

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU

PK5-linjan erillisvaihteiden kartoitus

Petteri Kreku

Kone- ja tuotantotekniikan opinnäytetyö
Konetekniikka
Insinööri(AMK)

KEMI 2012

ALKUSANAT

Haluan kiittää Efora Oy:n Marko Julkua mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö Efora Oy:lle. Haluan kiittää Efora Oy:n Tuomo Salmelaa, Alpo Olkoniemeä ja Pekka Kummua yhteistyöstä ja asiantuntemuksesta. Kiitokset myös Exxonmobilin Miika Kojoselle sekä Moventas Oy:n Satu Hurmalalle.

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan ala	
Koulutusohjelma	Kone- ja Tuotantotekniikka
Opinnäytetyön tekijä	Petteri Kreku
Opinnäytetyön nimi	PK5-linjan erillisvaihteiden kartoitus
Työn laji	Opinnäytetyö
päiväys	11.2.2012
sivumäärä	57 + 8 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja	Insinööri(AMK) Aslak Siimes
Yritys	Efora Oy
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	Kehitysinsinööri Marko Julku

PK5-linjan erillisvaihteiden kartoitus on Efora Oy:lle Stora Enson Veitsiluodon tehtaille tehty opinnäytetyö. Efora Oy vastaa Stora Enson Suomen paperitehtaiden kunnossapidosta. Työn tarkoituksena on saada kartoitettua PK5-linjalla toimivat vaihdelaatikot. Tarve työlle ilmeni kesällä 2011 esille tulleista vaihdelaatikko-ongelmista.

Työn tavoitteena on saada kartoitettua PK5-linjan vaihteiden nykytilanne, varaosat, vara-
vaihteiden saatavuus, muutostyöt ja kunnonvalvonnan osuus sekä tutustua ennakkohuol-
toihin. Työssä on tarkoitus tutkia myös, onko kaikkia vaihteita vielä saatavilla vai tarvi-
taanko korvaava vaihde sekä aiheuttaako korvaava vaihde muutostöitä toimintopaikalle.
Työssä tutkitaan jokaisen vaihteen ympäristöt kunnossapitotöiden helpottamiseksi. Työn
aikana tutustutaan kiertovoitelun ulkopuolisten vaihteiden öljyhuoltoon ja sen kehitysmah-
dollisuuksiin.

Vaihteiden tietojen keräyksessä on käytetty SAP -tietojärjestelmää, arkistoa sekä henkilö-
haastatteluja. Kaikki työssä esiin tulleet havainnot ja tulokset on kerätty laitetaulukkoon.
Laitetaulukko on tehty Microsoft Excel -ohjelmalla. Taulukkoon kerätyt tiedot ovat eritel-
ty omiin välilehtiinsä kategorian mukaisesti. Laitetaulukkoa voidaan hyödyntää kunnossa-
pidon suunnittelussa.

Työn aikana esiin tulleet huomiot varaosien ja öljyhuollon kehittämisestä parantavat Efora
Oy:n valmiuksia PK5-linjan kunnossapitotoiminnassa.

Avainsanat: kunnossapito, varaosakartoitus, vaihdelaatikko, voiteluhuolto

ABSTRACT

Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology	
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Name	Petteri Kreku
Title	Survey of PK5 lines Gears
Type of Study	Bachelor's Thesis
Date	11 February 2012
Pages	57 + 8 appendices
Instructor	Aslak Siimes, BEng
Company	Efora Oy
Contact Person/Supervisor from Company	Marko Julku Development Engineer, Efora Oy

This thesis is commissioned by Efora Oy at Stora Enso Veitsiluoto Mill and it deals with the survey of the separate gears on PK5 line. Efora Oy is responsible for the maintenance of Stora Enso's factories in Finland. The purpose of this thesis is to survey all functional gearboxes in PK5 line. The problems with the gearboxes in summer 2011 were the main reason for this survey.

The goal of the thesis is to survey the present condition of the gearboxes of PK5 line, spare parts, the availability of gearbox replacement, the share of alteration work and condition monitoring as well as to study preventive maintenance. In addition, the aim was to investigate the availability of all gears, if there was a need for gearbox replacement and whether or not the replacement causes alteration work to the environment. To facilitate the maintenance all separate gear environments were examined. In the course of the thesis, the oil maintenance of the circulation lubrication of the outside gears as well as its development potential was studied.

