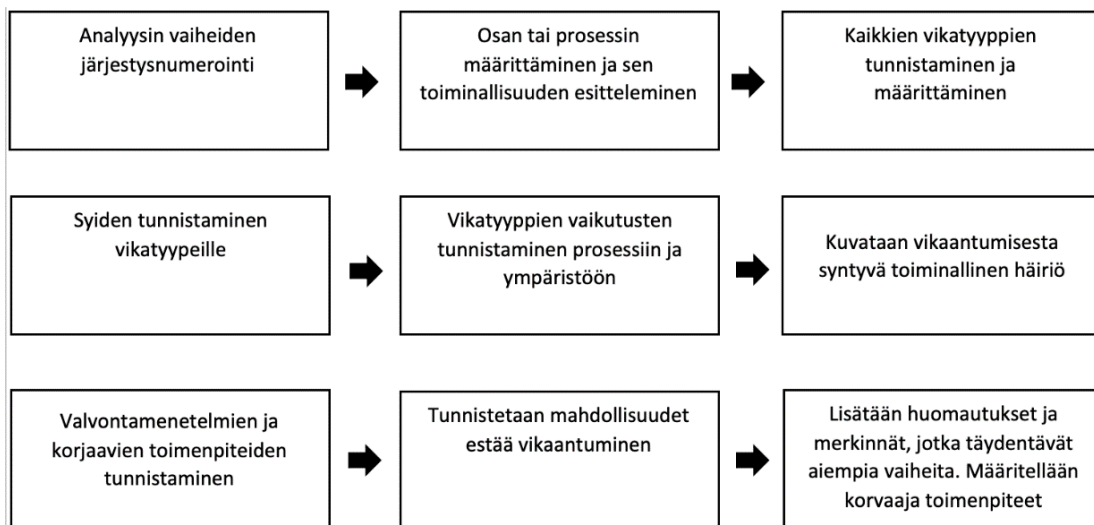
Juurisyysanalyysin suorittamiseen on olemassa monia työkaluja, jonka avulla yllä mainittuihin askeliin saadaan vastaus. Tutkimuksessa hyödynnetään pääsääntöisesti 5x miksi -menetelmää, aivoriisiä ja haastatteluja. 5x miksi -menetelmässä kysytään nimensä mukaisesti viisi kertaa miksi-kysymys juurisyyn löytämiseksi. Esimerkiksi: ”Pumppu

vuotaa, miksi? Mekaaninen tiiviste on vaurioitunut, miksi? Pumpattava tuote sisältää kiintoaineita, miksi? Putkistossa oleva sihti ei suodata tarpeeksi hyvin, miksi? Suunniteltu väärin”. Menetelmä voi siis toimia edellä mainitulla tavalla tai kysymysten kysyminen lopetetaan, kun vastaus ei ole enää mielekäs tai saatavilla. Aivoriivessä pyritään yhdessä etsimään ongelmaan syytä ja haastatteluissa esitetään valmiita kysymyksiä asiantuntijoille juurisyyn löytämiseksi. (Andersen & Fagerhaug 2006.)

3.1.2 Vika- ja vaikutusanalyysi

Vika- ja vaikutusanalyysi (VVA englanniksi FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)) on systemaattinen analyysi, jossa tutkitaan laitteen tai prosessin erilaisia vikatiloja, niiden syitä ja vaikutuksia. VVA on yleinen luotettavuusmenetelmä, joka on laajalti käytössä sen monipuolisuuden takia. VVA:n avulla voidaan parantaa prosessin luotettavuutta, laatua ja tunnistaa vikoja jo varhaisessa vaiheessa. VVA perustuu yhdeksään askeleeseen tai vaiheeseen, mutta lähteistä ja käyttötarkoituksesta riippuen askeleiden määrä saattaa vaihdella. (Biolini 2014, s. 72–73.)

VVA lähtee liikkeelle näiden kyseisten askeleiden määrittämisellä, jonka jälkeen määritetään tutkittavan prosessin tai sen osan toiminnallisuus. Seuraavaksi tunnistetaan ja määritetään kaikki mahdolliset vikaantumismuodot tutkittavalle kohteelle. Vikojen tunnistamisen jälkeen syyt vikaantumisten syntymiseen selvitetään ja tunnistetaan vikaantumisten vaikutus prosessiin, sekä ympäristöön. Tämän jälkeen kuvataan vikaantumisesta syntyvä toiminnallinen häiriö, eli miten vikaantuminen voidaan todeta prosessissa tai sen osassa. Seuraavaksi tunnistetaan valvontamenetelmät ja korjaavat toimenpiteet vikaantumisen estämiseksi. Menetelmien tunnistamisen jälkeen etsitään mahdollisuus estää vikaantuminen, eli voiko vikaantumisen estää nykyisessä tilassa, vai tuleeko prosessi esimerkiksi pysäyttää. Viimeisenä lisätään huomautukset täydentämään aiempia vaiheita ja määritellään korjaavat toimenpiteet VVA:n perusteella. Kuvassa 14 on esitetty VVA:n vaiheet. Kuva luetaan vasemmalta oikealle, ylhäältä yksi rivi kerrallaan. (Biolini 2014, s. 72–73.)



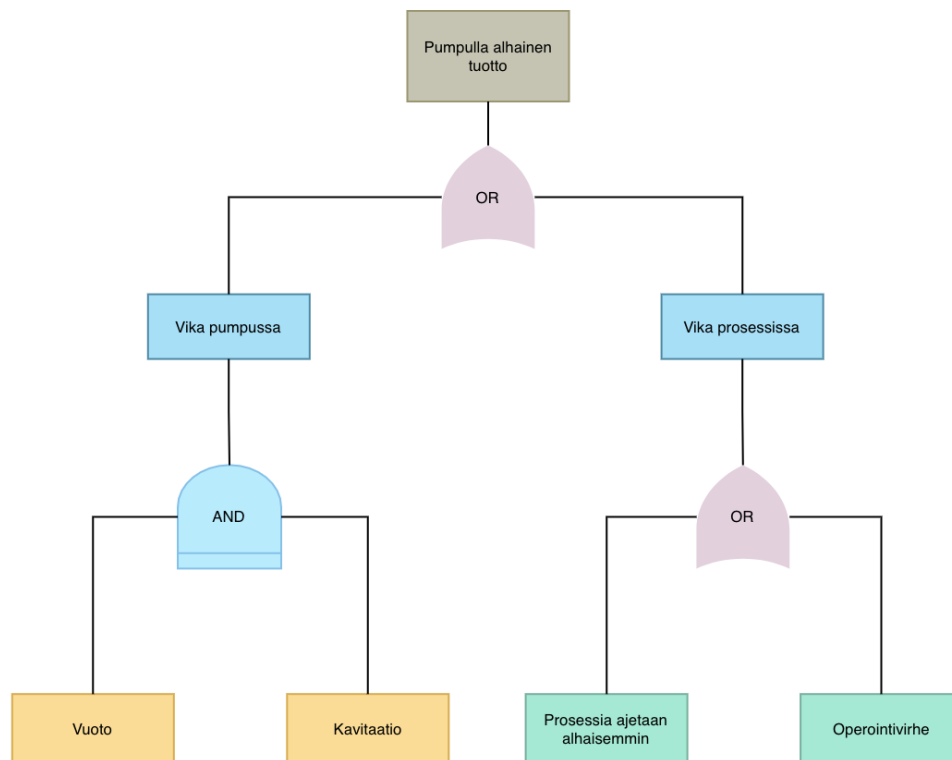
Kuva 14. Vika- ja vaikutusanalyysin vaiheet (Birolini 2014, s. 72–73).

VVA otetaan usein mukaan myös laitteen tai prosessin kriittisyysluokittelu, jolloin analyysistä käytetään lyhennettä FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis). Kriittisyysluokittelussa laitteelle tai prosessille annetaan kriittisyysluokat K (Kriittinen), T (Tärkeä) ja N (Normaali). Kirjainluokitusten lisäksi annetaan pisteytys, joka määritellään kriittisyystaulukon avulla. Taulukossa jokaiselle vikaantumistyyppille on annettu kerroin, joka määräytyy tapahtuman vakavuuden ja todennäköisyyden avulla. Kaikki tapahtumat ja vikaantumistyytit käydään läpi, jonka jälkeen kertoimet kerrotaan yhteen, josta saadaan lopullinen kriittisyysindeksi. VVA ei siis ilman kriittisyysluokittelua ota ollenkaan huomioon tapahtuman vakavuutta tai todennäköisyyttä. (Birolini 2014, s. 73.)

3.1.3 Vikapuuanalyysi

Vikapuuanalyysi (englanniksi FTA (Fault Tree Analysis)) on ylhäältä alaspäin kulkeva systemaattinen menetelmä, jossa ylimpänä on ei-toivottu tapahtuma esimerkiksi laitteen tai komponentin kriittinen vaurioituminen. Vikapuuanalyysissä käytetään standardisoituja symboleita, joiden avulla ei-toivottu tapahtuma pilkotaan sen tekijöihin, eli etsitään juurisyitä. Analyysissä usein esitetään koko systeemi, joten kaikkien vikaantumiseen johtavien syiden tunnistaminen on mahdollista. Kun ei-toivottua tapahtumaa pilkotaan tekijöihin, tulee ne tunnistaa ja määrittää tarkasti. Haluttaessa vikapuuanalyysiin voidaan lisätä todennäköisyys tapahtumalle, joka usein lasketaan tilastoinnin avulla.

Vikapuuanalyysissa pystyy helpommin ottamaan huomioon ulkoiset tekijät, jotka vaikuttavat komponentin tai prosessin luotettavuuteen (Biolini 2014, s: 76–77). Pelkistetty esimerkki vikapuuanalyysista on esitetty kuvassa 14.

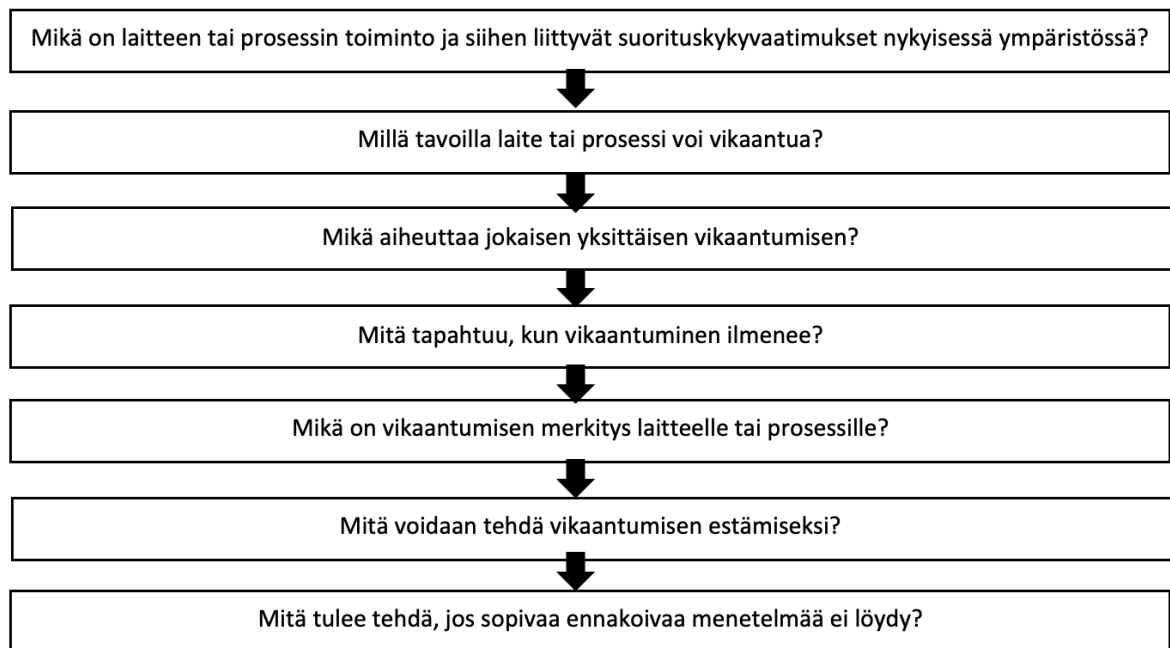


Kuva 15. Vikapuuanalyysi.

3.1.4 Luotettavuuskeskeinen kunnossapito

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito (RCM (reliability centered maintenance)) on systemaattinen prosessi, jonka avulla määritetään mitä tulee tehdä ja saavuttaa, jotta haluttu laite tai prosessi pysyy käyttökuntoisena suunnitellun ajanjakson. RCM johtaa kunnossapito-ohjelmaa, jossa päättain keskitytään ennakoiviin toimenpiteisiin, joilla estetään todennäköisiä vikaantumismuotoja. RCM:n tavoitteena on siis luoda tasapaino ennakoivan ja korjaavan kunnossapidon välillä. RCM perustuu seitsemään kysymykseen, joihin haetaan vastaus kunnossapito-ohjelmalla. Kysymyksiin vastaamalla saadaan luotua tehokas

kunnossapitomenetelmä, joka korjaavin-, sekä ennakoivin menetelmin estää vikaantumisten syntymistä. (Yssaad & Khiat & Chaker 2014, s. 108–109.) Kuvassa 16 on esitetty nämä kysymykset.



Kuva 16. RCM-toimintamalli (muokattu, Yssaad ym. 2014, s. 109).

RCM-toimintamalli on vahvasti ennakoiva luonteeltaan ja on kytköksissä FMEA-, FMECA- ja FTA-luotettavuusmenetelmiin. RCM-toimintamallin kysymyksiin voi löytää vastauksen tilastoimalla vanhoja kunnossapitotietoja, mutta vikaantumista voidaan myös ennustaa edellä mainittujen menetelmien avulla, jonka vuoksi RCM-toimintamallin ennakoivissa toimenpiteissä hyödynnetään vahvasti muita luotettavuusmenetelmiä. (Yssaad ym. 2014, s. 109.)

Kun soveltuvat luotettavuusmenetelmät on valittu, voidaan siirtyä tutkimusosuuteen, jossa menetelmiä päästään hyödyntämään. Tutkimusosuus on pilkottu osiin ja valittuja luotettavuusmenetelmiä hyödynnetään tutkimuksen eri vaiheissa keskipakopumppujen luotettavuuden arvioinnissa.

4. Tilastollinen- ja case-tutkimus

Tutkimus ja case-osio kattaa haastattelujen pohjalta kirjoitetut kappaleet kunnossapidon toiminnasta Porvoon jalostamolla, sekä tilastollisen tutkimusosuuden keskipakopumppujen vikaantumisesta eri tuotantolinjoilla. Tutkimusosuudessa etsitään viat ja luokitellaan ne ja taulukoidaan ne analysointia varten.

4.1 Tutkimuksen suorittaminen

Tutkimus suoritetaan keräämällä työtilauksia M+-kunnossapitojärjestelmästä ja otantana käytetään noin 100–140 työtilausta prosessiyksikköä kohden. Prosessiyksiköitä otetaan tutkimukseen jokaiselta tuotantolinjalta yksi kappale, jolloin niitä on yhteensä neljä. Työtilaukset rajataan A11-tyypin (tunnus keskipakopumpuille) pumppuihin ja osastoksi valitaan kone, eli Nesteen kunnossapitoyksikön koneosasto, joka vastaa pumppujen huolloista. Työtilauksista rajataan pois tutkimuksen kannalta epärelevantit työt, kuten öljyanalyysit, tarkastuskäynnit, nostotyöt yms. Työtilaukset taulukoidaan ja käydään yksitellen läpi, jolloin selvitetään vikatyypin, sekä vian aiheuttanut syy, eli löydetään juurisyyt. Vikaantumisten ja niiden syiden selvittämiseen käytetään työn raportteja, asiantuntijahaastatteluja, mekaanisten tiivisteiden kunnossapitojärjestelmää ja havainnointia. Tutkimus suoritetaan tilastollisena tutkimuksena, hyödyntäen juurisyyanalyysia, sen menetelmiä ja FTA-vikapuuanalyysia.

Kun työtilauksista on selvitetty vikatyypit ja niihin johtaneet syyt, kategorisoidaan ne omiin luokkiin ja tehdään tilaston mukaiset johtopäätökset kyseisen prosessiyksikön kohdalla. Tuloksista piirretään kuvaajat selkeyttämään tuloksien esitystä ja helpottamaan johtopäätöksien tekemistä.

4.1.1 Case-tutkimuksen suorittaminen

Case-tutkimuksessa suoritetaan jalostamon jäähdytysvesilaitoksen merivesipumppujen kunnossapito- ja luotettavuuskatsaus. Kunnossapitokatsauksessa käydään läpi pumppujen vikahistoriaa ja selvitetään sieltä mahdollisia ongelmakohtia, sekä luodaan parannusehdotuksia. Luotettavuuskatsauksessa tutkitaan pumppujen käyttöä ja tulevaisuutta luotettavuusnäkökulmasta, sekä tuodaan esiin mahdollisia puutteita ja ongelmakohtia. Case-tutkimuksen avulla luodaan avustava kokonaiskatsaus merivesipumppujen tilasta kunnossapidon ja luotettavuuden näkökulmasta kunnossapidon työntekijöille. Merivesipumppujen ylläpidosta pitkään vastanneet työnsuunnittelija ja työnjohtaja ovat hiljattain eläköityneet, jonka seurauksena paljon tietotaitoa on kadonnut. Uusille työnsuunnittelijoille, sekä työnjohtajille tätä katsausta voidaan käyttää eräänlaisena ohjeena ja infopakettina merivesipumppujen ylläpitoon. Case-tutkimuksessa hyödynnetään VVA:ta, kriittisyysluokittelua, RCM-toimintamallia ja havainnointia.

4.2 Kunnonvalvontamenetelmät Porvoon jalostamolla

Tämän kappaleen sisältö perustuu kunnossapidon konetarkastajien, voitelupuolen ja työnsuunnittelun henkilökunnan haastatteluun. Haastatteluita pidettiin yhteensä viisi kappaletta, joista kolme pidettiin konetarkastajille, yksi voitelupuolen työntekijälle ja yksi työnsuunnittelijalle. Haastattelun kysymykset ovat luettavissa liitteissä 1, 2 ja 3.

Konetarkastajat toimivat kunnossapidon organisaatiossa ja vastaavat yhdessä Porvoon jalostamon kaikkien pyörivien laitteiden kunnonvalvonnasta. Kunnonvalvontaa hoidetaan online-valvontana eli etäyhteydellä kiinteitä antureita käyttäen, sekä käsikäyttöisillä värähtelyanalysaattoreilla. Online-valvonnassa käytetään Bentley Nevadan järjestelmää värähtelyn mittaamiseen ja tämän lisäksi prosessiarvoja seurataan Valmet-, TOP- ja Honeywell-järjestelmillä. Online-valvonnan järjestelmät ovat käytössä pääsääntöisesti liukulaakeroiduille laitteille, eli Porvoon jalostamolla isoille koneille, kuten kompressoreille ja turpiineille.

Pienille laitteille, kuten keskipakopumpuille ei juurikaan käytetä online-valvontaa, vaan turvaudutaan yleisesti käsikäyttöisiin värähtelyanalysaattoreihin. Konetarkastajilla on käytössä Emerson CSI 2140 neljäkanavainen värähtelyanalysaattori, jonka avulla mittaukset suoritetaan manuaalisesti. Keskipakopumpuissa on aina kaksi kiinnityspaikkaa analysaattorille, eli pumpun kytkinpäässä ja vapaassa päässä sijaitsevien laakereiden kohdalla. Kytkinpäällä tarkoitetaan pumpun moottorinpuolta ja vapaalla päällä juoksupyörän puolta. Myös pumpun sähkömoottorilla on kaksi kiinnityspaikkaa, johon analysaattorin anturi kiinnitetään ulkopintaan magneetilla. Värähtelyanalysaattori suorittaa mittauksen automaattisesti ja tallentaa mitatut värähtelyarvot laitteen muistiin, josta ne siirretään tietokoneelle tarkempaa analysointia varten. Kuvassa 17 nähdään Emersonin värähtelyanalysaattori.



Kuva 17. Emerson CSI 2140 -värähtelyanalysaattori.