SAP data system, archives and personal interviews were used to collect the necessary data. All observations and results were collected to a chart. The chart was made with Microsoft Excel program and all the data in the chart is individually categorized. The chart can be used in maintenance planning.

All observations regarding the spare part and oil maintenance will improve the ability of Efora Oy to perform maintenance operations for PK5 line.

Key words: maintenance, spare part survey, gearbox, oil maintenance.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	VI
1. JOHDANTO	1
2. EFORA OY	2
3. STORA ENSO OYJ	4
3.1. Veitsiluodon tehtaot	4
3.2. PK5-linja	5
4. KUNNOSSAPITO	7
4.1. Kunnossapidon määritelmä	7
4.2. Kunnossapitolajit	8
4.3. Kuntoon perustuva kunnossapito	10
4.3.1. Laitteen kriittisyys	11
4.3.2. Kunnonvalvonta	11
5. HAMMASVAIHTEET	13
5.1. Hammaspyörät	15
5.2. Hammasvaihteiden ja hammaspyörien kehitys	18
5.3. Hammasvaihteiden kunnonvalvonta	18
5.4. Hammasvaihteiden vaurioita	21
5.5. Hammasvaihteiden voitelu	22
6. TRIBOLOGIA	25
6.1. Pintojen väliset kosketukset	25
6.2. Liikkuva kosketus	26
6.3. Vierivä liike	28
6.4. Kuluminen	29
6.4.1. Kulumismekanismit	30
6.4.2. Liikkeen aiheuttama kuluminen	32
6.4.3. Kulumisen vaikuttavat tekijät	33
6.5. Voitelu	34
6.5.1. Voitelumekanismit	35
6.5.2. Hydrodynaaminen ja hydrostaattinen voitelu	37
6.5.3. Elastohydrodynaaminen voitelu	38
6.6. Kiertovoitelu	39
7. TYÖN SUORITUS	42
7.1. Nykytilanteen kartoitus	42
7.2. Ympäristön tutkiminen	46
7.3. Kunnonvalvonta	47
8. ÖLJYHUOLTO	49
8.1. Öljyhuollon kehittäminen	49
8.2. Energiansäästö	50
9. TYÖN TULOKSET	52
10. YHTEENVETO	54
11. LÄHDELUETTELO	55

12. LIITELUETTELO57

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

EHD elastohydrodynaaminen voitelu

1. JOHDANTO

Tämä työ on tehty Efora Oy:lle Stora Enson Veitsiluodon tehtaalle. Insinöörityö käsittelee PK5-linjalla toimivia erillisvaihteita ja niihin liittyvää kunnossapitoa.

Toimin kesällä 2011 kesätöissä Efora Oy:llä Veitsiluodossa kunnossapitoasentajana. Samalla töissä ollessani tiedustelin aihetta opinnäytetyölle. Työn aiheen antoi PK5-linjan kehitysinsinööri Marko Julku. PK5-linjalla oli ollut ongelmia käyttövaihteiden kanssa kesällä 2011, joten aihe työlle löytyi tätä kautta.

Työn aiheena on PK5-linjan erillisvaihteiden kartoitus. Kartoituksen kohteena olivat linjalta toimivat vaihteet ja niiden tiedot, vaihteiden varaosatieidot ja varaosatilanne varastossa sekä vaihteen rikkoutumisen tapahtuessa korvaavan vaihteen aiheuttamat muutostyöt. Vaihteiden kunnossapidosta tarkastelun kohteena olivat kunnonvalvonta ja ennakkohuollot, erityisesti öljyhuolto. Samalla tuli selvittää, miten vaihteen muovipidikkeellinen laakeri voidaan havaita.

Työ rajattiin koskemaan PK5-linjan erillisvaihteita, minkä vuoksi muun muassa linjalla sijaitsevat telavaihteet eivät sisällyneet työhön. Vaihteita käyttävien sähkömoottorien, kytkimien ja akseleiden tutkiminen rajattiin myös työn ulkopuolelle.

Tavoitteena oli saada PK5-linjalla toimivien vaihteiden varaosatieidot ajan tasalle, selvittää mahdolliset ongelmat, kehityskohteet sekä muutostyöt. Työn tulokset Efora Oy:lle toimitettiin taulukkona, josta selviää linjastolla olevat vaihteet, niiden malli, sijainti, varaosat ja varavaihteet sekä mahdolliset erityishuomiot.