Analysaattorin piirtämästä käyrästä nähdään pumpun luonnollinen värähtelytaajuus ja värähtelyt tämän taajuuden ulkopuolella enteilevät alkavista vioista. Värähtelykäyrästä voidaan esimerkiksi tutkia laakereiden kunto, prosessitietoa, linjausvirheet ja akselin tasapaino. Laakereille voidaan laskea ohitustaajuus, joka lasketaan laakerigeometrian avulla, eli lasketaan kuulat, ulko- ja sisäkehän pituus, joista laskutoimituksen avulla saadaan

ohitustaajuudelle lukuarvo. Esimerkkinä jos pumpun luonnollinen värähtelytaajuus on 50 Hz ja laakerin ohitustaajuus on 3.6, niin $50 \text{ Hz} \cdot 3.6$ antaa lukuarvon 180 Hz. Tämä lukuarvo kertoo värähtelytaajuuden, jossa värähtelyä esiintyy, jos laakerissa on vikaa. Emersonin järjestelmän avulla voidaan myös paikantaa vika joko laakerin ulko- tai sisäkehälle. Järjestelmässä on myös laakeripankki, joka sisältää standardien mukaiset laakerit, eli jos mitattavan laakerin tyyppi on tiedossa, niin järjestelmä laskee automaattisesti ohitustaajuuden ja paikantaa värähtelykäyrältä siihen osuvat värähtelyarvot. Prosessitietoa saadaan värähtelykäyrästä esimerkiksi kavitaationa, jossa pumpun luonnollisen värähtelytaajuuden alapuolella esiintyy kohinaa. Tämä kohinan voidaan olettaa olevan kavitaatiota. Myös linjausvirheet ja akselin epätasapaino näkyvät piikkeinä luonnollisen värähtelytaajuuden seassa.

Konetarkastajien perustyökuorman kuuluu oman alueen laitteiden värähtelyn mittaus aina tietyin aikavälein. Yleensä tämä väli on noin 2 kuukautta, jonka aikana kaikki oman alueen laitteet tulee mitata. Perustyökuorman lisäksi hoidetaan M+ työtilaukset, tuotannon päiväkirjasta ilmi tulleet ongelmat, online-järjestelmien antamat hälytykset, sekä itse huomautetut puutteet. Konetarkastajien lisäksi prosessipuolen operaattorit suorittavat päivittäisiä värähtelymittauksia tietyillä alueilla kenttäkierrosten yhteydessä.

Kunnossapidon voiteluosasto vastaa pyörivien laitteiden voitelusta koko jalostamolla. Voiteluosaston henkilökunta seuraa päivittäisiä etukäteen suunniteltuja voitelureittejä, jossa tarkastetaan laitteiden öljyt, sekä suoritetaan tarvittavat rasvaukset. Kunnonvalvonnan osalta voiteluosaston tärkein tehtävä on öljyanalyysit, jotka suoritetaan 3 kuukauden välein, tai laitevalmistajan suosituksen mukaisesti. Öljyanalyyseista tutkitaan vesipitoisuus, öljyn viskositeetti ja kulumapartikkelit. Näiden avulla saadaan käsitys laitteen yleisestä kunnosta ja mahdollisesti tarvittavista huoltotoimenpiteistä. Analyysista saatavia arvoja verrataan vakioarvoihin ja jos arvojen välillä on liian suuri ero, on syytä ryhtyä toimenpiteisiin. Liiallinen vesipitoisuus alentaa öljyn voitelevuutta, liian alhainen viskositeetti lisää kitkaa, liian korkea viskositeetti lisää pyörimisvastusta laitteessa ja kulumapartikkelien suuri määrä kertoo mekaanisten komponenttien liiallisesta kulumisesta.

4.3 Ennakkohuollot Porvoon jalostamolla

Ennakkohuolloista Porvoon jalostamolla vastaa kunnossapitoyksikkö, jossa huoltojen suunnittelun hoitaa pääasiassa työsuunnittelija. Työsuunnittelijan apuna huoltojen suunnittelussa toimii myös käyttöinsinööri, tuotanto, työnjohtaja ja asentajat. Ennakkohuoltojen suunnittelussa huomioidaan laitteen koko, kriittisyys ja huollon vaativuus, sekä mahdolliset yksikön alasajot. Jalostamolla prosessilaitteet on kahdennettu, tarkoittaen että laitteista on kopio, joka voidaan ottaa käyttöön päälaitteen vikaantuessa. Laitteiden kahdentamisella varmistetaan prosessin jatkuvuus mahdollisissa vikatilanteissa. Laitteille, joilla on kahdennus, ei juurikaan suunnitella tai toteuteta ennakkohuoltoja, vaan laitteet korjataan sitä mukaan, kun ne vikaantuvat. Isommille laitteille, kuten jalostamon syöttöpumput ja isot turbokompressorit, suunnitellaan ennakkohuoltoja. Näitä ennakkohuoltoja ei kuitenkaan toteuteta käynnin aikana, vaan pääsääntöisesti suurseisokeissa ja yksikköseisokeissa.

Ennakkohuoltoja pienemmille laitteille, joilla on kahdennus, esimerkiksi keskipakopumput, toteutetaan kunnonvalvonnan, öljyhuoltojen ja apulaitteiden huoltamisen avulla. Apulaitteilla tarkoitetaan päälaitteen toimintoa avustavia laitteita, esimerkiksi lämmönvaihdin. Pumpun tullessa huoltoon, suoritetaan usein ennakoivaa komponenttien korvaamista, kuten laakereiden vaihtamista. Kunnonvalvonta myös mittaa säännöllisesti pyörivien laitteiden värähtelyt ja voitelupuoli tarkastaa ja ylläpitää laitteiden öljyä. Jalostamolla ei tällä hetkellä ole kattavaa ennakkohuoltosuunnitelmaa suurimmalle osalle laitteista ja täten sitä ei myöskään huomioida tuotantolinjojen budjeteissa.

4.4 Prosessiyksiköiden tutkimus

Tutkimusta varten keskipakopumppujen luokittelussa käytetään ainoastaan luokkia OH ja BB ilman alakategorioita, sillä pumppujen luokittelu niihin hankaloittaa tulosten selkeyttä. VS-luokka jätetään kokonaan pois, sillä tämä luokan pumppuja on jalostamolla enimmäkseen säiliöalueella, joka ei kuulu tutkittavaan osuuteen. Tutkimusta varten valittiin tuotantolinjoilta yksittäisiä prosessiyksiköitä ja tutkittiin niiden työtilaushistoriaa M+, sekä

John Crane tietokannan avulla. Tutkimus rajattiin yksittäisiin prosessiyksiköihin, sillä laitteita ja työtilauksia tulisi liian paljon tutkittavaksi, jos käsiteltäisiin kokonaisia tuotantolinjoja. Työtilauksia tutkiessa rajattiin pois kaikki epärelevantit kyseisen tutkimuksen kannalta, kuten tarkastuskäynnit, varaosakunnostukset ja työtilaukset, joissa ei ollut toimenpiteitä. Prosessiyksiköt valittiin yhteistoimin tuotantolinjan työsuunnittelijan kanssa ja tarkoituksena on löytää mahdollisimman erilaiset yksiköt, jotta nähtäisiin, kuinka pumppujen vikaantuminen eroaa prosessiolosuhteista riippuen. Vikahistoria rajattiin ajan puolesta niin, että työtilauksia olisi suurin piirtein saman verran yksikköjen välillä, jotta tulokset pysyisivät vertailukelpoisina.

Tutkimuksessa työtilaushistoria taulukoitiin, jonka jälkeen jokainen työtilaus tutkittiin yksitellen. Työtilauksista pyrittiin löytämään syy raportoidulle vialle, jonka usein pystyi selvittämään työtilauksen raportointi välilehdeltä. Poksivuotojen (mekaanisen tiivisteiden vuoto) kohdalla hyödynnettiin John Cranen kunnossapitojärjestelmää, johon vikaantuneiden poksien tarkastus raportoidaan usein yksityiskohtaisemmin kuin M+. Työtilauksia tutkiessa, taulukoitiin myös kustannukset, joita huoltoihin oli käytetty. Tuotantolinjakohtaista työsuunnittelijaa myös konsultoitiin pumppujen vikaantumisten selvittämisessä. Seuraavissa kappaleissa esitellään jokaisesta tutkitusta prosessiyksiköstä lyhyt esittely prosessin periaatteesta ja tutkimusten tulokset.

Tuotantolinjalta 4 (TL4) tutkimukseen valittu prosessiyksikkö oli asfalteenin erotusyksikkö SDA (Solvent Deasphalting), jossa pohjaöljystä erotetaan asfalteenit. Yksikön tarkoituksena on siis vähentää erittäin liikaavan asfalteenin määrää TL4 pohjaöljy-yksikön syötössä. Prosessissa tuotteena on DAO (Deasphalted oil) deasfaltoitu öljy, joka syntyy, kun raskaasta pohjaöljystä erotetaan vähempiarvoinen asfalteeni ja uutetaan siitä korkean jalostusasteen tuote. DAO erotetaan asfalteenista uuttamalla se parafiiniseen liuotinseokseen ja sitä käytetään syötteenä pohjaöljy-yksikössä. DAO erotuksen jälkeen jäljelle jäävä asfalteeni jäähdytetään pelleiksi pelletointikoneiden avulla. Valmiit pelletit kuljetetaan joko avolavoilla tai säiliöautolla kuluttajille. Asfalteenipellettejä voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitoksissa energian tuotantoon polttamalla niitä (Neste NMS, SDA prosessikuvaus OQD-171003).

Työtilauksia SDA-yksikössä oli yhteensä 110, joista rajattiin pois epärelevantit, jolloin tutkittavaksi jäi 74 työtilausta. Laitteita SDA-yksikössä oli yhteensä 16 kappaletta, joista 10 oli OH-luokan ja 6 BB-luokan pumppuja. Taulukossa 2 on esitetty yhteenveto SDA-yksikön työtilauksista.

Taulukko 2. SDA-yksikön yhteenveto.

Työtilaukset lkm.	74	
Laitteiden lkm.	16	10 kpl OH- ja 6 kpl BB-luokan pumppuja
Kustannukset yht.	449 203 €	
Vikatyytit	Lukumäärä	Yleisin syy
MKP vuoto	25	Prosessiolosuhteet, epäpuhtaudet tuotteessa
Poksivuoto	24	Voitelunpuute
Laakerivika	8	Voitelunpuute
Muu vuoto	6	Normaalikuluminen/käyttäjävirhe
Värinä/ääni	4	Komponenttivika
Tukkeuma	4	Epäpuhtaudet tuotteessa
Muu	3	Normaalikuluminen/käyttäjävirhe

Tuotantolinjalta 3 tutkimukseen valittu prosessiyksikkö oli NEXBTL 2 (Next generation Biomass to Liquid), joka on Porvoon jalostamon uusiutuvia polttoaineita tuottava yksikkö. NEXBTL 2 käyttää syöttöaineina esikäsiteltyjä kasviöljy- ja eläinrasvoja, jotka pumpataan lämmönvaihtimen kautta kolmifaasi vetykäsittelyreaktoriin, jossa vetykäsittely reaktion avulla syöttöaine konvertoidaan parafiinisiksi diesel-luokan hiilivedyksi, propaaniksi ja vedeksi. Konvertoitu tuote pumpataan reaktorin pohjasta välistripperiin, jossa hiilivetyneesteestä poistetaan siihen liuenneet rikkivedyt, hiilidioksidi, vesi ja ammoniakki. Strippauksen jälkeen tuote ohjataan isomerointireaktoriin, jossa parafiinit konvertoidaan

muuttamalla tuotteen samepistettä haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Konvertoinnin jälkeen tuote pumpataan stabilointikolonneihin, jossa tuotteet erotetaan toisistaan höyrystriippauksen avulla. Stabiloinnin jälkeen tuotteet jäädytetään, kuivataan ja tarvittavat lisäaineet lisätään, jonka jälkeen tuote on valmis lastattavaksi kuluttajille (Neste NMS, NEXBTL 2 prosessikuvaus OQD-101360).

Työtilauksia NEXBTL 2 -yksikössä oli yhteensä 120, joista rajattiin pois epärelevantit, jolloin tutkittavaksi jäi 80 työtilausta. Työtilauksia tutkittiin päivämäärästä 1.1.2015 eteenpäin. Laitteita NEXBTL 2 -yksikössä oli yhteensä 20 kappaletta, joista 19 oli OH-luokan ja 1 BB-luokan pumppuja. Taulukossa 3 on esitetty yhteenveto NEXBTL 2 -yksikön työtilauksista.

Taulukko 3. NEXBTL 2 -yksikön yhteenveto.

Työtilaukset lkm.	80	
Laitteiden lkm.	20	19 kpl OH- ja 1 kpl BB-luokan pumppuja
Kustannukset yht.	791 408 €	
Vikatyyppit	Lukumäärä	Yleisin syy
Poksivuoto	46	Suunnitteluvirhe
Muu vuoto	19	Käyttäjävirhe
Muu	11	Komponenttivika
Laakerivika	3	Normaali kuluminen
Värinä/ääni	2	Kuluminen/erosio

Tuotantolinjalta 2 tutkimukseen valittu prosessiyksikkö oli FCC (fluid catalytic cracking), joka on Porvoon jalostamolla toimiva prosessi öljyjen muuntamisessa kevyemmiksi tuotteiksi. Yksikön syöttöaineena käytetään pääosin raskasta kaasuöljyä ja raskasta bensiiniä, joista krakataan yksikön reaktoriosassa arvokkaampia nestekaasu- ja bensajakeita.

Krakkausreaktiossa käytännössä pilkotaan pitkäketjuiset hiilivedyt pienemmiksi ketjuiksi. Krakkaus tapahtuu pääosin reaktorin ulkopuolella, josta krakattu tuote ohjataan itse reaktoriin, jonka sisällä on sykloni, missä hiilivetyjen ja katalyytin erotus tapahtuu. Erotusmenetelmä perustuu eri virtausnopeuksiin ja katalyyttipartikkeleiden massaan, jossa hiilivedyt ohjataan pyörivään liikkeeseen, jonka seurauksena hiilivedyt kulkevat kartio-osan kautta ulos ja massaltaan suurempi katalyytti putoaa alas. Katalyytti ohjataan stripperiin, jossa höyryn avulla haihdutetaan katalyytin huokosiin jääneitä hiilivetyjä. Yksikköön kuuluu myös regeneraattori, jossa krakkausreaktioiden aikana katalyytin pintaan syntynyt koksi poltetaan pois, jotta katalyytin aktiivisuus palautuu entiselle tasolle. Katalyytin aktiivisuudella tarkoitetaan sen kykyä muuttaa prosesseissa käytettyjä öljyjä tietyissä reaktioissa halutuiksi tuotteiksi (Neste NMS, FCC prosessikuvaus OQD-1103).

Työtilauksia FCC-yksikössä oli yhteensä 116 kpl, josta tutkittavaksi jäi 89 kpl. Työtilaukset rajattiin 1.1.2016 eteenpäin, jotta otannan määrä pysyisi halutulla tasolla. Laitteita FCC-yksikössä oli yhteensä 30 kappaletta, joista 29 oli OH-luokan ja 1 BB-luokan pumppuja. Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto FCC-yksikön työtilauksista.

Taulukko 4. FCC-yksikön yhteenveto.

Työtilaukset lkm.	89	
Laitteiden lkm.	30	29 kpl OH- ja 1 kpl BB-luokan pumppuja
Kustannukset yht.	441 790 €	
Vikatyytit	Lukumäärä	Yleisin syy
Poksivuoto	60	Prosessiolosuhteet
Muu	10	Komponenttivika
Laakerivika	8	Normaali kuluminen
Värinä/ääni	5	Komponenttivika/asennusvirhe
Muu vuoto	4	Komponenttivika/löysä liitos
Tukkeuma	2	Epäpuhtaudet tuotteessa

Tuotantolinjalta 1 tutkimukseen valittu prosessiyksikkö oli VK (vetykrakkaus), joka on prosessiyksikkö, jossa kemiallisen krakkaus reaktion avulla pilkotaan hiilimolekyylit pienemmiksi ketjuiksi. Yksikön syöttöaineena käytetään 100 % vetyä, joka reagoi prosessissa oleviin typpi-, rikki- ja happiyhdisteisiin muodostaen rikkivetyä, ammoniakia ja vettä. Krakkausreaktio tapahtuu reaktoreissa, johon vety syötetään kompressorin avulla ja muut prosessiaineet pumppujen avulla. Reaktoreihin syötettävät tuotteet vaativat tietyn lämpötilan prosessien toimivuuden kannalta, joten yksikössä käytetään lämmönvaihtimia ja uunia säätelemään tuotteiden lämpötiloja. Prosessin reaktiot ovat vahvasti eksotermisiä, jonka seurauksena vapautuu suuri määrä lämpöä. Lämpötilojen noustessa liian korkeaksi reaktioiden karkaamisesta riski kasvaa. Tämän vuoksi jäähdytys prosessiyksikölle on erittäin tärkeää. Prosessissa syntyvät tuotteet ovat poltto- ja nestekaasut, sekä kaasu- ja pohjaöljy. Kaikki prosessissa syntyvät tuotteet ajetaan jatkojalostukseen muihin prosessiyksiköihin, jossa niistä jalostetaan esimerkiksi lentopetrolia, dieseliä ja bensiiniä (Neste NMS, VK prosessikuvaus OQD-715).

Työtilauksia VK-yksikössä oli yhteensä 134 kpl, josta tutkittavaksi jäi 75 kpl. Työtilaukset rajattiin 1.1.2011 eteenpäin, jotta otannan määrä pysyisi halutulla tasolla. Laitteita VK-yksikössä oli yhteensä 28 kappaletta, joista 27 oli OH-luokan ja 1 BB-luokan pumppuja. Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto FCC-yksikön työtilauksista.

Taulukko 5. VK-yksikön yhteenveto.

Työtilaukset lkm.	75	
Laitteiden lkm.	28	27 kpl OH- ja 1 kpl BB-luokan pumppuja
Kustannukset yht.	472 043 €	
Vikatyytit	Lukumäärä	Yleisin syy
Poksivuoto	34	Epäpuhtaudet tuotteessa
Muu vuoto	17	Komponenttivika
Muu	10	Komponenttivika
Laakerivika	7	Normaali kuluminen
Värinä/ääni	5	Komponenttivika
Tukkeuma	2	Epäpuhtaudet tuotteessa

4.4 Case-merivesipumput

Merivesipumput sijaitsevat TL1-jäähdytysvesilaitoksen merivesimontussa ja tuottavat jäähdytyksen jalostamon kaikille TL1-, TL2- ja TL4-prosesseille. Pumppuja on yhteensä 4 kappaletta ja niiden yhteenlaskettu maksimikapasiteetti on 69 500 m³/h. Alla taulukossa 6 on esitetty yleistä tietoa pumpuista.

Taulukko 6. Yleistä tietoa pumpuista.

Laitetunnus	Asennusvuosi	Käyttölaitteen teho	Kapasiteetti	Tyyppi
GA-8601	1972	900 kW	11 000 m ³ /h	Säädettäväsiipinen potkuripumppu
GA-8602	1972	900 kW	11 000 m ³ /h	Säädettäväsiipinen potkuripumppu
GA-8603	1974	1000 kW	17 500 m ³ /h	Säädettäväsiipinen potkuripumppu
GA-8604	1987	1120 kW	30 000 m ³ /h	Pystysuora betonipesäpumppu

Pumput GA-8601–GA-8603 ovat vanhemman mallisia säädettäväsiipisiä potkuripumppuja, joiden tuottoa voidaan muunnella säätelemällä potkurin lapakulmia. Mitä isompi lapakulma, sitä isompi tuotto tja päinvastoin. Nämä pumput ovat tekniikaltaan vanhoja ja niillä päästään jalostamon olosuhteissa vain n. 55–60 % hyötysuhteeseen. GA-8604 on hieman uudempi pystysuora betonipesäinenpumppu, joka on alun perin suunniteltu tulvaveden poistoon. Tällä pumpulla on huomattavasti suurempi tuotto verrattuna muihin merivesipumppuihin ja hyötysuhteessa päästään jopa 77,5 % asti. Alla olevassa kuvassa 18 nähdään potkurimallinen merivesipumppu matkalla huoltoon.