Työn tekemiseen oli varattu riittävästi aikaa ja työtilat Eforan tiloista Veitsiluodosta. Työssä käsitellään myös hammasvaihteita, niiden toimintaa ja niihin liittyvää teoriaa.

2. EFORA OY

Efora Oy on Stora Enson ja ABB:n yhteisyritys, joka on erikoistunut kunnossapito- ja Engineering –palveluihin. Efora on teollisuuden tuotantolinjojen elinkaaren hallinnan, tuotantotehokkuuden, häiriöttömän käynnin turvaamisen ja kehittämisen osaaja. /3/

Vuonna 2008 Stora Enso selvitti kunnossapitotoimintojen uudistamisen tuomat edut ja vaikutukset Suomessa sijaitsevilla tehtailla. Selvityksen perusteella havaittiin uudistamahdollisuuksia, joiden ansiosta voitaisiin alentaa kunnossapitokustannuksia sekä parantaa laitosten käytettävyyttä. Syyskuussa Stora Enso ja ABB allekirjoittivat aiesopimuksen ja lokakuussa sopimuksen Efora -nimisen kunnossapitoyrityksen perustamisesta. /3/

1.1.2009 Efora aloitti toimintansa. ABB hallinnoi Eforaa soveltaen ABB Full Service®-konseptia. Stora Enso omistaa Eforasta 51 % ja ABB 49 %. /3/

Eforan sopimus koskee Stora Enson Veitsiluodon, Oulun, Varkauden, Imatran, Uimaharjun ja Heinolan tehtaiden kunnossapitopalveluja. Sopimukseen on sisällytetty kunnossapitoa, suunnittelu- ja projektitoimintoja, sekä teknistä ostoa, varastotoimintoja ja dokumenttien hallintaa. /3/

Efora hyödyntää kattavaa verkostoaan, jonka avulla se voi tarjota muun muassa tehokasta kokonaiskunnossapitopalvelua, osaavaa ja kohdennettua erikoiskunnossapitoa, sekä maailman luokan suunnittelu- ja projektointipalvelua. /3/

Eforan tarjoamat kokonaiskunnossapitopalvelut perustuvat ABB Full Service®-konseptiin. Pitkäaikaisissa, suorituskykyyn perustuvissa sopimuksissa Efora sitoutuu tuotantolaitosten suorituskyvyn ja luotettavuuden ylläpitämiseen sekä kehittämiseen. Efora antaa arvolupauksen, jossa lupaa täyttää TTT- ja ympäristövaatimukset, parantaa tuotannon ja talouden suorituskykyä, johtaa kunnossapitoa liiketoimintana, parantaa luotettavuutta ja pidentää prosessilaitteiden elinkaarta ja hyödyntää ABB:n globaalia verkostoa ja resursseja. /3/

Efora Engineering –palvelussa voidaan muun muassa kehittää tuotantotehokkuutta, kapasiteettiä tai pidentää laitoksen elinkaarta. Investointihankkeiden valmistelussa, tehdasinvestoinneissa, pienprojekteissa ja kehityshankkeissa sekä suunnittelupalveluissa Efora hyödyntää kokemustaan maailmanluokan investointiprojektien johtamisesta ja suunnittelusta. /3/

Efora Oy:n erikoiskunnossapito käsittää:

- laitehuollon
- telahuollon
- mittaavaa kunnonvalvontaa
- sähkö- ja automaatiokunnossapitoa. /3/

3. STORA ENSO OYJ

Stora Enso on pakkaus-, paperi- ja puuteollisuuden maailmanlaajuinen edelläkävijä. Stora Enson palveluksessa on maailmanlaajuisesti noin 30 000 ihmistä ja sillä on 85 tuotanto yksikköä ympäri maailmaa. Vuonna 2010 sen liikevaihto oli 10,3 miljardia euroa. /14/

Stora Enson tuotantokapasiteetti on 11,8 miljoonaa tonnia paperia ja kartonkia, 1,3 miljardia neliometriä aaltopahvia ja 6,4 miljoonaa kuutiometriä puutuotteita. Stora Enson henkilöstöstä työskentelee 26 % Suomen tehtailla. Paperi ja kartonkiteollisuudesta sijaitsee 38 % Suomessa. /14/