Kuva 18. Merivesipumppu matkalla huoltoon.

Jalostamolla lähes kaikki prosessipumput on kahdennettu, tarkoittaen että varalaitte on kytkettynä prosessiin ja päälaitteen vikaantuessa, voidaan varalaitte ottaa käyttöön pysäyttämättä prosessia. Merivesipumpuille ei kuitenkaan ole varalaitteita, sillä tuotantolinjojen jäähdytysveden tarve on suoraan verrannollinen meriveden lämpötilaan. Karkean arvion mukaan vuodessa on noin neljä kuukautta, jolloin meriveden lämpötila ylittää 10 astetta, jolloin kaikkia pumppuja tulee tilanteen mukaan ajaa yhtäaikaaisesti. Muina aikoina meriveden lämpötila pysyy alle 10 asteen, joten kaikkia pumppuja ei tarvitse ajaa yhtä aikaan. Loppukesästä, kun merivesi on lämpimimmillään pitää kaikki pumppuja ajaa yhtäaikaaisesti, jotta saavutetaan tarvittava jäähdytys tuotantolinjojen prosesseille.

Pumppujen käyttö on suunniteltu niin, että tuotoltaan suurin GA-8604 on koko ajan käytössä ja muita pumppuja käytetään täydentämään jäähdytyksen tarvetta. Yksi pumppu noin kahdeksana kuukautena vuodesta on pois käytöstä ja toimii ”varalaitteena” muille pumppuille.

4.4.1 Kunnossapitokatsaus

Pumppuille GA-8601–GA-8603 on määrätty ennakkohuolto kuuden vuoden välein, jossa pumpulle tehdään täyshuolto. Tämän lisäksi öljyanalyysi suoritetaan kuuden kuukauden välein ja operaattoreiden toimesta värinämittaukset tulisi suorittaa joka vuorossa. Tietokantoja tarkastellessa kävi kuitenkin ilmi, että värinämittauksia ei ole viime vuosina suoritettu lainkaan ja syy tähän ei ole tiedossa. Konetarkastajat suorittavat myös määräajoin (noin kahden kuukauden välein) tarkemmat värähtelymittaukset. Ennakkohuollot näiden pumppujen kohdalla on määritetty niin, että ne tulee suorittaa vähintään kuuden vuoden välein, mutta pumppujen kanssa on toimittu siten, että kerran vuodessa aina mahdollisuuksien mukaan otetaan yksi näistä pumpuista huoltoon. Huoltohistoriaa tarkasteltaessa voidaankin huomata, että pumppuja on usein huollettu ennen määräajan täyttymistä. Myös öljyanalyysit on suoritettu ajallaan, lukuun ottamatta GA-8602-pumppua, jonka öljyanalyysi on noin kuusi kuukautta myöhässä, sillä pumppu ei ollut ajossa näytteenottohetkellä.

Suuri osa GA-8601–GA-8603 vikahistoriasta on poksivuotoja, sillä näissä pumpuissa on ns. narupoksi, jossa käytetään grafiittinauhaa ja kiristysmutteria tiivistämään pumpun akseli. Kyseinen tiivistemalli on suunniteltu niin, että sen kuuluu vuotaa toimiakseen halutulla tavalla ja vuodon kasvaessa liian suureksi, käydään tiivistettä kiristämässä. Jos tiiviste ei vuoda, silloin se ylikuumenee ja vaurioituu. Tiivistettä voidaan kiristää, kunnes säätövara loppuu, jonka jälkeen grafiittinauhat tulee vaihtaa uusiin. Etuna kyseisessä menetelmässä on sen helppous ja kustannustehokkuus, sillä tiivisteiden alkaessa vuotaa liikaa, voidaan se kiristää pumpun ollessa käynnissä. Muut työtilaukset ovat pääasiassa muita kunnossapitoja ylläpitotöitä pumppujen apulaitteille.

GA-8604:n yläpään laakerointi on öljyvoideltu ja alapäälaakerointi on rasvavoideltu. Yläpään laakerin voiteluöljystä ei oteta näytteitä, sillä näytteenottoaika puuttuu. Öljyjen vaihdoista ei myöskään ole minkäänlaista kunnossapitosuunnitelmaa, jonka seurauksena öljyjä vaihdetaan aivan liian harvoin. Edellinen öljynvaihto laakerointiin on suoritettu suurseisokissa vuonna 2015. Alapään laakeroinnista rasvat vaihdetaan/lisätään kerran vuodessa. Pumpulle on myös määrätty päivittäinen värinöiden mittaus operaattoreiden toimesta (joka muiden pumppujen tapaan ei ole suoritettu lainkaan), sekä määräajoin konetarkastajien suorittama värinämittaus. Pumpulla on määrätty ennakkohuolto, joka on osittain puutteellinen ja sitä ei ole suoritettu kunnossapitohistorian perusteella kertaakaan. Pumpun valmistajan mukaan täyshuoltoväli on yli 10 vuotta, mutta jalostamo-olosuhteissa pumppua olisi hyvä huoltaa muiden tapaan 6 vuoden välein. Pumppu on käytössä vuoden ympäri jatkuvasti ja on ollut käytössä jo vuodesta 1987 asti ilman yhtäkään täyshuoltoa. Pumpun kuntoa on tarkastettu muutamaan otteeseen vuosien saatossa ja se on toiminut vikahistorian perusteella huomattavasti luotettavammin, kuin kolme muuta pumppua.

4.4.2 Luotettavuuskatsaus

Pumpuilla GA-8601–GA-8603 on tehty useita muutoksia luotettavuuden parantamiseksi, kuten laakeroinnin muutoksia ylä- ja alapäässä, materiaalimuutoksia ja vaihteiden parannuksia. Pumput on toimitettu alun perin valmistajan omalla voitelujärjestelmällä, joka osoittautui puutteelliseksi, jonka vuoksi pumpuille on rakennettu ulkoinen voitelujärjestelmä eli öljykoneikot. Pumppujen nostokorkeus on myös mitoitettu väärin ja potkuripumput kärsivät tästä paljon. Suunnitellun nostokorkeuden saavuttamiseksi pumppuja pitää ajaa suurella lapakulmalla (noin 18 astetta), jonka seurauksena pumppu kavitoi. Kavitointi lakkaa, kun lapakulma lasketaan noin 12 asteeseen, joka puolestaan pienentää pumpun tuottoa ja laskee hyötysuhdetta. Kavitoinnin vuoksi lapakulmia ei säädetä (pois lukien alasajot) vaan ne on asetettu 12 asteeseen. Tämän vuoksi tuotto ja hyötysuhde kärsivät, kuten liitteen 8 pumppukäyrästä voidaan todeta.

Pumppujen GA-8601–GA-8603 valmistaja Alhström on lopettanut toimintansa, jonka seurauksena varaosien saatavuus tänä päivänä on hankalaa. Varaosia on vielä saatavilla

Sulzerin toimittamana, mutta potkuripumppujen lapakulmien säätöön käytettävät komponentit ovat kuluvia osia ja niitä ei enää valmisteta. Varaosien saatavuuden lisäksi pumput kärsivät meriveden aiheuttamasta korroosioista, joka on osoittautunut ongelmaksi vuosien saatossa. Korroosion aiheuttamia ongelmia on pyritty estämään materiaalimuutoksilla. Huolloissa ja varaosissa tulee ottaa huomioon, että yritys on täysin riippuvainen Sulzerin palveluista ja vaihtoehtoista palveluntoimittajaa ei ole.

GA-8604 voidaan pitää luotettavuudeltaan parempana muihin merivesipumppuihin verrattuna, sillä turbiinikäyttöinen pumppu ei kärsi kavitointi ja lapakulmien säätöjen aiheuttamista ongelmista. Pumppu käyttää myös betonista valetutta pesää, joka ei ole altis meriveden aiheuttamalle korroosiolle. Pumppua ajetaan vuoden ympäri koko ajan ja se on toiminnoiltaan hyvin kriittinen pumppu. Täyshuoltoa on kuitenkin laiminlyöty, joka laskee luotettavuutta. Pumpun mahdollinen huolto tulisi ajoittaa talvelle tai keväälle, jolloin merivesi on viileää, tai huoltoseisokkiin, jossa prosessit on pysäytetty. Muuna aikana pumppua ei voida huoltaa, sillä jäljelle jäävien pumppujen kapasiteetti ei riitä tuotantolinjojen prosessien jäädytykseen. Pumpun valmista Stork on myös lopettanut toimintansa ja huolloista vastaa tällä hetkellä Flowserve.

Tulokset on esitetty lukuarvoina, taulukoituna ja sanallisesti, jonka pohjalta voidaan siirtyä analysointiin. Analysoinnissa viitataan tämän kappaleen tuloksiin, joiden avulla pohditaan syitä, seurauksia ja toimenpiteitä, jotka ovat johtaneet vikaantuvuuksien ilmenemiseen.

5. Tulosten analysointi

Tässä luvussa analysoidaan edellisessä luvussa esitettyjä, tutkimuksesta saatuja tuloksia, perehtymällä tarkemmin vikaantumisten syihin ja seurauksiin. Prosessiyksiköiden analysoinnissa hyödynnetään vikapuuanalyysia ja case-tutkimuksessa hyödynnetään VVA:ta, kriittisyysluokittelua ja RCM-toimenpiteitä.

5.1 Tuotantolinja 4, asfalteenin erotus

SDA-yksikössä suurin vikatyyppe oli magneettikytkinpumppuvuoto, jossa tuotteessa olevat partikkelit aiheuttivat vuodon. SDA-yksikössä pumppuja GA-77006 ja GA-77006S käytetään pumppaamaan prosessissa syntyvää hapanvettä hapanvesiyksikköön. Kyseiset pumput ovat magneettikytkimellä varustettuja pumppuja, joissa tuote hoitaa liukulaakerien voitelun ja sisämagneetin jäähdytyksen. Hapanvesi sisältää paljon kiintoaineita, joka kerääntyy pumpun sisälle ja kuluttaa sisä- ja ulkomagneetin välissä olevan erotusastian puhki, mikä puolestaan aiheuttaa tuotteen vuotamisen ympäristöön tai magneetikoteloon. Kun tuote vuotaa ympäristöön, vika havaitaan todennäköisesti päivittäisillä kenttäkierroksilla, mutta tuote saattaa myös vuotaa kotelosta voiteluöljyn sekaan, jolloin vika huomataan vasta, kun pumpun kuulalaakerointi vaurioituu. Kun tuote sekoittuu voiteluöljyyn, sen laatu heikkenee, joka lisää kitkaa, täten aiheuttaen laakerivaurioita. Magneettikytkimen vuotoja oli raportoitu M+ -järjestelmään hyvin paljon virheellisesti poksivuotona, sillä pumpussa ei ole mekaanista tiivistettä.

Toiseksi yleisin vikatyyppe oli keskipakopumpuille hyvin tyypillinen poksivuoto, eli mekaanisen tiivisteiden vikaantuminen. Poksivuodolle on hyvin monta mahdollista syytä ja se riippuu aina laitteesta, poksien tyypistä, mahdollisesta tiivistenestejärjestelmästä ja prosessiolosuhteista. Yleisin syy poksivuodon aiheuttajalle SDA-yksikössä oli voitelunpuute, joka johtui joko ylikuumentumisesta tai tiivistenesteen laadun heikkenemisestä. Luvussa 2.7.2 on kuvattu perinteisen mekaanisen tiivisteiden toimintaperiaate ja siinä esitetyn liukurenkaan ja vastarenkaan välinen pinta vaurioituu, kun

voitelunpuutetta esiintyy. Ylikuumeneminen syntyi koska tiivisteneen kierrätys lämmönvaihtimien kautta oli liian vähäistä, jonka seurauksena lämpötila kohosi liian suureksi ja voiteluominaisuudet heikkenivät. Ylikuumenemisiongelma on pyritty korjaamaan ylimääräisellä tiivisteneen kierrätyspumpulla. Kun tuote pääsee tiivisteneen sekaan, tarkoittaa se yleensä, että poksi ei ole tiivis ja täten nesteet sekoittuvat keskenään heikentäen voiteluominaisuuksia.

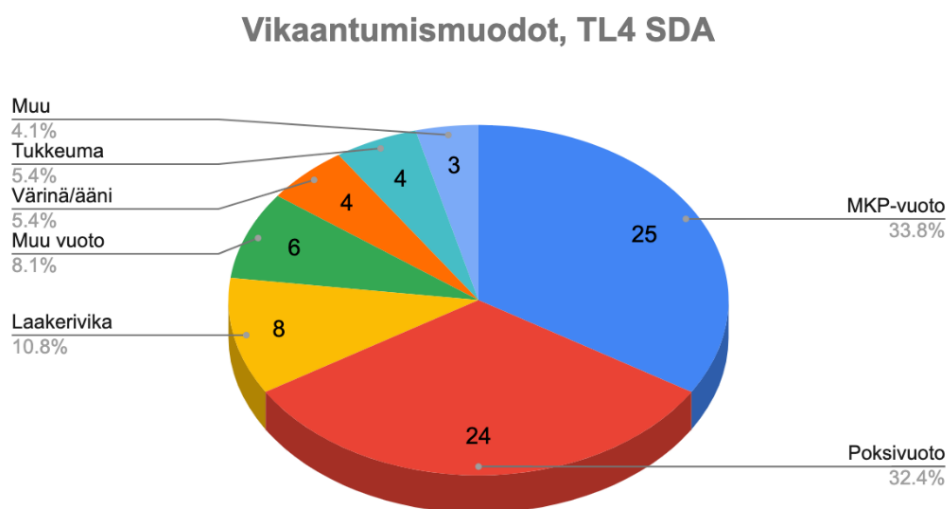
Kolmanneksi yleisin vikatyyppejä oli laakerivika, jossa vian aiheuttivat voitelunpuute, ruoste, ja normaali kuluminen. Laakeriviat yleensä havaitaan ylimääräisenä äänenä/värinä kenttäkierroksien yhteydessä tai konetarkastajien värinämittausten avulla. SDA-yksikössä laakerivikoja aiheutti normaalin kulumisen lisäksi voitelunpuute ja ruoste, joista molemmat voivat aiheutua joko tuotteen, tai veden pääsystä pumpun voiteluöljyn sekaan. Laakeriviat ovatkin vahvasti kytköksissä poksivuotoihin, sillä poksivuotaessa tuote pääsee voiteluöljyn sekaan. Muutamassa työtilauksessa kävi ilmi, että laakerit, jotka tulisi rasvata säännöllisesti olivat käyneet kuivana, mikä on aiheuttanut vaurion. Osassa ilmenneistä laakerivaurioista havaittiin ruostetta, joka on johtunut veden pääsystä laakeripukkiin.

Muu vuoto -vikatyypillä tarkoitetaan vuotoja, jotka eivät johdu poksista tai magneettikytkimen vuodosta. Tällaisia vuotoja ovat esimerkiksi öljykupin vuoto halkeamisen johdosta tai imuvesiletkun vuoto murtumisen johdosta. Nämä vuodot johtuivat joko normaalista käytössä kulumisesta, tai käyttäjävirheistä, jossa omalla toiminnalla oli vahingoitettu komponenttia, jonka seurauksena vuoto oli aiheutunut. Yhdessä työtilauksessa kävi myös ilmi, että kyseessä oli suunnitteluvirhe, jossa tiivistemateriaalin valinta aiheutti höyryn tiivistymisen tiivisteöljyn sekaan.

Muita vikatyyppejä, joita vikahistoriaa tutkiessa ilmeni, oli värinä/ääni, tukkeuma, muu ja tiivistevuoto. Värinä/ääni vikatyypin aiheutti usein komponenttivika, jossa laitteen jokin osa oli viallinen tai irronnut. Tällaisia olivat esimerkiksi suojalaipat ja erilaiset vioittuneet kiinnitykset. Värinää ja ääntä voi myös aiheuttaa alkava laakerivika tai eräässä tapauksessa suunnitteluvirhe, jossa pumpun peti värähtelee. Tukkeumat aiheutti täysin prosessin

kiintoaineet, jotka tukkivat suodattimia. Muu-vikatyyppit olivat yksittäistapauksia, joista on hankala luoda johtopäätöksiä, joten ne eivät ole tutkimuksen kannalta merkittäviä.

Alla olevassa kuvassa 19 on esitetty yhteenveto SDA-yksikön vikaantumismuodoista taulukon 2 mukaisesti.



Kuva 19. SDA vikaantumismuodot.

5.2 Tuotantolinja 3, uusiutuvat polttoaineet

NEXBTL 2 -yksikössä yleisin vikatyyppe oli poksivuoto, jonka pääasiassa aiheutti suunnitteluvirhe mekaanisten tiivisteiden materiaalivalinnassa. Vikaantumismuotoa tutkiessa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että vuonna 2015 käyttöönotettu NEXBTL-teknologia oli aikanaan ainutlaatuista, jonka seurauksena edellytyksiä sopivalle materiaalivalinnalle ei juurikaan ollut. Tietoa sopivasta materiaalista ei siis ollut olemassa, joten kokeilujen ja erehdysten myötä materiaalivalinta on saatu ainakin toistaiseksi sopivaksi. Kyseinen materiaalivalinta koski pääasiassa hiilivetyä pumppaavia laimennuskiertopumppujen riviä, johon kuului kolme pumppua: GA-85103A-C. Mekaanisten tiivisteiden paljemateriaali, joka alun perin koostui nikkelin, kromin ja muiden

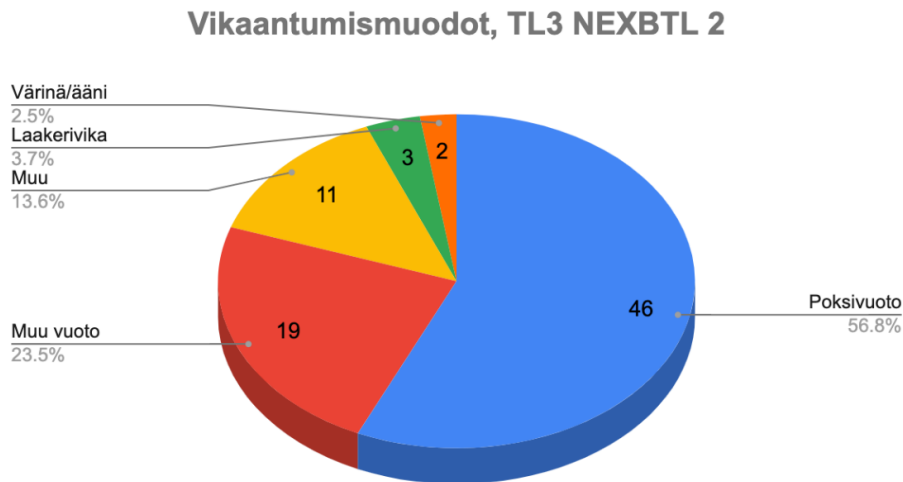
metallien seoksesta todettiin olevan epäsovelia kyseiseen prosessiin. Aikavälillä 1.1.2015 - 1.1.2020 kyseisen materiaalivalinnan aiheuttamiin poksivuotoihin kului noin 260 000 € kunnossapitoon ja korjauksiin. Vuoden 2017 alkukeväästä mekaanisten tiivisteiden paljempimateriaaliin ehdotettiin muutosta ja materiaaliksi vaihdettiin austeniittinen metalliseos, joka kestää prosessiolosuhteet paremmin. Viimeinen poksi vanhalla materiaalilla vaihdettiin vuonna 2020, jonka jälkeen pumppujen vikaistoria on huomattavasti parantunut. Loput syyt prosessiyksikön poksivuodoille jakautuivat hyvin tasaisesti normaalin kulumisen, komponenttivian, prosessiolosuhteiden ja muun välillä. Näissä vikaantumisen syissä ei ole mitään poikkeuksellista tai kohdetta, johon tulisi puuttua. Poksin normaalilla kulumisella tarkoitetaan noin 5 vuoden tai pidempää käyttöjaksoa ilman huoltoa.