Stora Enson missio on hyödyntää ja kehittää osaamistaan uusiutuvien raaka-aineiden käytössä. Yhtiön tuotteet tarjoavat ympäristöystävällisen vaihtoehdon ja pienemmän hiilijalanjäljen verrattuna moniin kilpaileviin tuotteisiin, jotka on valmistettu uusiutumattomista raaka-aineista. /14/

Stora Enso keskittyy tulevaisuudessa kasvumarkkinoihin Kiinassa ja Latinalaisessa Amerikassa, kuitupohjaisiin pakkauksiin, puuviljelmiltä peräisin olevaan selluun sekä tiettyihin paperilatuuihin. Pakkausalalla on paljon mahdollisuuksia tuoteinnovaatioihin, joiden avulla Stora Enso voi tarjota ympäristöystävällisiä ratkaisuja asiakkailleen. /14/

3.1. Veitsiluodon tehtaat

Kemin Veitsiluodossa sijaitsee maailman pohjoisin paperitehdas. Veitsiluodossa tuotetaan tulostus-, kirjekuori- ja vihkopaperia, päällystettyä aikakauslehtipaperia ja sahatavaraa. Veitsiluodossa on kaksi tulosyksikköä: Stora Enso Fine Paper ja Stora Enso Magazine Paper. /15/

Stora Enso Fine Paper:iin kuuluu PK2, PK3, arkittamo, sellutehdas ja Veitsiluodon saha. Paperinvalmistuslinja 2 ja 3 tuottavat kirjekuori-, kouluvihko- ja tulostuspaperia. Arkitta-

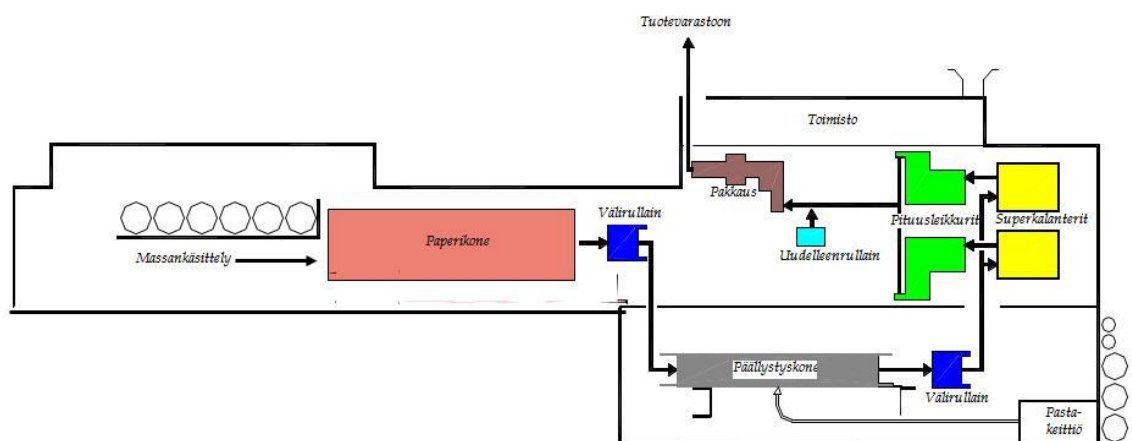
mon tuotteina ovat A4, A3 ja tuumakoon arkit. Sellutehdas tuottaa happivalkaistua koivu- ja havusellua. Veitsiluodon saha tuottaa saha-tuotteita. /15/

Stora Enso Magazine Paper:in sisältyy PK1 ja PK5, jotka tuottavat päällystettyä aikakausilehtipaperia. Hiomo toimittaa mekaanista massaa koneille ja osa sellusta toimitetaan Oulun tehtaalta. /15/

3.2. PK5-linja

Paperinvalmistuslinja viisi eli PK5-linja valmistaa päällystettyä aikakausilehtipaperia, NovaPress ja NovaPress Silk. Valmistettavien papereiden neliömassat vaihtelevat 60 g ja 80 g välillä. PK5-linjan vuotuinen tuotantokapasiteetti on 260 000 tn, trimmileveys 7,45 m, pohjakoneen rakennenoisuus on 1300 m/min ja päällystyskoneen 1400 m/min. /15/

PK5-linja koostuu paperikoneesta, päällystyskoneesta, kahdesta välirullaimesta, kahdesta superkalanterista, kahdesta pituusleikkurista, uudelleenrullaimesta sekä pakkauslinjasta. PK5-linjan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. /17/



Kuva 1. PK5-linja./17/

Pohjapaperikone käynnistyi vuonna 1972 Valmet Oy:n ja Beloit Walmsley Ltd toimittamana. Kone on muokattu Valmet Oy:n toimesta vuosina 1985, 1995 ja 1996. Alun perin PK5-linjalla on valmistettu sanomalehtipaperia. Vuonna 1985 kone muutettiin tuottamaan MWC -painopaperia. Viimeisimmät suuret muutokset on tehty vuosina 1995 ja 1996 jolloin muun muassa koneen pyörimisnopeutta on nostettu. Vuonna 1985 otettiin käyttöön myös päällystyskone, jonka toimittajina toimivat Wärtsilä Oy ja Voith GmbH. Päällystyskone on uusittu 1996 Voith Sulzer:n toimesta. /17/

4. KUNNOSSAPITO

Kunnossapidon ensisijainen tehtävä on pitää laitteet toimintakunnossa. Vanhanaikainen korjaamotoiminta ei ole kunnossapidon päätarkoitus, vaikka rikkinäisten laitteiden korjaus kuuluukin osaksi kunnossapitoa. Kunnossapitotoiminta on kehittynyt kohti tuottavaa kunnossapitoa. Kunnossapito on tärkeä tuotannollinen tekijä, koska hyvällä kunnossapidolla voidaan ehkäistä odottamattomat käyttökatkokset ja pystytään varmistamaan tuotantolaitoksen kilpailukyky. Kunnossapito voikin olla harhaanjohtava käsitys henkilöille, jotka eivät työskentele kunnossapidon parissa. Kunnossapidon parissa työskentelevillä henkilöillä on selkeä käsitys kunnossapidosta, joka vaihtelee suuresti sen mukaan millaisen kunnossapidon parissa työskennellään. /12/, /10/

4.1. Kunnossapidon määritelmä

Kunnossapidon määritelmä standardeissa PSK 6201 ja SPK 7501: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson ajan.” /10/

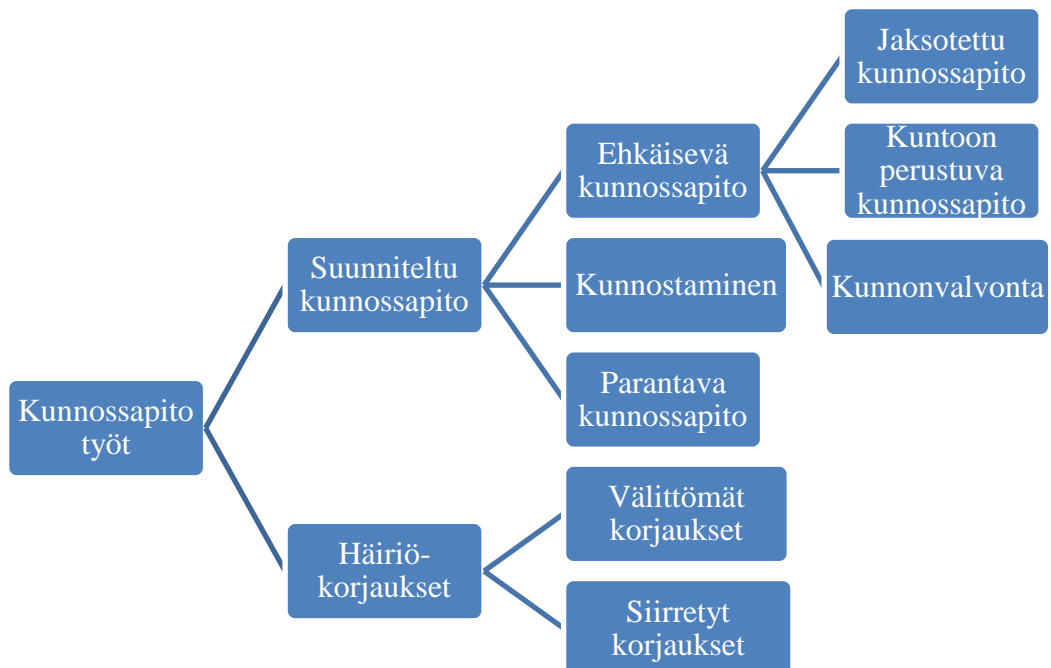
Kunnossapito on määritelty SFS-EN 13306 standardissa seuraavasti: ”Kunnossapito koostuu kaikista kohteen eliniän aikaisista teknisistä, hallinnollisista ja liikkeenjohdollisista toimenpiteistä, joiden tarkoitus on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyvyn sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon.” /6/