Toiseksi yleisin vikatyypin oli muu vuoto, joka kyseisessä prosessiyksikössä koostui lähinnä öljy- ja glykolivuodoista, jotka eivät aiheutuneet viallisesta mekaanisesta tiivisteestä. Näihin yleisiin syyt oli joko komponenttivika, jossa esimerkiksi tiivisteet tai kytkin oli pettänyt, tai käyttäjävika, jossa esimerkiksi öljykuppi oli hajonnut tai jokin liitos jäänyt löysälle.

Kolmanneksi yleisin kategoria oli muu, jossa pääasiassa oli komponenttivikojen aiheuttamia häiriöitä. Esimerkkinä pumppu ei lähtenyt tuottamaan virtausta ja selvisi, että voimansiirrossa käytettävä magneettikytkin oli viallinen. Tässä vikatyypissä ei ollut normaalia poikkeavia työtilauksia.

Loput vikatyypit olivat värinä/ääni ja laakeriviat, joita oli vain yksittäisiä, eli ei mitään tavallisesta poikkeavaa. Huomattava on kuitenkin, että laakerivikoihin on syytä kiinnittää huomiota, sillä niitä oli vain kaksi, joihin oli tullut kustannuksia ja niiden yhteenlaskettu summa oli noin 27 000 €. Eli kuten summasta voidaan päätellä, laakeriviat ovat erittäin kalliita korjata, sillä siihen sisältyy paljon purkamista, paljon työtunteja ja esimerkiksi poksi vaihdetaan aina laakerihuollon yhteydessä. Jos laakerit ehtivät tuhoutua kokonaan, ennen kuin vika huomataan, niin pumpusta saattaa vikaantua erittäin kalliita osia, kuten akseli ja juoksupyörä, jotka tulee joko kunnostaa tai vaihtaa uusiin.

Alla olevassa kuvassa 20 on esitetty yhteenveto vikaantumismuodoista taulukon 3 mukaisesti.



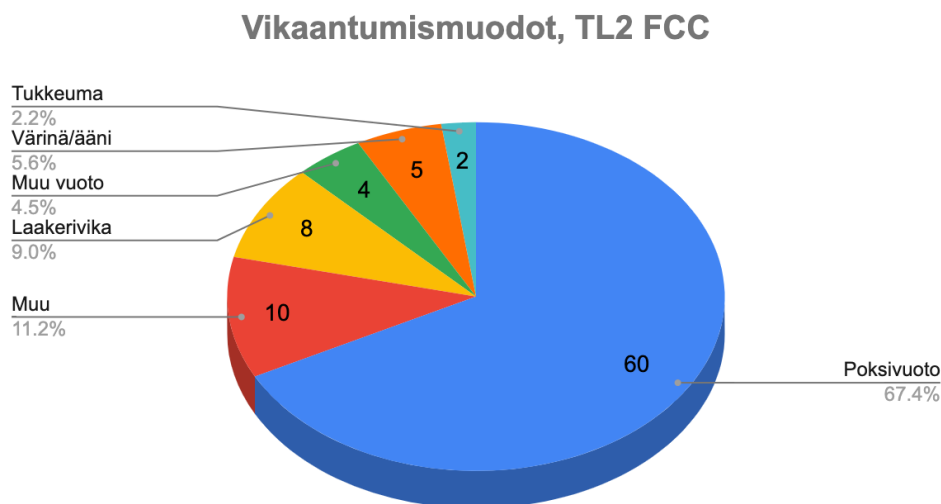
Kuva 20. NEXBTL 2 vikaantumismuodot.

5.3 Tuotantolinja 2, leijukatalyyttinen krakkaus

FCC-yksikössä yleisin vikatyyppe oli tyypillinen poksivuoto, jonka pääasiassa aiheutti prosessin luonne, sekä häiriöt prosessissa. Koksautuminen oli suurin poksivuotojen aiheuttaja, jossa pumpattavassa tuotteessa oleva koksi kerääntyy poksien pinnoille, aiheuttaen ongelmia voitelun ja kitkan kanssa. Krakkausreaktiossa katalyytin pintaa kertyy koksia, joka poltetaan pois FCC-yksikön regeneraattorissa. Koksia kuitenkin usein jää katalyytiin sekaan, jossa se kulkeutuu pumppujen mekaanisten tiivisteiden pinnoille, aiheuttaen vahinkoa. Koksautumisongelmaa on pyritty lieventämään API PLAN 62 -tiivistenestejärjestelmällä, jossa käytetään vesihöyryä tiivistämään tiivistepinta. Kyseinen tiivistenestejärjestelmä on suunniteltu ehkäisemään koksien ja muiden epäpuhtauksien syntymistä tiivisten pinnoille. (Aesseal). Poksivuotoja aiheutti myös runsaasti häiriöt prosessissa, jotka pääasiassa johtuivat FCC-yksikön ylös- ja alasajoista erinäisten prosessivirheiden ja huoltotoimenpiteiden vuoksi. Loput syyt poksivuodoille jakautuivat tasaisesti kulumisen, komponenttivikojen ja käyttäjävirheiden ynnä muiden vastaavien välille, jossa ei havaittu mitään tavanomaisesta poikkeavaa.

Toiseksi yleisin vikatyyppe oli muu, joka koostui pääasiassa komponenttivioista ja käyttäjäpohjaisista virheistä. Komponenttivikoihin kuului erilaisten venttiilien vikaantumista ja käyttäjävirheisiin muun muassa virheellisiä ilmoituksia, suunnitteluvirheitä ja operointivirheitä. Tässä vikatyypissä ei ollut mitään tavallisesta poikkeavaa. Loput vikatyypit jakautuivat laakerivikojen, muu vuoto, värinä/ääni ja tukkeuman välille ja näiden vikaantumismuotojen keskuudesta ei löytynyt mitään poikkeavaa.

Alla olevassa kuvassa 21 on esitetty yhteenveto vikaantumismuodoista taulukon 4 mukaisesti.



Kuva 21. vikaantumismuodot.

5.4 Tuotantolinja 1, vetykrakkaus

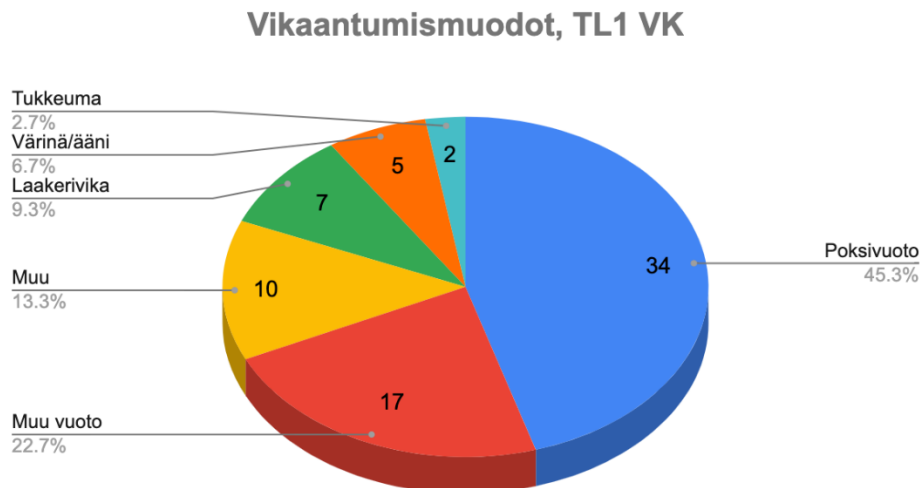
VK-yksikössä yleisin vikaantumismuoto oli jälleen poksivuoto, joka pääasiassa aiheutui pumpattavan tuotteen epäpuhtauksista. Kuten FCC-yksikössä, niin myös VK-yksikössä oli ongelmia mekaanisen tiivisteiden pintojen koksautumisen kanssa. Myös muita epäpuhtauksia, kuten partikkeleita ja ruostetta tuotteen mukana aiheutti mekaanisten tiivisteiden ennenaikaista vikaantumista. Epäpuhtauksien aiheuttamia vikaantumisia

pyritään vähentämään suodattimien avulla, sekä hyödyntämällä API plan 62-järjestelmää, joka ehkäisee tehokkaasti epäpuhtauksien aiheuttamia poksivuotoja. Yksikössä ilmeni myös poikkeuksellisen paljon poksivuotoja, jotka luokiteltiin normaalin kulumisen kategoriaa, eli mekaaninen tiiviste on ylittänyt laskennallisen käyttöikänsä, 5 vuotta tai enemmän. Tämä viittaa siihen, että monelta osin prosessi ja pumput toimivat suunnitellulla tavalla. Muita poksivuotojen aiheuttajia, olivat satunnaiset virheet prosessissa, komponenttiviati ja käyttäjäperäiset virheet. Näissä vikaantumismuodoissa ei ollut huomioitavaa.

Muu vuoto vikaantumista oli kohtuullisen paljon ja yleisin aiheuttaja tälle vikaantumismuodolle oli komponenttivika. Muu vuoto kategoria kattaa monia eri tilanteita ja VK-yksikössä näitä oli glykoli- ja öljyvuodot. Komponenttiviati koostuivat viallisista öljykupeista, huohottimista ja vuotavista glykolipesistä, jotka olivat lähinnä käytön myötä vikaantuneet. Loput vuodot aiheutuivat pääasiassa käyttäjäperäisistä virheistä, kuten asennusvirheistä ja löysistä liitoksista. Loput yksikön vikatyypit jakautuivat laakerivikojen, muu, värinä/ääni ja tukkeuman välille ja näiden vikaantumismuotojen keskuudesta ei löytynyt mitään poikkeavaa.

Työtilauksia läpi käydessä huomioon kiinnittyi GA-251-hapanvesipumppu, jolla oli ilmennyt 3 poksivuotoa vuoden sisään. Lukumäärä on suuri näin lyhyessä ajassa ja poksihuoltojen raportteja tarkastaessa ilmeni seuraavat seikat: Yksi vuodoista ilmeni heti asennuksen jälkeen, jonka yhteydessä huomattiin, että tiivisteestä puuttui iso palanen, jonka arvellaan irronneen asennusvirheen myötä. Toinen vuodoista raportoitiin niin, että tiivistenesäiliö vuotaa yli. Kyseisessä järjestelmässä tiivisteeseen kuuluu vuotaa tuotetta säiliöön, jonka vuoksi sen pinta nouse ja säiliö tulee tyhjentää tietyin aikaväleihin. Kyseessä oli siis operointivirhe, sillä järjestelmä toimi suunnitellusti ja mekaaninen tiiviste vaihdettiin turhaan. Kolmas vuoto ilmeni, kun poksitiivisteistä löydettiin likaa. Edellisestä huollosta oli noin vuosi, tarkoittaen että prosessissa oli ylimääräisiä epäpuhtauksia. Kaksi näistä poksivuodoista olisi ollut helposti vältettävissä oikeanlaisella kouluttamisella ja ohjeistuksella poksien ja niiden tiivistenesjärjestelmien käyttöön. Nämä kaksi työtä toivat kunnossapidolle noin 6 500 € kustannuksia.

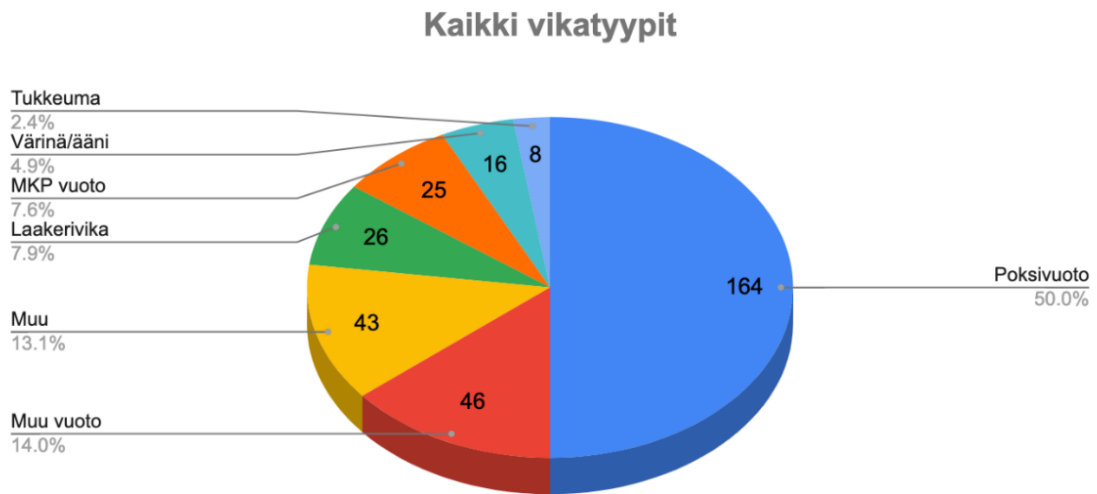
Alla olevassa kuvassa 22 on esitetty yhteenveto vikaantumismuodoista taulukon 5 mukaisesti



Kuva 22. Vikaantumismuodot.

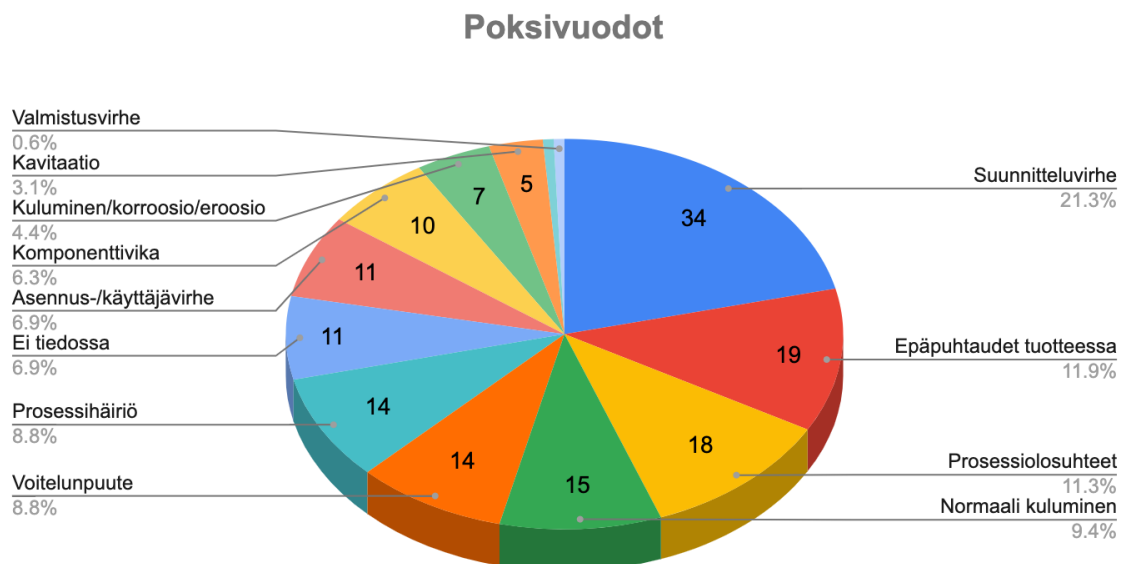
5.5 Tuotantolinjojen yhteenveto

Keskipakopumppujen vikaantumisten tilastollista tarkastelua vikahistorian avulla tutkittiin neljässä eri prosessiyksikössä. Tutkimuksessa kävi ilmi yleisimmät vikatyypit ja niiden aiheuttajat kyseisten prosessiyksiköiden kohdalla. Kuvassa 23 on esitetty ympyrädiagrammina vikatyypien jakautuminen.



Kuva 23. Vikatyypien jakautuminen.

Selvästi yleisin vikaantumismuoto oli poksivuoto, joka kattaa 50 % kaikista työtilauksista. Poksivuodoille löytyi hyvin monia eri juurisyitä ja yhteenveto niistä on esitetty alla kuvassa 24.



Kuva 24. Poksivuotojen juurisyitä.

Tutkimuksen perusteella yleisin syy poksivuodolle oli suunnitteluvirhe, joka kattaa hieman yli 20 % kaikista juurisyyistä. Diagrammia tarkastellessa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että suunnitteluvirheitä oli yhteensä 34 kpl ja niistä 27 kpl tapahtui pelkästään NEXBTL 2-yksikössä. NEXBTL 2 -yksikössä mekaanisen tiivisteiden paljempimateriaalin valinta oli mennyt pieleen, joka johti siihen, että yksikön vikahistoriaa tarkastellessa yli 50 % kaikista poksivuodoista luokiteltiin suunnitteluvirheeksi. Jos kyseinen yksikkö otettaisiin tarkastelusta pois, tippuisi suunnitteluvirhe juurisyyinä lukumäärällisesti pienimpien joukkoon.

Prosessista tai sen luonteesta johtuvat juurisyyt olivat suunnitteluvirheen jälkeen suuressa osassa pumppujen poksivuodoissa. Tähän luokitukseseen voidaan lukea epäpuhtaudet tuotteissa ja prosessiolosuhteet. Tuotteissa olevat epäpuhtaudet näkyivät tarkastelussa katalyyttien mukana kulkeutuvassa koksissa, kiintoaineina esimerkiksi hapanveden seassa ja ruosteena, sekä muuna likana, joka oli usein lähtöisin joko putkistoista tai säiliöistä. Epäpuhtauksista syntyviä vikaantumisia pyritään estämään erilaisilla suodatus- ja tiivistenestejärjestelmillä, joiden toiminta on ollut vaihtelevasti onnistunutta.

Voitelunpuute syntyi pääasiassa tiivistenestejärjestelmän puutteellisesta toiminnasta tai itse tiivistenesteen liian korkeasta lämpötilasta. Tiivistenestejärjestelmän tarkoituksena on kierrättää tiivistenestettä akselin ja mekaanisen tiivisteiden tiivistepinnan välissä, muodostaen kalvon, joka tiivistää pumpun. Kyseistä juurisyytä selvittäessä ilmeni, että laitteesta riippuen tiivistenesteen kierrätys oli usein puutteellista tai paine liian alhainen, mikä johtaa poksien pintojen lämpenemiseen ja lopulta vaurioitumiseen. Osassa tapauksista tiivistenesteen lämpötila oli noussut liian korkeaksi, mikä puolestaan laskee voitelukykyä, joka lisää kitkaa. Syntynyt kitka aiheuttaa poksien pintojen ylikuumentumisen ja lopulta vaurioitumisen.

Prosessihäiriöissä syntyneet poksivuodot ovat yleisiä ja niitä syntyy helposti, kun prosessi joudutaan äkillisesti ajamaan alas tai käynnistämään. Vaikka ylös- ja alasajo olisi suunniteltu, syntyy poksivuotoja silti usein, sillä mekaanisen tiivisteiden toiminta ei ole suunniteltu muuttuville olosuhteille. Toiminta suunnitellaan niin, että prosessi on stabiili ja kun prosessihäiriöitä ilmenee, niin tiivisteet helposti vaurioituvat prosessin epätasaisen tilan

vuoksi. Usein prosessin muuttuessa tiiviste käy hetken kuivana, kun tuotetta ei virtaa tai virtaa vain vähä pumpun läpi. Poksin käydessä kuivana metalli hankaa metallia vasten ja aiheuttaa helposti vaurioita. Alasajossa poksivuodolle yleinen syy on imuongelma, eli prosessia alas ajettaessa, säiliöt ja putket ajetaan liian tyhjäksi, jonka seurauksena tuotetta ei kulje tarpeeksi tai ollenkaan pumpun läpi. Ylösajossa taas poksivuodot ilmenevät usein, kun pumpun lämmitys tehdään liian nopeasti, jonka seurauksena mekaaninen tiiviste kokee lämpöshokin ja sen komponentit vaurioituvat. Nyrkkisääntönä lämmityksen tahdille on noin 60 astetta tunnissa.

Komponenttiviatiat esiintyivät pääasiassa linjassa olevien venttiilien tai apujärjestelmien vikaantumisenä, jotka puolestaan aiheuttivat mekaanisen tiivisteiden vuodon. Apujärjestelmillä tarkoitetaan esimerkiksi lämmönvaihtimia, suodatinjärjestelmiä ja tiivistysten kierrätyspumppuja.

Lukumäärältään vähäisimmät juurisyyt olivat kuluminen/korroosio/erosio, kavitaatio ja valmistusvirhe. Kuluminen/korroosio/erosio juurisyyttä käytettiin tilanteissa, jossa mekaaninen tiiviste oli selvästi kulunut käytön vuoksi, mutta viimeisestä huollosta oli alle 5 vuotta, joten sitä ei voitu luokitella normaaliksi kulumiseksi. Kavitaatiota esiintyi muutaman kerran tutkimuksen yhteydessä, kuten myös valmistusvirhettä.