John Moubray on määritellyt kunnossapidon seuraavasti: ”Kunnossapidolla varmistetaan, että laitteet jatkavat sen tekemistä, mitä käyttäjät haluavat niiden tekevän.” Moubray on alalla tunnettu edelläkävijä ja hänen määritelmänsä perustuu siihen ideologiaan, että joku tietää mitä laitteen halutaan tekevän. /10/

Kunnossapidolla pyritään huolehtimaan laitteen toimintakunnosta tai pyritään kunnostamaan laite siten että se pystyy täyttämään sille tarkoitetun tehtävän. Kunnossapitoon liittyy teknisten suoritusten lisäksi hallinnolliset ja johtamisen toimenpiteet. /10/

4.2. Kunnossapitolajit

SFS-EN 13306 standardissa kunnossapitolajit on eritelty vian havaitsemisen mukaan. Vika on aikaisemmin merkitty tilaksi, jossa laite ei pysty täyttämään sille tarkoitettua tehtävää. Tästä johtuen ehkäisevän kunnossapidon alaisuuteen kuuluivat kaikki toimenpiteet, jotka suoritettiin ennen laitteen rikkoutumisesta johtuvaa seisokkia. PSK 7501 standardissa jaottelu on suoritettu ajatellen onko kunnossapitotyön aiheuttanut käyttökatkos vai onko työ suunniteltu. PSK 7501 standardin jaottelu näkyy kuvassa 2. /6/



Kuva 2. Kunnossapitolajit PSK 7501. /10/

Standardeissa läpikäydyt lajittelut eivät huomioi kunnossapidon kehittymistä, vaan keskittyvät enemmän vikaantumiseen ja korjaamiseen. Käsite RTF eli Run To Failure ei ole standardisoitu, vaikka sitä käytetään osana kunnossapitostrategiaa. RTF soveltuu kohte-

siin, joilla ei ole suurta kriittisyysastetta. RTF tarkoittaa sitä, että laitteelle ei tehdä ennakko-
huoltoja, vaan laite korjataan tai korvataan vasta hajoamisen jälkeen. RTF -kohteita ovat
esimerkiksi valaistuksessa käytetyt hehkut. Kunnossapidon analysointia ei ole käsitelty
standardeissa. /6/

Kunnossapitotoiminta voidaan kuitenkin jakaa viiteen pääryhmään, jotka esiintyvät joka-
päiväisessä toiminnassa. Ryhmät ovat huolto, ehkäisevä, korjaava, parantava kunnossapito
sekä vikojen tutkiminen ja analysointi. /6/

Huollon avulla pidetään yllä koneen toimintakykyä tai pyritään palauttamaan se ennen
vikaantumista ja vaurioitumista. Huoltojen jaksotus voidaan määrittää käyttötuntien tai
määräajan mukaan. Jaksotetussa huollossa kohteelle tehdään toimenpiteet, joiden avulla
laite pidetään toimintakykyisenä. /6/

Huollon ja ehkäisevän kunnossapidon tehtävät sivuavat toisiaan. Ehkäisevällä kunnossapi-
dolla tavoitteet ovat huollon tavoin laitteen toimintakyvyn ylläpitämisessä ja vikaantumi-
sen estossa. Ehkäisevä kunnossapito on kuntoon perustuvaa kunnossapitoa, joka sisältää
kunnonvalvontaa, tarkistuksia sekä käyttöparametrien seuranta. Kunnonvalvonnan avulla
seurataan laitteen toimintakykyä ja pyritään ennustamaan mahdollinen laiterikko. Ehkäise-
vää kunnossapitoa voidaan suorittaa määräajoin tai tarpeen vaatiessa. /6/, /10/

Korjaavassa kunnossapidossa on kyse vikojen korjaamisesta. Korjaava kunnossapito voi
olla häiriöstä johtuva eli suunnittelematon tai suunniteltu kunnostus. Korjaavassa kunnos-
sapidossa pyritään paikallistamaan, tunnistamaan ja korjaamaan vika, tärkeimpänä tehtä-
vänä toimintakyvyn palauttaminen. /6/

Parantavassa kunnossapidossa tehdään laitteelle muutoksia, joita voi olla kolmenlaisia.
Muutokset voivat olla komponenttien päivitystä, joilla ei ole varsinaista suorituskykyä pa-
rantavaa vaikutusta. Laiteille voidaan myös suorittaa uudistuksia, joilla pyritään paranta-
maan luotettavuutta. Modernisaatioissa pyritään nostamaan laitteen suorituskykyä. Esi-
merkkinä modernisaatiosta on paperikoneen suorituskyvyn ja kilpailukyvyn parantaminen,
on halvempi uudistaa vanhaa konetta kuin tilata uusi. /6/

Vikojen ja vikaantumisten analysointia ei ole standardisoitu. Vaikka menetelmää käytetään kunnossapidossa, ei sen käyttö ole systemaattista. Analysoinnilla pyritään selvittämään vikaantumisen syyt ja seuraukset. Tuloksia voidaan käyttää hyväksi luotettavuuden parantamisessa, jolloin vastaavat viat voidaan ennaltaehkäistä. Pitkällä ajanjaksolla vikojen ja vikaantumisten selvittäminen voi olla taloudellisesti kannattavaa. Analysoinnin ja parantuneen luotettavuuden avulla yritys voi saada itselleen parempaa markkina-arvoa. /6/

4.3. Kuntoon perustuva kunnossapito

Kuntoon perustuva kunnossapito on ehkäisevää kunnossapitoa, jossa pyritään pitämään yllä suorituskykyä tai palauttamaan se. Toiminta on säännöllistä ja aikataulutettua. Kuntoon perustuvan kunnossapidon suunnittelu tehdään yksilöllisesti jokaiselle tuotantolaitokselle, soveltaen laitoksen tarpeita ja tavoitteita. /6/, /10/

Kuntoon perustuvan kunnossapidon merkitys kasvaa tuotantolaitoksissa, joissa on käytössä jatkuva prosessi. Huoltoseisokki merkitsee aina myös tuotantokatkoa, jolloin laitos ei tuota ja katkos voi aiheuttaa merkittäviä tuotantotappioita. Tuotantolaitoksessa joissa prosessi ei ole jatkuvaa, kuntoon perustuvan kunnossapidon merkitys on enemmän suoritus- ja laaduntuotantokyvyn ylläpitämistä. Huolto sekä korjaustoimenpiteet voidaan sijoittaa tuotannon ulkopuoliselle ajalle, esimerkiksi viikonlopuille. /10/

Koneen tai laitteen ikä ei suoraan tarkoita sitä, kuinka herkkä se on vikaantumiselle. Tästä syystä onkin tärkeä valvoa laitteen kuntoa sille sopivilla menetelmillä. Suurin osa vioista ja vikaantumisista on satunnaisia. Kunnonvalvonnan olettamuksena on se, että laitteen vika esiintyy asteittain ja on havaittavissa ennen laitteen hajoamista. /10/

Kuntoon perustuva kunnossapito pohjautuu aina kyseisen tuotantolaitoksen tavoitteisiin. Tavoitteet tulevat yrityksen johdolta ja ovat yleensä tunnuslukuja, joihin kunnossapidolla pyritään pääsemään. Nykypäivän trendin mukaisesti tunnusluvuilla haetaan myös kehitystä ja tavoitteet pyritään täyttämään vuosi vuodelta paremmin. /10/

4.3.1. Laitteen kriittisyys

Tuotantolaitoksessa olevilla laitteilla on erilaisia tehtäviä, joista toiset ovat kriittisempiä laitoksen toiminnan kannalta. Laitteiden kunnonvalvonta realisoidaan siten, että elintärkeiden laitteiden kunnonvalvontaa panostetaan enemmän kuin laitteiden joiden vikaantuminen ei aiheuta suurta riskiä tai epätoivottua tulosta.