11 kpl työtilauksia luokiteltiin ei tiedossa -kategoriaan, joka johtui usein puutteellisesta raportoinnista. Työtilauksia ajoittain raportoitiin pois, ilman minkäänlaista selitystä tehdystä työstä tai toimenpiteistä. Nämä työtilaukset jäivät ilman juurisyyttä, koska jälkikäteen vanhoista, puutteellisesti raportoiduista työtilauksista juurisyiden selvittäminen on mahdotonta. Kustannukset poksivuotojen kohdalla olivat noin 1 130 000 €.

Liitteessä 4 esitetty vikapuuanalyysi kuvaa poksivuotojen syntymistä eri juurisyiden perusteella ja kuinka mikäkin vikaantumismuoto johtaa mihin juurisyihin. Vikapuuanalyyseissä on myös esitetty pidemmälle vietyjä juurisyitä kuin tilastollisessa tutkimuksessa, sillä vikapuuanalyyseissä kuvaajasta ne ovat selkeästi luettavissa ja

ymmärrettävissä. Tällä tarkoitetaan sitä, että tilastollisessa tutkimuksessa juurisyöt on yleisemmällä tasolla, kun taas vikapuuanalyysissa juurisyöt on esitetty tarkemmin. Vikapuuanalyysi sisältää siis kaiken saman datan kuin aiemmin tässä luvussa esitetyt diagrammit, mutta juurisyitä on viety hieman pidemmälle. Liitteessä 5 on esitetty muille keskipakopumppujen vikaantumismuodoille vikapuuanalyysi samalla tavalla kuin poksivuodoille. Tässä kuvaajassa on myös viety juurisyitä hieman pidemmälle.

Seuraavaksi yleisin vikaantumismuoto keskipakopumpuille oli muu vuoto, jonka juurisyöt jakautuivat kuvan 25 mukaisesti.

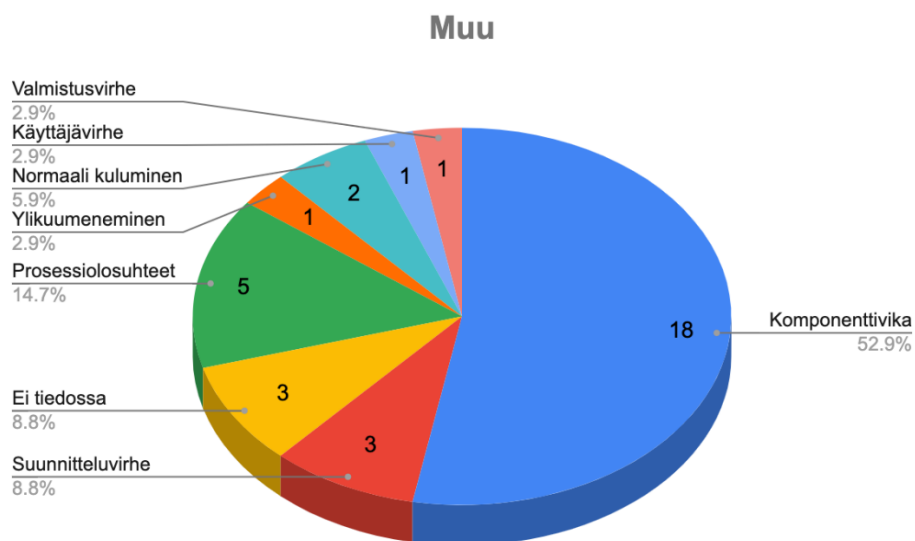


Kuva 25. Muu vuoto -juurisyöt.

Muu vuoto -vikatyypin käsitti muun muassa Öljy-, glykoli- ja tiivistestevuodot, joiden juurisyöiden kärjessä oli komponenttiviaat. Tällä juurisyöllä tarkoitetaan esimerkiksi vuotavia tiivisteitä, viallisia venttileitä, vuotavia linjoja jne. Muita juurisyitä vuodoille oli käyttäjä- ja asennusvirhe, joka oli toiseksi yleisin, sekä löysät liitokset sen jälkeen. Asennusvirheitä voidaan ehkäistä paremmalla perehdyttämällä, sekä kouluttamisella ja tarkemmilla asennusohjeilla. Tähän juurisyöhyn on luettu mukaan myös inhimilliset virheet, kuten

öljykupin rikkoutuminen siihen osuessa. Löysät liitokset voidaan myös osittain rinnastaa asennusvirheisiin, sillä monessa tapauksessa liitoksia ei ollut kiristetty tarpeeksi tai oikeaan momenttiin. Muita juurisyitä vuotoihin oli prosessiolosuhteet, suunnitteluvirheet, normaali kuluminen ja valmistusvirhe, joista jokainen oli määrällisesti hyvin alhainen. Kustannukset tämän vikaantumismuodon kohdalla olivat noin 209 000 €

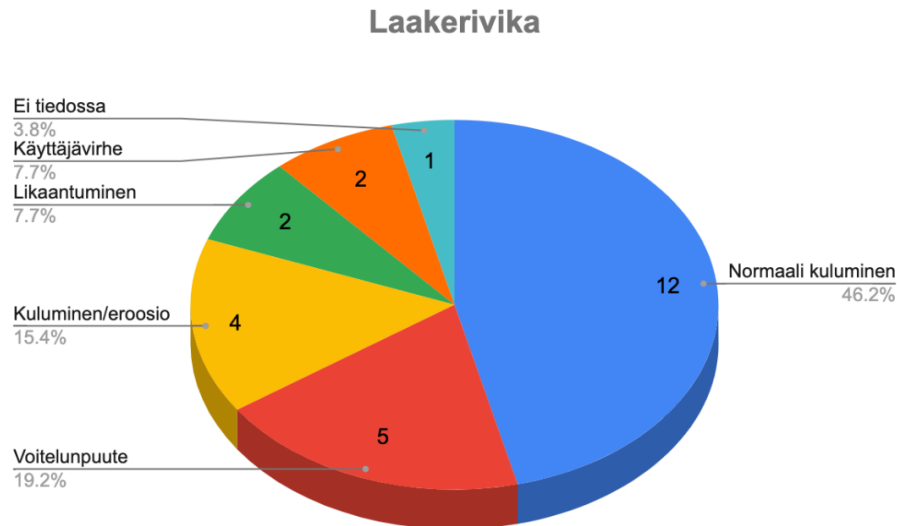
Kolmanneksi yleisin vikaantumismuoto oli muu, johon lukeutuivat muun muassa voitelu- ja jäähdytysjärjestelmien vikaantumiset, vaihdelaatikko- ja kytkinongelmat, moottori- ja ylivirtaongelmat ja niin edelleen. Muu kategoriaan käytännössä liitettiin vikaantumiset, jotka eivät sovi muihin kuvan 22 kategorioihin. Alla kuvassa 26 on esitetty juurisyiden jakauma muu- vikatyyppille.



Kuva 26. Muu -vikatyypin juurisyitä.

Juurisyynä yli 50 % oli komponenttiviaat, jotka pääasiassa koostuivat edellä mainittujen järjestelmien eri osien vikaantumisesta. Tässä vikatyypissä ei juurisyihin ei perehdytä tarkemmin, sillä itse vikaantumismuoto ja juurisyitä ovat niin laajoja, ettei niistä pysty tekemään oletuksia tai johtopäätöksiä. Kustannukset tämän vikatyypin kohdalla olivat noin 43 700 €

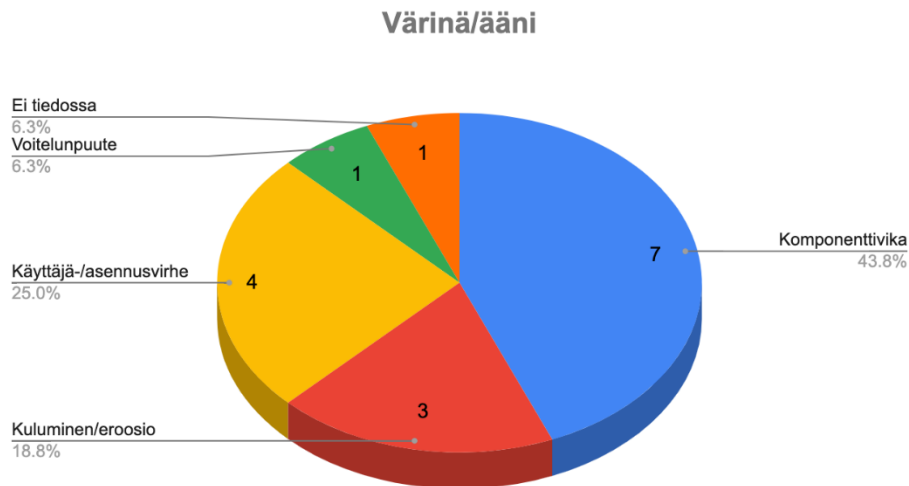
Neljänneksi yleisin vikaantumismuoto oli laakerivika, joihin luettiin mukaan laakereiden rikkoutuminen ja alkavat viat. Juurisytyt laakerivioille on esitetty alla kuvassa 27.



Kuva 27. Laakerivikojen juurisytyt.

Laakerivioissa yleisin juurisyty oli normaali kuluminen, joka tarkoittaa, että melkein 50 % laakerivioista tapahtui ilman estettävää syytä. Tämä merkitsee sitä, että laakereiden ylläpito, suunnittelu ja käyttö toimii suurilta osin niin kuin kuuluukin. Muutamia tapauksia ilmeni, jossa laakerit olivat vikaantuneet ennenaikaisesti voitelunpuutteen ja kulumisen myötä. Voitelunpuutteissa usein ilmeni, että voiteluöljyn tai rasvan laatu oli heikentynyt joko käytön myötä tai kontaminoituessa. Ennenaikaista kulumista aiheutti epäpuhtaudet voiteluöljyssä, sekä vesi tai ruoste laakeripukissa/laakeripesässä. Ilmeni myös muita tapauksia, joissa likaantuminen oli syynä vaurioille, sekä käyttäjävirheet esimerkiksi rasvaukset, voitelun tai asennuksen yhteydessä. Laakerivikoja ei määrällisesti ollut paljon, mutta korjauskustannukset olivat silti korkeat noin 176 000 €. Laakerivioissa kustannukset nousevat usein korkeaksi, sillä pumppua joudutaan usein purkamaan paljon, jonka yhteydessä vaihdetaan muita osia, sekä laakerivikojen yhteydessä usein hajoaa pumpun kalliita komponentteja.

Seuraavana vikaantumismuotona oli värinä/ääni, johon luettiin mukaan kaikki pumpuissa ilmenneet ylimääräiset äänet ja värähtelyt. Yhteenveto on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Värinä/ääni juurisyyt.

Tässä vikaantumismuodossa yleisimpänä juurisyyinä oli myös komponenttivika, joka ilmeni muun muassa viallisina laakereina, juoksupyörinä, akseleina. Myös asennusvirheitä ilmeni ja näissä tapauksissa usein joko laakerit tai juoksupyörä oli asennettu virheellisesti, mikä puolestaan aiheutti ylimääräistä värinää tai ääntä. Kulumista ja eroosiota ilmeni useimmiten syöpyneenä tai partikkeleiden kuluttamana juoksupyöränä, joka aiheuttaa epätasapainoa. Kustannukset tästä vikaantumismuodosta oli noin 67 000 €.

MKP-vuoto ja tukkeuma vikatyypeille ei luotu kuvaajia, sillä molemmille vikatyypeille oli vain yksi aiheuttaja, jonka vuoksi kuvaaja ei tuo mitään lisäarvoa. Magneettikytkinpumppuvuotoja esiintyi pelkästään asfaltenin erotusyksikössä hapanveden partikkeleiden aiheuttama ja tätä kyseistä vikatyypistä on analysoitu tarkemmin luvussa 5.1. Tukkeumia aiheutti prosessissa olevat epäpuhtaudet, jotka kulkeutuivat linjoja pitkin pumpuille suodattimien vajaan toiminnan vuoksi. Suodattimien tukkeutuessa tai täyttyessä epäpuhtaudet pääsivät linjoissa eteenpäin.

Luvun 2.3 mukaisia API 610 -luokituksia oli tarkoitus käyttää tutkimuksessa, jolloin eri keskipakopumpputyypin vikoja voisi verrata keskenään ja tehdä sen perusteella johtopäätöksiä. Tutkimuksen tuloksia tarkastellessa kävi kuitenkin ilmi, että yli 90 % tarkastelluista pumppuista oli OH-luokan pumppuja, joten pumppuluokkien vertailu keskenään ei olisi järkevää. Tämän vuoksi API 610 -standardin mukaiset luokittelut on jätetty tuloksista pois.

5.6 Case-merivesipumput

Kunnossapitotöiden raportointi oli kaikkien pumppujen osalta paikoittain puutteellista. Töitä oli usein raportoitu pois niin, että raporttiin ei ole täytetty mitä työssä on tehty tai kuka sen on suorittanut. Vanhat raportit ovat erittäin tärkeitä tulevien huoltojen suunnittelussa ja niiden puuttumisen myötä katoaa paljon tietoa kunnossapitohistoriasta. Tuloksia case-tutkimuksessa on osittain havainnoitu.

Kunnossapidon näkökulmasta pumput GA-8601–GA-8603 ovat kohtuullisen hyvässä tilassa, huollot on pääasiassa suoritettu ajallaan ja tulevia huoltoja on jo suunniteltu. Huolta pumppuissa herättää varaosien saatavuus ja niiden alttius meriveden aiheuttamalle korroosiolle. Sulzer toimittaa edelleen varaosia, mutta kaikkia ei ole saatavilla, kuten lapakulmien säädön komponentteja. Näiden komponenttien vaurioituessa taho, joka pystyy toimittamaan uudet tai kunnostamaan vanhat ei ole tiedossa. Tämä on kriittisten laitteiden kannalta merkittävä asia, sillä työkuntoon saattaminen voi viivästyä, jos varaosia ei ole saatavissa tai kunnostettavissa. Jos yksi merivesipumppuista sattuu vikaantumaan kesällä, jolloin jäädytyksen tarve on suurimmillaan, joudutaan jalostamon prosesseja ajamaan alas, mikä puolestaan aiheuttaa suuret tuotannon menetykset.

Lapakulmien nostamisella 18 asteeseen saavutettaisiin haluttu 11 000 m³/h tuotto, 65–70 % hyötysuhde ja nostokorkeus noin 15 m, mutta tällöin pumppu alkaa kavitoimaan. Kun lapakulmat lasketaan 12 asteeseen pumppun kavitointi lakkaa, mutta samalla tuotto laskee

noin 7 500 m³/h ja hyötysuhde 55–60 %. Alla olevassa taulukossa 7 on esitetty lapakulmien vaikutus yksinkertaisessa muodossa.

Taulukko 7. Lapakulmien vaikutus pumpun käytettävyyteen

Lapakulma	Hyötysuhde	Tuotto	Nostokorkeus	Huom
18 astetta	65–70 %	11 000 m ³ /h	15 m	Pumppu kavitoi
12 astetta	55–60 %	7 500 m ³ /h	15 m	Pumppu ei kavitoi

Koska pumpun nostokorkeus on mitoitettu väärin, joudutaan pumppua ajamaan sille ei toivotulla alueella sen saavuttamiseksi. Prosessin luonteen vuoksi pumppu kavitoi 18 asteen lapakulmalla, jonka vuoksi sitä joudutaan ajamaan hyötysuhteeltaan huonolta alueelta. Taulukon tiedot on todettu pumppukäyrästä, joka on esitetty liitteessä 8. Käyrään on merkitty punaisella lapakulma 18 astetta ja keltaisella lapakulma 12 astetta.

Potkuripumput GA-8601---GA-8603 ovat myös hyötysuhteeltaan heikkoja verrattuna turbiinikäyttöisiin, sekä niiden alttius meriveden korroosiolle on suuri. Näiden seikkojen, sekä varaosien saatavuuden perusteella on ehdotettu potkuripumppujen korvaamista uudemmilla invertterisäätöisillä tai taajuusmuuttajilla varustetuilla pumpuilla. Invertterikäyttöisillä pumpuilla saavutettaisiin kokonaisuus, joka ei sisällä vaihdelaatikkoa, eli vähemmän huollettavia osia. Nykyisissä potkuripumpuissa ei ole mahdollisuutta käytön optimointiin, tarkoittaen, että pumppuja ajetaan koko ajan maksiminopeudella, vaikka siihen ei ole tarvetta. Jäähdytyksen tarve on suoraan verrannollinen meriveden lämpötilaan ja suuren osan vuodesta pärjätään pienemmällä massavirralla. Kun meriveden lämpötila nousee yli 10 asteen, kasvaa jäähdytyksen tarve niin, että kaikki pumput tulee olla ajossa, riippuen kuitenkin jalostamon prosessien ajotavasta. Potkuripumppujen energiatehokkuudesta tehtiin laskelma, jossa todettiin vuodessa olevan noin kahdeksan kuukautta, jolloin kapasiteettia ei tarvita neljältä pumpulta, jolloin ajossa on kaksi tai kolme pumppua. Vuodessa on siis noin 6 000 tuntia, jolloin massavirtauksen optimoinnilla voitaisiin säästää energiakuluissa. Koska potkuripumpuilla ei ole optimointimahdollisuutta, energiaa kuluu karkeasti 300 000 € edestä hukkaan joka vuosi. Laskennassa on käytetty

lähtökohtana energian hinnaksi 0,05 €/kWh ja pumpun moottorin tehoksi laskennan yksinkertaistamiseksi on käytetty 1 MW, eli $6\,000 \cdot 1\,000 \cdot 0,05 = 300\,000$ €. Laskennassa on siis arvioitu, että vuoden aikana energiaa kuluu hukkaan yhden pumpun kahdeksan kuukauden aikana kuluttaman energian verran. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että kaikki arvot on hyvin karkeasti arvioitu, joten todellinen lukema todennäköisesti on hieman pienempi, mutta sen avulla saadaan ajatus taloudellisista menetyksistä vuositasolla.

Uusilla pumpuilla voitaisiin eliminoida kaikki edellä mainitut seikat, joka nostaisi luotettavuuden ja energia tehokkuuden GA-8604:n tasolle. Merivesilaitoksella on kapasiteetin laajennukseen mahdollisuus, eli valmis paikka yhdelle uudelle pumpulle. Merivesilaitokselle voitaisiin siis käynnin aikana lisätä yksi uusi, kapasiteetiltaan vastaava tai suurempi kuin GA-8604-pumppu. Pumppu tulisi olla joko invertterillä, tai taajuusmuuttajalla varustettu massavirtauksen optimoinnin vuoksi, jolloin saavutettaisiin aiemmin mainitut energiasäästöt. Jos uuden pumpun kapasiteetti vastaisi GA-8604 (noin 30 000 m³/h), voitaisiin yhdellä pumpulla korvata GA-8601 ja GA-8602, jotka ovat hyötysuhteeltaan, luotettavuudeltaan ja kapasiteetiltaan heikoimmat. Uuden pumpun avulla vanhoja pumppuja voisi käyttää varalaitteena muille pumpuille, jolloin koko merivesilaitoksen toiminta on taattu äkillisen vikaantumisen johdosta. Uusi pumppu ei myöskään kärsisi potkuripumppujen kavitoinnista, varaosien saatavuuden heikkoudesta ja meriveden korroosiosta, olettaen pumpun olevan betonipesäinen. Pumppujen uusimista on ehdotettu jo monia vuosia sitten, mutta hankintaa on lykätty, sillä alkuinvestointi ja asennuskustannukset ovat suuret. Prosessien luotettavuuden kannalta nämä kriittiset laitteet olisi suotavaa uusia mahdollisimman pian.

Merivesipumput GA-8601 ja GA-8602 tulisi siis uusia seuraavin perustein:

- Kriittisiä pumppuja, joilla varaosien saatavuus osittain heikko ja yhden toimittajan varassa.
- Pumppuja ei voida ajaa niiden suunnitellulla alueella väärin mitoitettun nostokorkeuden vuoksi, joka laskee tuottoa ja hyötysuhdetta huomattavasti (taulukko 7 ja liite 8).
- Pumppu on altis kavitaatiolle, korroosiolle ja on jo 50 vuotta vanha.

- Energiätehokkuus on heikko, jonka vuoksi vuosittain menetetään noin 300 000 € (pumpuilla ei optimointimahdollisuutta).
- Merivesilaitoksella on valmis paikka laajentamiselle, joten uusi pumppu voitaisiin asentaa käynnin aikana (ei tuotannon menetyksiä).
- Merivesilaitoksen luotettavuus paranisi huomattavasti ja käyttöön jäisi varalaitte.

GA-8604 on luotettavuudeltaan parempi kuin vanhemmat potkuripumput, sillä se ei kärsi lapakulmien säädön aiheuttamista ongelmista, varaosien saatavuudesta tai korroosiosta. Pumppu on kuitenkin kaikista merivesipumpuista kriittisin ja sen huolto on laiminlyöty pitkään. Pumppu on tällä hetkellä käynyt 35 vuotta ilman täyshuoltoa ja valmistaja suosittelee täyshuollon noin 10 vuoden välein. Pumpun huolto oli suunniteltu tehtäväksi TA21 (jalostamon suurhuoltoseisokki 2021), mutta sitä ei saatu järjestettyä. Huoltoa suunnitellut työsuunnittelija ja työnjohtaja ovat sen jälkeen eläköityneet, joten tällä hetkellä asia ei ole edennyt ollenkaan.

Huolto tulisi suunnitella mahdollisimman nopeasti ja rahoitus sille tulisi hakea. Huolto on kuitenkin haastava suunnitella, sillä pumppu, sähkömoottori, vaihteisto ja rasvakoneikko huolletaan eri tahojen toimesta ja pumpun huoltoaika tulee koordinoita tarkasti. Huolto on erittäin kallis (arvio + 200 000 €) ja hankala suorittaa sillä, kyseinen pumppu ja sen apulaitteet ovat suuria kooltaan, sekä upotettuna merivesimonttuun. Irrottamiseen, nostamiseen ja kuljettamiseen tarvitaan suurta kalustoa ja huollot tulee koordinoita neljän eri tahon kanssa niin, että kaikki valmistuisivat samaan aikaan. Pumppu on myös koko ajan ajossa ja voidaan huoltaa ainoastaan tulevassa suurseisokissa TA24 tai keväällä/talvella meriveden ollessa viileää.

Kuten aiemmin mainittiin, merivesipumppujen kunnossapidosta vastanneet työsuunnittelija ja työnjohtaja ovat eläköityneet tehtävistään ja heidän mukana on kadonnut paljon tietotaitoa pumppujen ylläpidosta. Myös puutteellinen raportointi hankaloittaa uusien työntekijöiden toimintaa merivesipumppujen ylläpidon kannalta. Vaikka pumpun GA-8604 täyshuoltoa on laiminlyöty, ei sen tila ole välttämättä huolestuttava. Konetarkastajien

Vikaantumisväli sai arvon 2, joka vastaa taulukon mukaan 3–10 vuotta vikaantumisväliksi. Pumpun valmistaja suosittelee 10 vuotta huoltojen väliksi ja Neste itse 6 vuotta, jolloin molemmat osuvat kyseisen kriteerin arvoihin. Turvallisuus sai arvokseen 0, sillä pumppu ei omaa merkittävää turvallisuusriskiä. Pumppu on sijoitettuna merivesimonttuun ja pumppaa ainoastaan vettä, joten turvallisuusriskiä ei ole. Ympäristöriski sai myös arvokseen 0, sillä esimerkiksi vuodon sattuessa, merivesi ei aiheuta ympäristölle lainkaan haittaa. Tuotannon menetystä on hankala arvioida, sillä pumpun vikaantuessa talvella tai keväällä, ei tuotannon menetystä tapahdu. Jos pumppu kuitenkin vikaantuu kesällä tai sen lopussa, niin tuotantoa joudutaan ajamaan tietyiltä osin alas jäähydyksen puutteen vuoksi. Pisteytyksessä arvoksi annettiin 4, jolloin arvioidaan, että tuotantoa menetetään pitkäksi ajaksi eli 5–14 vuorokaudeksi. Laatukustannus sai arvon 0, sillä laitteen vikaantuminen ei aiheuta hylkyyn ajoa prosessin tuotteille. Korjauskustannuksia on myös hankala arvioida, sillä riippuen vikatyyppistä korjaus voi olla halpa tai hyvinkin kallis. Arvoksi annettiin 4, eli arvioidaan korjauskustannusten nousevan yli 60 000 €. Tämä valittiin, koska jos pumpun vikaantuessa suuremmin, kannattaa sille suorittaa täyshuolto samalla. Täyshuollon hinta ei ole tarkalleen tiedossa, sillä sitä ei ole aiemmin suoritettu, mutta muiden merivesipumppujen huoltoja tarkasteltaessa voidaan todeta kustannuksien nousevan yli 200 000 €.

VVA:lla tutkitaan pumpun, sen apulaitteiden, sekä sähkömoottorin mahdollisia vikaantumisia ja luodaan niille korjaavia toimenpiteitä. Alla olevassa taulukossa 9 on esitetty vika- ja vaikutusanalyysi.

Taulukko 9. Vika- ja vaikutusanalyysi.

Laitetunnus	Nimitys	Komponentti	Komponentin tehtävä	Vikaantumismuoto	Toiminnallinen häiriö	Mahdollinen syy	Nykyinen suunnitelma eslämiseksi	Huoltoväli (vuosina)	Komponentin arvioitu kestoikä	Ehdotettu toimenpide
GA-8604	Merivesipumppu	Tukilaakerit	Akselin tukeminen	Kuluminen	Toiminta vaarantuu	Voiteluongelma	ODR -ja CSI-mittaukset	6-10	10	Kuten on + täyshuolto, etäkunnonvalvonta tai öljyanalyysi + öljynvaihdot
GA-8604	Merivesipumppu	Pesän laakeri	Akselin tukeminen	Kuluminen	Toiminta vaarantuu	Voiteluongelma	CSI-mittaukset	6-10	10	Kuten on + täyshuolto ja etäkunnonvalvonta
GA-8604	Merivesipumppu	Akseli ja akseliholkki	Voimansiirto	Kuluminen, epätasapaino	Toiminta vaarantuu	Voiteluongelma	CSI-mittaukset	6-10	10	Kuten on + kuntotarkistus
GA-8604	Merivesipumppu	Hammasvaihte	Voimansiirto	Kuluminen, hampainen murtuminen	Toiminta vaarantuu	Voiteluongelma, laakereiden kulminen	CSI-mittaukset	6-10	10	Tarkastetaan täyshuollon yhteydessä
GA-8604	Merivesipumppu	Juoksupyörä, liivisterenkaat, Pesä	Tuottaa virtausta	Kuluminen, epätasapaino	Toiminta vaarantuu	Meriveden korrosio, kiintoaineet tuotteessa	CSI-mittaukset	6-10	10	Kuten on + kuntotarkistus ja täyshuolto
GA-8604	Merivesipumppu	Tiivistepesä ja narupoksi	Tiivistää pumpun pesän ja akselin	Vuoto	Toiminta vaarantuu	Kiristetty loppuun	Kenttäkirokset	6-10	10	Kuten on
GA-8604	Merivesipumppu	Perustukset	Pumpun ja moottorin kiinnitys	Murtuminen	Toiminta vaarantuu	Eroosio, ylimääräinen värinä	Ennakkohoito	6-10	10	Tarkastetaan täyshuollon yhteydessä
GA-8604-2X	GA-8604:n vaihteistoöljyn kiertopumppu	-	Vaihteistoöljyn kierrätys	Toimintahäiriö	Vaihdelaatikon toiminta vaarantuu	Komponenttivika	Kuntoon perustuva huolto	-	-	Kuten on + tarkastetaan huollon yhteydessä
GA-8604-2X	GA-8604:n vaihteistoöljyn kiertopumppu	-	Vaihteistoöljyn kierrätys	Toimintahäiriö	Vaihdelaatikon toiminta vaarantuu	Komponenttivika	Kuntoon perustuva huolto	-	-	Kuten on + tarkastetaan huollon yhteydessä
GA-8604-5X	GA-8604:n laakereiden rasvapumppu	-	Rasvavoitelu laakereille	Tukkeutuminen	Laakereiden toiminta vaarantuu	Komponenttivika rasvan koostumus	Kuntoon perustuva huolto	-	-	Kuten on + tarkastetaan huollon yhteydessä
GA-8604-5X	GA-8604:n laakereiden rasvapumppu	-	Rasvavoitelu laakereille	Tukkeutuminen	Laakereiden toiminta vaarantuu	Komponenttivika rasvan koostumus	Kuntoon perustuva huolto	-	-	Kuten on + tarkastetaan huollon yhteydessä
GA-8604-5XS/II	Rasvavoitelu-yksikkö	-	Rasvavoitelu laakereille	Tukkeutuminen	Laakereiden toiminta vaarantuu	Komponenttivika rasvan koostumus	Kuntoon perustuva huolto	-	-	Kuten on + tarkastetaan huollon yhteydessä
GA-8604-8X	GA-8604:n vuotovesipumppu	-	Vuotoveden poisto	Tukkeutuminen	Vuotovesi ei poistu	Merivesimontussa oleva epäpuhtaus	Kuntoon perustuva + CSI-mittaukset	-	-	Kuten on + tarkastetaan huollon yhteydessä
GA-8604-9X	GA-8604:n aksiaalilaakerin kiertopumppu	-	Voiteluöljyn kierrätys	Tukkeutuminen	Laakereiden toiminta vaarantuu	Kennostot tukossa	Ennakkohoito	-	-	Kuten on + tarkastetaan huollon yhteydessä
GAM-8604	Merivesipumpun sähkömoottori	-	Käyttöaite pumpulle	Pysähtyminen	Pumppua ei voi ajaa	Komponenttivika	ODR -ja CSI-mittaukset	6-10	10	Kuten on + täyshuolto ja etäkunnonvalvonta

VVA:n avulla pyritään tuomaan esiin pumpun tärkeimpien osien tai osakokonaisuuksien todennäköisimmät vikaantumismuodot ja niiden aiheuttajat. Taulukossa esiintyvä ODR-mittaus (operator driven reliability), tarkoittaa tuotannon operaattorien suorittamaa värähtelymittausta käsikäyttöisillä värähtelyanalysaattoreilla. CSI-mittauksilla tarkoitetaan konetarkastajien suorittamia määräaikaista mittauksia.

Vika- ja vaikutusanalyysi, kriittisyysluokittelun ja havainnoinnin perusteella ehdotetut toimenpiteet ovat seuraavat:

- Täyshuolto tulisi suorittaa pumpulle mahdollisimman pian.
- Etäkunnonvalvonta tulisi ottaa käyttöön pumpun laakereille ja sähkömoottoreille.
- Öljyhuolto- ja analyysi tulisi ottaa käyttöön pumpun yläpään tukilaakereille.
- ODR-kierrosten käyttöönotto.

Täyshuolto tulisi suorittaa, koska se on laiminlyöty jo useaan otteeseen ja pumpun sisäisiä komponentteja ei ole myöskään tarkastettu moniin vuosiin, joten niiden tilasta tai

käytettävyydestä ei ole tietoa. Etäkunnonvalvonta vastaavalle pumpulle on ollut käytössä Porvoon jalostamolla jo vuosia ja sen on todettu toimivaksi. Tämän perusteella etäkunnonvalvonnan käyttöönotto GA-8604:lle olisi suositeltavaa ja varmistettu toimivaksi ratkaisuksi. Pumpun yläpään tukilaakerointi on öljyvoideltu ja tavallisesti kriittisille laitteille öljyistä otetaan näyte, sekä niille on ennalta määrätty vaihtoväli. Sama käytäntö tulisi ottaa käyttöön GA-8604:lle, sillä tällä hetkellä analyyssejä ei tehdä ja viimeisin öljynvaihto on tehty keväällä 2015. Operaattoreiden suorittama ODR-värähtelymittaus tulisi myös ottaa käyttöön. Säännöllisillä ODR-mittauksilla voitaisiin varmistaa, että ylimääräinen värähtely pysyttäisiin havaitsemaan jo alkuvaiheessa ja ongelman juurisyy poistaa ennen komponenttien vaurioitumista. Konetarkastajien suorittama värähtelymittaus tehdään kahden kuukauden välein, jonka aikana mittauksia olisi hyvä täydentää ODR-mittauksilla. Pumppu on hyvin kriittinen jalostamon jäähdytyksen kannalta ja yllä mainituilla toimenpiteillä voitaisiin taata pumpun luotettavuus aina seuraavaan huoltoon asti. Ehdotetut toimenpiteet todettiin myös RCM-toimintamallin taulukon avulla, joka on nähtävissä liitteessä 6.

Täyshuolto pumpulle on iso ja monimutkainen operaatio, joka suoritetaan todennäköisesti suurseisokissa TA204. Valmistaja suosittelee 10 vuoden tai 70 000 käyttötunnin välein pumpulle täyshuoltoa, joka sisältää seuraavat toimenpiteet:

- Moottorin, vaihdelaatikon ja pumpun irrotus täyshuoltoa varten.
- Aksiaali- ja radiaalilaakereiden uusiminen.
- Akseliholkin ja liukulaakerin kunnostus tai uusinta tarvittaessa.
- Kaikkien tiivisteiden ja O-renkaiden uusinta.
- Kaikkien kuluneiden/vaurioituneiden osien uusinta tai kunnostus.
- Betoniseinämien, imukammion ja pesän tarkastaminen/korjaaminen vaurioista.
- Maali- ja pinnoitusvaurioiden kunnostaminen.

Pumpun valmistaja on lopettanut toimintansa, joten huolto suunnitellaan yhdessä Flowserven kanssa. Sähkömoottori, vaihdelaatikko ja rasvakoneikot tulee myös huoltaa kaikkine apulaitteineen. Huollosta tehdään huoltosuunnitelma, joka sisältää yksityiskohtaisesti pumppukokonaisuuden jokaisen eri osan huollon, sekä muun muassa työn riskien arvioinnin, nostosuunnitelma, erotussuunnitelma ja niin edelleen. Aikataulun ja yrityksen salassapitovelvollisuuden vuoksi huoltosuunnitelmaa ei julkaista osana tutkimusta.

Analysoinnin pohjalta löydettiin paljon juurisyitä vikaantumille, toimenpiteitä, joilla vikaantuvuuksia voitaisiin estää ja luotettavuutta parantaa, sekä konkreettisia investointiehdotuksia perusteluineen merivesipumppujen uusinnalle. Seuraavassa kappaleessa tuodaan kaikki löydökset yhteen ja pohditaan tutkimuksen tuloksia, hyötyä, sekä jatkotutkimusaiheita.

6. Pohdinta ja yhteenveto

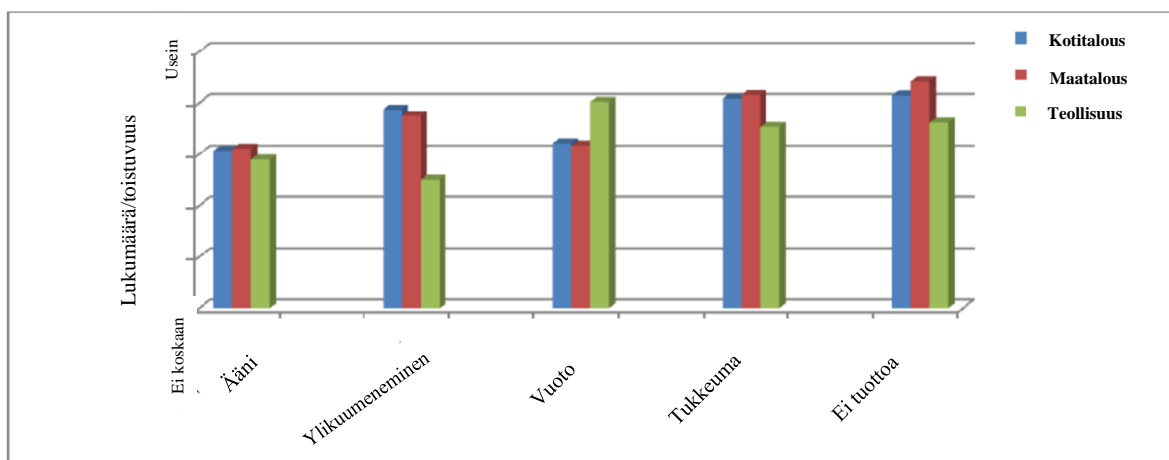
Tässä luvussa pohditaan tutkimuksen luotettavuutta, keskeisiä johtopäätöksiä ja uutuusarvoa. Tehtyä tutkimusta vertaillaan myös muihin vastaaviin tutkimuksiin ja vertaillaan tuloksia keskenään samalla ottaen huomioon tutkimuksen reliabiliteetin ja validiteetin.

6.1 Vertailu muihin tutkimuksiin

Suoritetun tilastollisen tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että näissä olosuhteissa yleisin vikaantumismuoto keskipakopumpuille oli vuoto, joista yleisin oli mekaanisen tiivisteiden aiheuttama poksivuoto (Kuva 22). Tuloksia ei kuitenkaan pidä yleistää, sillä tulokset pätevät ainoastaan tutkimuksen olosuhteissa ja otannassa. Haastattelujen, tutkimuksen ja oman kokemuksen perusteella, voidaan kuitenkin sanoa, että Porvoon jalostamon olosuhteissa keskipakopumpuille yleisin vikaantumismuoto on vuoto.

Mckee ym. tutkimuksessa ”A review of major centrifugal pump failure modes with application of water supply and sewage industries” keskipakopumpun yleisiä vikaantumismuotoja. Tutkimusta on käytetty myös lähteenä työn teoriaosuudessa, sillä tutkimuksessa esiintyvät vikaantumismuodot ovat hyvin saman tyyppisiä, kuin suoritetun tilastollisen tutkimuksen. Hydraulisia vikaantumismuotoja on hankala jälkikäteen raporttien perusteella selvittää, mutta kavitaatiota, takaisinkierrätystä ja aksiaalisia- sekä radiaalisia työntövoimia pystyttiin tunnistamaan tehdyn tutkimuksen tuloksena. Tutkimuksessa esitetyt mekaaniset vikaantumismuodot pystyttiin kaikki tunnistamaan tehdyn tilastollisen tutkimuksen tuloksina, mukaan lukien eroosio, korroosio, ylivirta ja tukkeumat. Mckee ym. Tutkimusta verrattaessa tehtyyn tilastolliseen tutkimukseen, voidaan todeta tutkimuksen olevan onnistunut. Tutkimuksissa aihe ja rajausta eivät ole suoraan verrattavissa, mutta saadut tulokset ovat vertailukelpoisia ja tulokset ovat hyvin samanlaisia keskenään.

Muita tutkimuksia aiheesta etsiessä ei täysin vastaavaa löytynyt luotettavasta lähteestä. Epäluotettavia lähteitä tutkiessa saman tyyppisiä vikaantumisia öljyteollisuuden keskipakopumpuista esiintyi paljon ja yleisimpänä vaikuttaisi olevan poksivuodot. Selvakumar & Natarajan, 2015 suoritetussa tutkimuksessa ”Failure analysis of centrifugal pumps based on survey” tutkittiin keskipakopumppujen vikaantumisten yleisimpiä syitä haastatteluiden perusteella. Tutkimuksessa haastateltiin kotitalous-, maatalous- ja teollisuuskäyttäjiä, joista saamien vastauksien perusteella määriteltiin keskimääräinen käyttöikä keskipakopumpun komponenteille, sekä yleisimmät vikaantumismuodot. Haastatteluihin vastasi yhteensä 168 henkilöä, joista 92 oli kotitalouksia, 50 maatalouksia ja 26 teollisuuskäyttäjiä. Tutkimuksen perusteella mekaaninen tiiviste oli käyttöikänsä pumpun heikoin komponentti ja vuoto kuului kolmeen yleisimpään vikaantumismuotoon. Alla olevassa kuvassa 29 on esitetty tutkimuksen perusteella yleisimmät vikaantumismuodot.



Kuva 29. Yleisimmät vikaantumismuodot (muokattu, Selvakumar & Natarajan 2015).

Kuvaa tarkastellessa voidaan huomata, että vikaantumismuodot poikkeavat paljon kuvassa 22 esitetyistä vikaantumismuodoista. Tuloksen eivät kuitenkaan olen suoraan vertailukelpoisia keskenään, monien eri muuttujien vuoksi.

6.2 Tutkimuksen objektiivisuus

Prosessiyksiköiden tutkimus suoritettiin tilastollisena tutkimuksena, jossa tulokset kategorisoitiin ja esitettiin numeroiden avulla. Data tutkimukselle haettiin yrityksen kunnossapitojärjestelmästä, joten tutkimusta voidaan pitää objektiivisena. Raportit kuitenkin analysoitiin olemassa olevien tietojen pohjalta, sekä hyödyntäen haastatteluita ja muita tietokantoja. Haastattelut eivät ole objektiivisia, sillä ne usein sisältävät haastateltavan mielipiteitä ja ajatuksia ainoastaan haastateltavan näkökulmasta. Myös raportit voivat olla osittain subjektiivisia, varsinkin tilanteissa, jossa ei ole tarkkaan tiedossa mitä on tapahtunut, jolloin raporteihin usein oletettiin jokin syy vikaantumiselle. Tutkimuksessa pyrittiin parhaan mukaan pitämään data ja analysointi objektiivisena, mutta välillä tiedon puutteen vuoksi jouduttiin joitain asioita oletamaan vastaavien tapahtumien perusteella. Tutkimusta voidaan siis pääpiirteittäin pitää objektiivisena.

6.3 Tutkimuksen reliabiliteetti ja validiteetti

Tutkimusmenetelmät on valittu niiden soveltuvuuden perusteella, jolloin voidaan myös todeta, että tutkimus ja tulokset ovat valideja. Vikaantumisia tutkiessa tilastollista tutkimusta voidaan pitää hyvin soveltuvana menetelmä, sillä siinä saadaan laaja otanta erilaisia pumppuja, erilaisista prosessiolosuhteista ja erilaisista prosessiyksiköistä. Otanta pyrittiin pitämään mahdollisimman samansuuruisena lukumäärältään, jotta tutkimuksen tulokset pysyisivät vertailukelpoisina. Juurisyitä selvittäessä käytettiin kirjallisuuskatsauksen perusteella etsittyjä luotettavia menetelmiä juurisyiden selvittämiseksi, joissa turvauduttiin monen eri ammattilaistahon haastatteluihin, kunnossapitojärjestelmän virallisiin raporteihin ja tilastolliseen päättelyyn. Luotettavuuden arvioinnissa käytettiin myös kirjallisuuden perusteella löydettyjä luotettavia menetelmiä mekaanisten laitteiden luotettavuuden arvioinniksi. VVA ja kriittisyysluokittelu sopivat hyvin yksittäisten laitteiden eri vikaantumismuotojen tutkimiseen ja ennaltaehkäisemiseen, sillä niissä perehdytään yksityiskohtaisesti kyseessä olevan laitteen toimintoihin, komponentteihin ja ylläpitoon. RCM-taulukon avulla voidaan hyvin tukea aiemmin mainittujen menetelmien avulla saatuja tuloksia. Vikapuuanalyysillä on hyvä tarkastella suurempaa ja yleistä kuvaa keskipakopumppujen vikaantumisesta, sillä sen sisältö pohjautuu tilastollisen tutkimuksen

ja juurisyyanalyysiin tuloksiin. Vikapuuanalyysilla nähdään siis kokonaiskuva keskipakopumppujen eri vikaantumismuodoista ja niihin johtaneista syistä.

Tutkimusmenetelmät mittaavat luotettavasti haluttua ilmiötä, mittavirheitä ei ole, mutta tulokset saattavat olla osittain subjektiivisia. Tulokset ovat toistettavissa, mutta haastatteleamalla eri henkilöitä, lukemalla eri prosessiyksikön raportteja, tekemällä johtopäätöksiä kokemuksen, eikä tilastoinnin perusteella, voidaan saada samankaltaisesta tutkimuksesta erilaiset tulokset. Tulokset ovat siis osittain sidonnaisia olosuhteisiin ja tutkimuksen suorittajaan. Tulokset eivät myöskään ole yleistettävissä, sillä pumppujen vikaantuminen on vahvasti kytköksissä prosessiin, jossa niitä käytetään, jonka seurauksena vikaantumismuodot saattavat vaihdella hyvin paljon riippuen prosessista. Prosesseissa saatetaan käsitellä syövyttäviä tuotteita, jolloin korroosio saattaa olla hyvin suuri tekijä vikaantumiselle, kun taas toisissa prosesseissa tuotteet sisältävät paljon kiintoaineita, jonka seurauksena eroosio on suuri vikaantumisten aiheuttaja. Tulokset saattavat myös vaihdella paljon otannan aikajanan muuttamisella, sillä tutkituissa prosessiyksiköissä esiintyi paljon suunnitteluvirheitä valitulla aikajamalla, mutta jos aikajanaa siirretään myöhemmäksi, niin suunnitteluvirheet on korjattu, jolloin niitä esiintyisi huomattavasti vähemmän tai ei lainkaan. Tutkimuksen ja tuloksien reliabiliteetti on siis osittain heikko.

6.4 Keskeiset johtopäätökset

Tutkimuksessa selvisi miten keskipakopumppujen vikaantuminen ilmenee tutkituissa yksiköissä ja selvitettiin yleisimmät vikaantumisten syyt. Yleisimpään vikaan, eli poksivuotoon eniten esille tullut juurisyy oli suunnitteluvirhe, jossa joko itse mekaanisen tiivisteiden materiaalivalinnat eivät soveltuneet prosessille tai tiivisteiden apulaitteiden käyttö ei ollut soveltuvaa/asianmukaista. Pumppuvalinnoissa prosesseille tulisi kiinnittää enemmän huomiota huolelliseen suunnitteluun ja apujärjestelmien käyttöä tulisi kouluttaa, sekä ohjeistaa paremmin.

Työtilausten raportointi oli monilta osin puutteellista enemmän tai vähemmän riippuen tutkitusta yksiköstä, mutta yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että raportointia tulisi kehittää henkilökunnan keskuudessa. Raporttien tärkeys korostuu varsinkin laitteiden luotettavuuden ylläpitämisessä, jolloin tulisi olla tiedossa laitteen vikahistoria. Vikahistorian avulla suunnitellaan tulevia huoltoja, RCM-toimenpiteitä ja seurataan laitteen käyttökustannuksia. Puutteellinen raportointi vaikeuttaa kaikkia näitä toimenpiteitä huomattavasti. Raportoinnin parantamiseksi tulisi luoda yhteinen linjaus, siitä kuinka työt raportoidaan pois, sillä tuotantolinjojen välillä esiintyi suuria eroja. Yhtenäiset toimintatavat helpottaisit niin uusia, kuin kokeneitakin työntekijöitä päivittäin

Käyttäjävirheitä pumppujen operoinnissa ja asennuksessa ilmeni myös verrattain paljon, jonka vuoksi koulutusta ja ohjeistusta laitteiden käyttöön olisi hyvä kehittää. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että inhimillisiä virheitä ja erehdyksiä tulee aina sattumaan ja niitä ei voida poistaa, mutta niiden lisäksi esiintyi tapauksia, joissa kunnossapitotyö olisi voitu välttää oikeilla toimintatavoilla. John Cranen toimihenkilöiden kanssa keskustellessa kävi ilmi, että on varsin tyypillistä, että tiivistenestejärjestelmiä operoidaan väärillä toimintavoilla, joka johtaa tyypillisesti mekaanisen tiivisteiden peittämiseen. Ongelmaa on pyritty ehkäisemään teettämällä kylttejä tiivistenestejärjestelmille, joissa on selkeät ohjeet, kuinka sitä tulisi käyttää. Käytäntö on toimiva, mutta kylttejä yleensä teetetään vasta kun on huomattu toistuvia operointivirheitä järjestelmien kanssa, joten kylttejä olisi hyvä teettää ennakoivasti järjestelmille, jossa mahdollisuus virheen syntymiseen on.

Trendien ennustaminen pumpuille on hankalaa, sillä vaikka kuluville ja kriittisille osille on olemassa laskennallinen käyttöikä, pumppujen käyttötunteja ja operointia on vaikea ennustaa. Tiettyjä tapauksia ilmeni, jossa pumpuille oli selvästi nähtävissä trendi, jonka mukaan tietty huoltotoimenpide suoritetaan tietyin väliajoin vikaantumisen johdosta. Suurimmalle osalle pumpuista vikaantuminen oli hyvin satunnaista ja useiden huoltotoimenpiteiden yhteydessä esimerkiksi laakereita ja mekaaninen tiiviste vaihdetaan ennakoivasti, ennen laskennallisen käyttöiän täyttymistä. Tämä myös hankaloittaa trendien ennustamista tai seuraamista. Trendejä kuitenkin esiintyy vahvasti konetarkastajien tekemissä mittauksissa, jossa värähtelykäyrät saattavat nousta tasaisesti käyttötuntien

mukaan. Näiden trendien perusteella voidaan ennustaa milloin pumppu tulisi huoltaa, jotta vältetään värähtelevien komponenttien rikkoutumiselta. Etäkunnonvalvonnan lisääminen helpottaisi trendien seuraamista ja huoltojen ennakoimista, joka tulisi ottaa käyttöön varsinkin kriittisille laitteille. Esimerkiksi TL1-merivesipumput hyötyisivät tästä paljon ja vastaavanlainen järjestelmä on käytössä Porvoon jalostamon toisella jäähdytysvesilaitoksella positiivisin tuloksin.

Tutkimuksen perusteella käyttäjäpohjaisiin virheisiin (mukaan lukien suunnitteluvirheet) kului noin 440 000 € kaikkien prosessiyksiköiden kesken. Summasta yli puolet kuitenkin kuului NEXBTL 2 -yksikölle, jossa mekaanisen tiivisteiden paljemateriaalin valinta oli mennyt pieleen. Kyseistä materiaalivalintaa aikanaan saatavilla olevilla tiedoilla ei olisi pystynyt tekemään paremmin, joten se ei ollut vältettävissä. Suunnitteluvirheet pois lukien käyttäjä- ja asennusvirheille kustannuksia kertyi noin 150 000 €, joka teoriassa olisi vältettävissä. Käyttäjäpohjaisia virheitä voisi ennaltaehkäistä kouluttamisella, ohjeistamisella ja toimintatapojen yhtenäistämällä, mutta niitä ei pysty kuitenkaan eliminoimaan täysin. Virheet ovat suurimmaksi osaksi inhimillisiä virheitä, joita tulee aina esiintymään, mutta edellä mainituilla toimenpiteillä niiden määrää pystyisi vähentämään.

Konetarkastuksen haastatteluissa tuli esille konkreettisia toimia, joilla yllättäviä pumppurikkoja ja pumppujen yleistä luotettavuutta voitaisiin parantaa. Luotettavuuden parantamiseksi pumppuihin ei pidä keskittyä yksilöinä, vaan siirtää huomio itse prosessiin. Usein pumppuja ajetaan niiden suunnitellun alueen ulkopuolella, joka rasittaa komponentteja merkittävästi. Kun pumppua ajetaan sen BEP-alueen ulkopuolella, syntyy siihen luvussa 3.7.1 kuvattuja radiaalisia ja aksiaalisia työntövoimia, jotka vahingoittavat pumpun komponentteja. Huomiota tulisi myös kiinnittää enemmän pumpun apulaitteisiin (esimerkiksi poksihuuhdeltu ja jäähdytys), jotka ylläpitävät pumpun toimintoja. Kun prosessia ajetaan pumpun BEP-alueella ja apulaitteet ovat kunnossa, kasvaa pumpun käyttöikä ja luotettavuus huomattavasti.

Online-kunnonvalvonnan laajemmalla käyttöönottamisella voitaisiin parantaa pumppujen ennakoivaa huoltoa, kunnossapitoa ja kunnonvalvontaa. Online-kunnonvalvonta on

käytössä muilla teollisuuden aloilla hyvin laajasti, mutta öljyteollisuudessa ei. Öljyteollisuudessa laitteet on usein kahdennettu, joten online-valvonnalle ei nähdä tarvetta. Online-valvonnan käyttöönottoaminen kaikille keskipakopumpuille ei ole kannattavaa, sillä infrastruktuurin rakentaminen ja järjestelmien päivittäminen niin laajasti ei todennäköisesti kulujen puolesta ole kannattavaa saatuihin hyötyihin verrattuna. Online-valvonta taas olisi kannattava ottaa käyttöön kriittisyysluokittelun perusteella kriittisille laitteille, jotta niiden luotettavuutta voitaisiin parantaa ja toiminta turvata, kuten esimerkiksi TL1-merivesilaitoksen pumpuille. Digitaalisia kaksosia kannattaisi hyödyntää isoille, kriittisille ja kalliille laitteille, kuten kompressoreille, joiden toiminnan vaarantuessa vaarantuu myös useat jalostamon prosessit. Kaksosen avulla voitaisiin ennakoivasti suunnitella huollot tarkemmin ja myös simuloinnilla löytää mahdolliset heikot kohdat kyseisistä laitteista.

6.5 Tulosten hyödynnettävyys

Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää toimintatapojen kehittämisessä, sekä niiden avulla voidaan tuoda paremmin tietoisuuteen vallitsevat epäkohdat. Tuloksien avulla voidaan muun muassa kehittää operointimenetelmiä, jotta vältetään käyttäjäpohjaisilta virheiltä pumppujen apulaitteiden kanssa. Kun juurisyitä keskipakopumppujen vikaantumisille on tunnistettu, voidaan niitä hyödyntää kehittäessä RCM-toimenpiteitä, sekä päivittäistä toimintaa. Tuloksien avulla saatiin myös arvokasta tietoa keskipakopumppujen käyttäytymisestä eri tuotantolinjoilla, sekä ajatuksia siitä miten vikaantumisia voi estää jatkossa.

Case-tutkimuksen avulla löydettiin paljon konkreettisia syitä, joiden avulla voidaan perustella GA-8601---GA-8603 potkuripumppujen uusimista. Case-tutkimusta käytettiin myös pohjana elinkaarenhallinnan- ja projektiosastojen laatimassa investointiehdotuksessa, jossa halutaan uusia GA-8601- ja GA-8602-pumput. Investointiehdotuksessa käytettiin lukujen 4.4 ja 5.6 sisältöä. Case-tutkimuksessa selvisi, että merivesipumpun GA-8604 huoltoja oli laiminlyöty paljon. Asia ei ollut kunnossapitohenkilökunnan tiedossa, sillä pitkään pumppuja hoitaneet henkilöt olivat eläköityneet tehtävästään. Case-tutkimuksen avulla tuotiin esiin kyseinen puute henkilökunnan tietoon, jonka seurauksena osana tätä tutkimusta luotiin huoltosuunnitelma, jonka pohjalta pumppu voidaan huoltaa sopivana

ajankohtana. Huoltaminen nostaa pumpun luotettavuutta huomattavasti ja case-tutkimukseen kerätty tieto auttaa pumpun ylläpidosta vastaavaa henkilökuntaa merkittävästi. Myös kunnossapitojärjestelmässä olevia automaattisia ennakkohuoltoja parannettiin, täydentämällä tarkemmin huoltojen sisältö ja suositeltava suoritusajankohta.

Case-tutkimuksessa havaitut puutteet merivesipumppujen ODR-kierrosten suhteen tuotiin esiin jalostamon ennakoivasta kunnonvalvonnasta vastaavalle henkilölle. Asia tuotiin esiin myös elinkaarenhallinnan johtohenkilökunnan keskuudessa kuukausittaisessa ODR-kunnonvalvonnan seurantalaverissa. Tämä myötä ODR-kierrokset merivesipumpuille otettiin uudelleen käyttöön ja jatkossa seurataan, että se toteutuu halutulla tasolla. Havainnon ja asian esiin tuomisella merivesipumppujen luotettavuutta onnistuttiin parantamaan, sillä jatkuva kunnonvalvonta auttaa vikaantumisen ennaltaehkäisemisessä ja ennustamisessa.

Huoltosuunnitelma, joka luotiin osana tätä case-tutkimusta merivesipumpulle GA-8604 on arvokas tieto kunnossapidolle, sillä sitä voidaan käyttää suoraan huollon suorittamiseen. Huoltosuunnitelma on tehty yhteistyössä työsuunnittelija, hankinnan ja diplomityön ohjaajan kanssa, joten suunnitelmaa voidaan pitää luotettavana ja käyttövalmiina.

6.6 Jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimusaiheita on paljon ja tutkimusta on helppo laajentaa tai muokata niin, että saadaan aikaan erilainen kokonaisuus. Tutkimusta voidaan laajentaa Porvoon jalostamon tuotantolinjojen muihin prosessiyksiköihin, jotta saataisiin laajempi näkemys keskipakopumppujen vikaantumisesta. Tutkimusta voi laajentaa muiden prosessiyksiköiden lisäksi myös terminaaleihin ja TLV-alueisiin (tuotantolinjavalmistus). Tutkimuksen rajauksia voidaan myös muuttaa aikajanalla suuremmaksi tai API 610 -luokituksen mukaisiin pumppuihin, jolloin voitaisiin tutkia niiden välillä syntyviä eroavaisuuksia vikaantumisten suhteen. Rajauksia voidaan myös laajentaa niin, että tutkitaan yksivaiheisia pumppuja ja verrataan niitä monivaiheisiin pumppuihin tai tutkitaan muita pumppuluokkia keskipakopumppujen sijaan. Porvoon jalostamolla on käytössä laaja kirjo erilaisia pumppuja

kuten kalvo-, ruuvi-, nesterengaspumput ja niin edelleen. Jos tutkimukseen hakee vielä laajuutta, voidaan laitekannasta valita laitteita keskipakopumppujen ulkopuolelta myös, esimerkiksi kompressorit, puhaltimet, lastausvarret ja niin edelleen.

6.7 Tutkimuskysymyksien yhteenveto

Keskipakopumput vikaantuvat tutkimuksen otannan perusteella suurelta osin erilaisten vuotojen muodossa. Vikaantumiseen vaikuttaa hyvin moni tekijä, mutta käyttäjäkohtaiset virheet joko operoinnissa, tai suunnittelussa olivat hyvin suuressa roolissa vikaantumisten aiheuttajaksi. Käyttäjävirheiden lisäksi prosessi ja sen luonne aiheuttaa yhtä lailla vikaantumisia pumpuille. Tutkimuksen otannassa selvisi, että tuotteen seassa olevat kiintoaineet ja epäpuhtaudet kuluttavat pumpun mekaanisia osia, aiheuttaen vuotoja. Myös prosessin luonne, eli korkea lämpötila, syövyttävät tuotteet ja prosessin ajon muuttuminen aiheuttaa vuotoja. Pumppuja myös ajetaan joissakin prosesseissa niiden suunnitellun alueen ulkopuolella, joka lisää pumppujen vikaherkkyyttä.

Vikaantumisten vähentämiseksi pumppujen suunnittelussa ja mitoituksessa tulisi tarkasti keskittyä prosessiin ja olosuhteisiin, jossa pumppua käytetään. Suunnittelussa tulisi mitoittaa pumput ja komponenttien materiaalivalinnat niin, että ne soveltuvat prosessin luonteelle ja kestävät käyttöä jalostamo-olosuhteissa. Tämän lisäksi käyttäjäkohtaista koulutusta ja ohjeistusta tulisi kehittää, jotta välttyttäisiin operointivirheiltä. Pumppujen ja niiden apulaitteiden operointiin tulisi olla selkeät ohjeet, joita kaikki noudattavat, sekä työntekijät olisi hyvä perehdyttää tarkasti niiden toimintaan. Kunnonvalvonnan lisääminen kriittisten laitteiden osalta nostaisi laitteiden ja niiden toimintojen luotettavuutta, sekä samalla mahdollistaisi alkavien vikojen huomaamisen ajoissa, jolloin välttyttäisiin pumppujen suuremmilta vaurioilta. Kunnonvalvontaa voisi lisätä online-valvontana kriittisille laitteille tai lisäresursseilla konetarkastukseen, jonka avulla ongelmiin ja niiden juurisyihin pystyittäisiin perehtymään tarkemmin.

Nykyisessä kunnossapitojärjestelmässä on puutteita raportoinnin kannalta, koska siihen ei ole olemassa yhteistä linjausta tai toimintatapoja. Puutteellinen raportointi vaikeuttaa luotettavuus- ja kunnossapitotöiden suunnittelussa, sillä vanhat raportit sisältävät arvokasta tietoa laitteen historiasta. Kunnossapitohistoriaa voidaan hyödyntää tulevien töiden suunnittelussa, vikaantumisten ennustamisessa ja luotettavuuden arvioinnissa. Vanhat raportit ovat myös arvokas tieto laitteen elinkaarenhallinnan kannalta. Yritys on ottamassa käyttöön uutta kunnossapitojärjestelmää vuoden 2023 aikana, jolla pyritään eliminoimaan vanhan järjestelmän käytössä syntyneet ongelmat. Raportoinnin laadun varmistamisessa selkeä ohjeistus ja perehdytys on tärkeää, jotta kaikki tietävät ja osaavat tehdä raportit laadukkaasti.

Keskipakopumppujen vikaantumistrendien- ja taajuuksien ennustaminen vikahistorian perusteella on hankalaa, sillä yksittäisten pumppujen kunnossapitohistoriaa tutkiessa vikaantumistaajuuudet ja -muodot ovat hyvin satunnaisia. Tämä johtuu siitä, että suurin osa vikaantumismuodoista tutkitulla aikavälillä syntyy prosessi- tai käyttäjäpohjaisista virheistä. Vikaantumistaajuuksia tietyille pumpuille löytyi, mutta tällaiset pumput eivät kärsineet edellä mainituista prosessi- ja käyttäjäpohjaisista virheistä. Vikaantumistaajuuksien ennustaminen onnistuu jokseenkin kunnonvalvonnan osalta, jossa pystytään seuraamaan laitteen värähtelytasoja. Värähtelytasojen noustessa, pystytään arvioimaan laitteen jäljellä oleva käyttöikä ja täten osittain ennustamaan vikaantumistaajuus.

Kustannussäästöjä on helpoin saavuttaa eliminoimalla käyttäjäpohjaisia virheitä operoinnissa ja suunnittelussa, jossa kyseisten virheiden korjauskustannukset tutkitulla aikavälillä oli yli 400 000 €. Kyseisestä summasta noin 1/3 koostui käyttäjävirheistä operoinnissa. Suunnitteluvirheiden aiheuttamia kustannuksia on hankala eliminoida, sillä suunnittelussa pyritään aina toimivaan ratkaisuun, mutta joskus joko tiedon tai taidon puutteen vuoksi sitä ei heti löydetä. Kustannussäästöjä voidaan myös saavuttaa kehittämällä ennakoivaa kunnossapitoa, lisäämällä kunnonvalvontaa ja huolehtimalla siitä, että pumppuja ajetaan niiden BEP-alueen sisällä. Nämä toimet edesauttavat pumppujen luotettavuutta ja välttävät ennenaikaisia vikaantumisia.

Lähdeluettelo

Aesseal. API Plan 62. [Aesseal [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. [Viitattu 27.12.2021]. Saatavissa: <https://www.aesseal.com/en/resources/api-plans/api-plan-62>

Ahmed, H., Nandi, A. 2020. Condition Monitoring With Vibration Signals: Compressive Sampling and Learning Algorithms for Rotating Machines. Brunel university London, UK: John Wiley & Sons Ltd. S. 7–10.

Andersen, B., Fagerhaug, T. 2006. [Luku 2:] Root cause analysis: simplified tools and techniques. Milwaukee, USA: ASQ Quality press.

Axflow. Keskipakopumput. [Axflow [www-sivuilla](http://www.sivuilla)]. [Viitattu 1.11.2021]. Saatavissa: <https://www.axflow.com/fi-fi/luettelo/tuotteet/pumput/keskipakopumput>

Bachus, L., Custodio, A. 2003. Know and Understand Centrifugal Pumps. Oxford, UK: Elsevier. S. 1–71.

Biolini, A. 2014. Reliability Engineering: Theory and Practice, 5th edition. Heidelberg, Berlin: Springer. S.1–77.

Ganatra, N., Patel, R. 2013. Witness testing of API 610 centrifugal pumps and API 611 steam turbines. Proceeding of the Twenty-Ninth International Pump Users Symposium, held at Houston, Texas October 1–3, 2012. Turbomachinery Laboratory, Texas: A&M Engineering Experiment Station.

Hodkiewicz, M. 2005. The effect of partial-flow operation on the axial vibration of double-suction centrifugal pumps. Perth, Australia: The University of Western Australia. S. 34.

Selvakumar, J., Natarajan, K. 2015. Failure analysis of centrifugal pumps based on survey. Journal of Engineering and Applied Sciences. Asian Research Publishing Network. Vol. 10: 4. S. 1960–1964.

Ahlstar End Suction Single Stage Centrifugal Process Pumps. 2021. [www-tuotedokumentti]. Sulzer Ltd, 2021. [Viitattu 11.11.2021]. Saatavissa: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/pumps/single-stage-pumps/brochures/ahlstarendsuctionsinglestage_e10083.pdf?la=en

Sulzer, 2010. Centrifugal pump handbook, 3rd edition. Winterthur, Switzerland: Sulzer Pumps Ltd. S.20.

CPE ANSI process pumps range. 2021. [Sulzer www-sivuilla]. [Viitattu 1.11.2021]. Saatavissa: <https://www.sulzer.com/en/shared/products/cpe-ansi-process-pumps-range>

Axial flow pump type Ensival Moret CAHR. 2021. [Sulzer www-sivuilla]. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavissa: <https://www.sulzer.com/en/shared/products/axial-flow-pump-type-ensival-moret-cahr>

API 610 and ISO 13709 pumps. 2021. [Sulzer www-sivuilla]. [Viitattu 3.11.2021]. Saatavissa: <https://www.sulzer.com/en/products/pumps/pumps-by-type/single-stage-pumps/api-610-and-iso-13709-pumps>

Urbani, M., Petri, D., Brunelli, M., Collan, M. 2020. Maintenance-Management in Light of Manufacturing 4.0. In: Collan, M., Michelsen, KE. (eds) Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0. Cham, Switzerland: Palgrave Macmillan. S: 105–108.

Marwala, T. 2012. Condition Monitoring Using Computational Intelligence Methods. London, UK: Springer. S. 5–7.

McKee, K., Forbes, G., Mazhar, I., Entwistle, R., Howard, I. 2011. A review of major centrifugal pump failure modes with application to the water supply and sewerage industries. Perth, Australia: Curtin University. S 1–10.

Merkle, T. 2014. Damages on pumps and systems: The handbook for operation of centrifugal pumps. Oxford, UK: Elsevier. S. 111.

Morais, W., Pereira, R., Siquera B., Moino, A. 2017. Development of a Prototype Equipment for Cavitation Testing. 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, held at Curitiba, PR, Brazil December 3–8, 2017. S. 5.

Neste NMS, SDA prosessikuvaus OQD-171003. [Yrityksen sisäinen tiedosto]. [Viitattu 23.2.2022]

Neste NMS, NEXBTL 2 prosessikuvaus OQD-101360. [Yrityksen sisäinen tiedosto]. [Viitattu 23.2.2022]

Neste NMS, FCC prosessikuvaus OQD-1103. [Yrityksen sisäinen tiedosto]. [Viitattu 23.2.2022]

Neste NMS, VK prosessikuvaus OQD-715. [Yrityksen sisäinen tiedosto]. [Viitattu 23.2.2022]

Neste(a). Porvoo. [Nesteen www-sivuilla]. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavissa: <https://www.neste.com/about-neste/who-we-are/production/porvoo#b12c6b81>

Neste(b). Production. [Nesteen www-sivuilla]. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavissa: <https://www.neste.com/about-neste/who-we-are/production#b12c6b81>

Rajendran, S., Purushothaman, K. 2012. Analysis of a centrifugal pump impeller using ANSYS-CFX. Internatiol Journal of Engineering Research & Technology. Vol 1:3. S. 1–6.

Yssaad, B., Khiat, M., Chaker, A. 2014. Reliability centered maintenance optimization for power systems. In: Electrical Power and Energy Systems. Elsevier. Vol. 55. S. 108–109.

Xiao, N. Khonsari, M. 2013. A Review of Mechanical Seal Heat Transfer Augmentation Techniques. In: Recent Patents on Mechanical Engineering. Baton Rouge, USA: Bentham Science Publishers. Vol. 6:2. S. 1–2.

Liite 1. Ennakkohuollon haastattelukysymykset

1. Miten ennakkohuollot suunnitellaan?

2. Miten ennakkohuollot toteutetaan?

3. Kuka vastaa toteutuksesta?

4. Miten materiaalit valitaan huoltotöihin?

5. Laiminlyödäänkö huoltoja resurssipulan vuoksi?

6. Puutteita?

7. Omia ajatuksia?

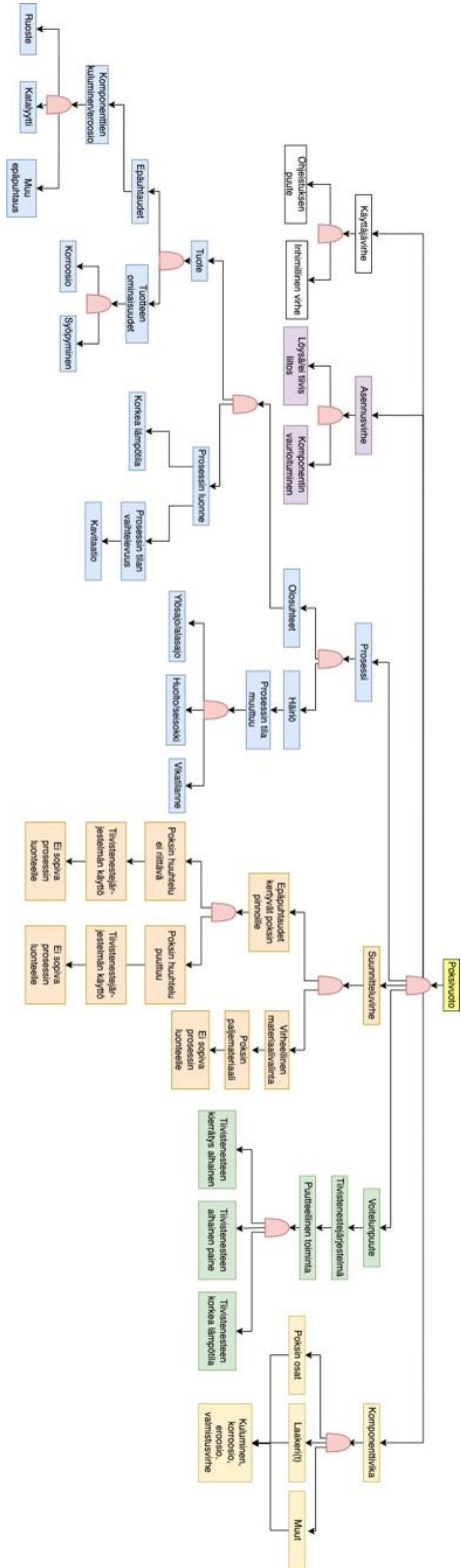
Liite 2. Konetarkastuksen haastattelukysymykset

1. Mikä on työnkuvasi ja mistä olet vastuussa?
2. Mitä laitteistoa käytetään?
3. Miten laitteistoa käytetään?
4. Miten värähtelykäyrästä löydetään vikoja?
5. Miten kunnonvalvontayksikkö toimii?
6. Kannattaisiko online valvontaa lisätä pumppujen luotettavuuden parantamiseksi?
7. Oma näkemyksesi Online valvonnasta?
8. Miten luotettavuutta omasta mielestäsi voisi parantaa?
9. Omia ajatuksia kunnonvalvonnasta ja konetarkastuksesta Porvoon jalostamolla

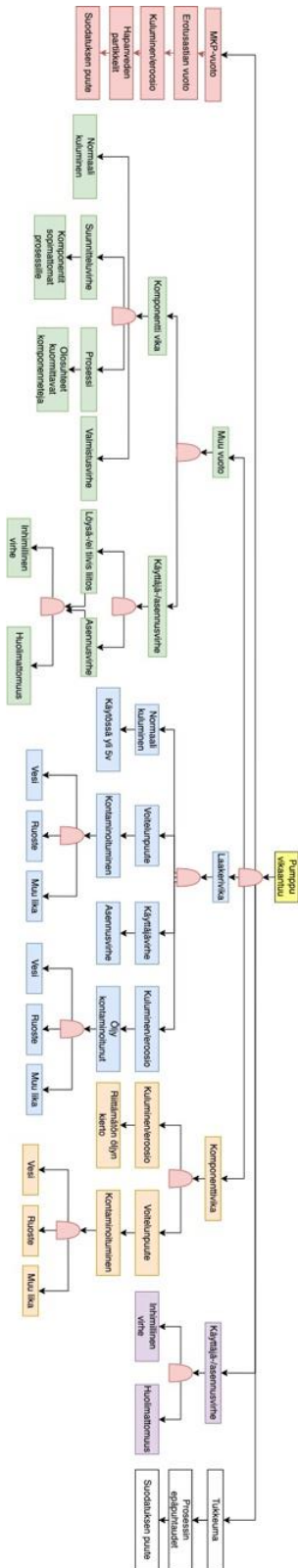
Liite 3. voiteluosaston haastattelukysymykset

1. Mikä on voiteluosaston työnkuva?
2. Minkälainen on tavallinen työpäivä?
3. Mikä on öljyanalyysi ja mitä siinä mitataan?
4. Minkä takia öljynäytteitä tehdään?
5. Mitä analyysin perusteella voidaan tulkita?
6. Käytetäänkö laitteissa valmistajan suosittelemaa öljylaatua vai jotain muuta?
7. Puutteita ja omia ajatuksia

Liite 4. FTA-poksivuodot



Liite 5. FTA-muut vikaantumismuodot



Liite 6. RCM-toimintamalli

Kysymys	Ongelma
Mikä on laitteen tai prosessin toiminto ja siihen liittyvät suorituskykyvaatimukset nykyisessä ympäristössä?	Pumpata merivettä ja tuottaa jäähdytystä TL1, TL2, TL4. pysyä ajossa luotettavasti TA2024 asti
Millä tavoin laite tai prosessi voi vikaantua?	Poksivuoto, laakerivika, komponenttivika, värinä/ääni
Mikä aiheuttaa jokaisen yksittäisen vikaantumisen?	Katso FMEA-analyysi
Mitä tapahtuu, kun vikaantuminen ilmenee	Pumpun toiminta vaarantuu
Mikä on vikaantumisen merkitys laitteelle tai prosessille?	Mahdollinen prosessien ajon pienentäminen, isot korjauskustannukset
Mitä voidaan tehdä vikaantumisen estämiseksi?	ODR-kierrokset, värinä mittaukset, kunnonvalvonta, ennakkohoito
Mitä tulee tehdä, jos sopivaa ennakoivaa menetelmää ei löydy?	Tarkastaa pumpun osat vaurioiden varalta

Liite 7. kriittisyysluokittelun kriteeritaulukko

	Kert.	Vaillantakriteeri
Vikaantumisyväli	1	Pitkä, yli 10 vuotta
	2	Pitkäaho, 3 - 10 vuotta
	4	Lyhytaho, 1 - 3 vuotta
	8	Lyhyt, 0 - 1 vuotta
Turvallisuusriski	0	Ei merkittävä turvallisuuksia
	2	Vahainen, esim. lievä loukkaantumisvaurioiden (RWI ja MTC)(Esim. syrtymä)
	4	Aiheuttaa sairastaman (LWI). Valtakainen työkyvyttömyys. Vakava loukkaantuminen, joka saattaa parantua. Allistuminen, joka johtaa oireisiin. (Esim. tulipalo, oma paikkunna)
	8	Voi aiheuttaa yhden henkilön kuoleman. Pysyvä työkyvyttömyys. Pysyvä ja vakava vamma. Merkitäviä altistuminen myrkyille tai syöpää aiheuttaville aineille. (Esim. tulipalo, ulkopuolinen paikkunna)
	16	Voi aiheuttaa useita kuolemia tai lukuisia vakavia vammoja saman systemaattisen syyn johdosta. (Esim. räjähdys)
Ympäristöriski	0	Ei merkittävä ympäristöriskiä
	2	Yrittää sallittu viranomaisille raportoitavan rajan tai yrityksen HSE-ajan. (Tällä hetkellä 100 kg (LOPC))
	4	Yrittää sallittu viranomaisille raportoitavan rajan tai yrityksen merkittävän HSE-ajan. (Tällä hetkellä 1000 kg (LOPC))
	8	Aiheuttaa toistuvia tai jatkuvia sallittujen rajojen ylityksiä tai maaperän, pohjaveden, vesijärjestelmän, kasvillisuuden tai eläimistön saastumista. Vaikutukset eivät ole pysyviä.
	16	Laajat tulot maaperän, pohjaveden, vesijärjestelmän, kasvillisuuden tai eläimistön saastumisen johdosta. Vaikutukset ovat pysyviä.
Tuotannon menetykset	0	Laitteen toimintamuuutella ei merkittäviä osaprosesseille tai prosessiyksiköille (oletuksena että laitteelle löytyy heti valmis varalaite)
	1	Pysäytystä osaprosessin tai prosessiyksikön lyhyeksi ajaksi, alle 1 vrtk tai aiheuttaa vastaavanvarunuksen kapasiteetin laskun (oletuksena että laitteelle löytyy heti valmis aiemmin kapasiteetin varalaite)
	2	Pysäytystä osaprosessin tai prosessiyksikön lyhyeksi ajaksi, 1 - 5 vrtk tai aiheuttaa vastaavanvarunuksen kapasiteetin laskun (oletuksena että varalaite ei ole heti valmis, esim. joudutaan tekemään ohikulkusäily)
	4	Pysäytystä osaprosessin tai prosessiyksikön pitkäksi ajaksi, 5-14 vrtk tai aiheuttaa vastaavanvarunuksen kapasiteetin laskun (ei varalaitea)
	8	Pysäytystä osaprosessin tai prosessiyksikön pitkäksi ajaksi, yli 14 vrtk tai aiheuttaa vastaavanvarunuksen kapasiteetin laskun (ei varalaitea)
Laatukustannus	0	Laitteen toimintamuuutus ei aiheuta laatukustannuksia.
	2	Laitteen toimintamuuutus aiheuttaa pieniä laatukustannuksia jätetä hyllytysoja prosessiyksikössä 0-12 h
	4	Laitteen toimintamuuutus aiheuttaa merkittäviä laatukustannuksia jätetä hyllytysoja prosessiyksikössä yli 12 h
Korjaus- ja seurakustannus (esim. ylim. energiankulutus)	0	Ei ole merkittäviä suhteessa muihin meneyksiin
	1	Vahaiset, 0 - 5 000€
	2	Keskinkertaiset, 5 000 - 20 000€
	3	Korkeat, 20 000 - 60 000€
	4	Erittäin korkeat, yli 60 000€
Varalaitteen merkitys	0	Vaihtokäytännön piirissä, varalaitteen ei tarvitse olla käyttökunnossa välittömästi
	1	Vaihtokäytännön piirissä, varalaitteen käyttämiseksi sallitaan valmisteluajoja (alle 1 vrtk)
	2	Dokumentaation vaihtokäytännön ja ennakkoluulon piirissä, varalaite on heti käytettävissä kaikissa tapauksissa, vikaantunut laite on saatettava toimintakuntoon välittömästi
		<i>RWI (Restricted Work Injury) = Voi yksikennallis rajoittuneesti /tehdäkoavaavaa työtä</i>
		<i>MTC (Medical Treatment Case) = Vastav hoitoa</i>
		<i>LWI (Lost Work Injury) = aiheuttaa poissaolon työssä</i>
		<i>LOPC (Loss Of Primary Containment) = prosessin säätely ja ulkoiset vuodot</i>

LIITE 8. Pumppukäyrä GA-8601---GA-8603