PSK 6800 standardissa käsitellään laitteiden kriittisyyskartoitusta. Kriittisyys kuvaa laitteeseen liittyvän riskin suuruutta. Riski voi liittyä henkilövahinkoon, materiaaliseen tai tuotannolliseen menetykseen tai epätoivottuun seuraukseen. Riskin suuruus kertoo vian vaikutuksen ja todennäköisyyden. Oikein valitut kriittisyysanalyysin parametrit sekä laaja asiantuntemus eri osa-alueilla takaavat luotettavan kriittisyysanalyysin. /10/

4.3.2. Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonnassa pyritään mittausten ja analyysien perusteella tutkimaan laitteen kuntoa. Koneen tai laitteen käyttötarkoitus määrittää millaisia kunnonvalvonta menetelmä käytetään, sekä mitä parametreja seurataan. Yleisimmin käytetty kunnonvalvontamenetelmä on värähtelymittausten suorittaminen. Värähtelymittausten lisäksi laitteen kuntoa valvotaan visuaalisella tarkastelulla, lämpötila seurannalla, öljyanalyysin sekä sähkötekniisiä valvontamenetelmiä hyödyntäen. /10/

Kriittisyysanalyysin avulla voidaan määrittää millaisia kunnonvalvontamenetelmiä kohde vaatii. Kunnonvalvonnan pitää olla toteutettu siten, että se toteuttaa tekniset ja taloudelliset tavoitteet. Kunnonvalvonnan merkitys on kasvanut yritysten keskuudessa ja yhä useammat yritykset ovat ottaneet sen yhdeksi keinoksi kannattavuuden parantamiseksi. /10/, /12/

Kunnonvalvonta on investointi, mutta sen avulla voidaan nostaa tuotantoaikaa ja parantaa tuottavuutta. Kunnonvalvonnan avulla voidaan seisokkien kestoa lyhentää jopa 50 %.

Kunnonvalvonnan avulla saatujen etujen periaate selviää kuvasta 3. Kunnonvalvonnan avulla voidaan ennakoida vikaantumisen, jolloin vika ei ehdi vaurioksi. /12/

Ilman kunnonvalvontaa



Kunnonvalvonnan avulla

Kuva 3. Tuotantoajan lisäys kunnonvalvonnan avulla. /12/

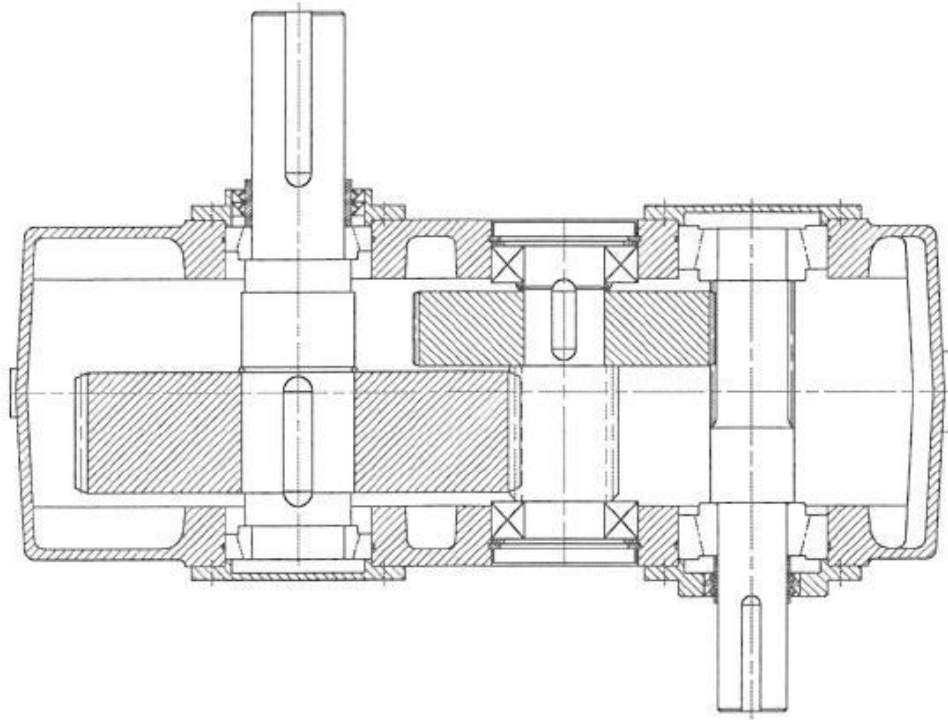
5. HAMMASVAIHTEET

Hammasvaihde on kokonaisuus, jota käytetään voimansiirrossa, kun halutaan muuttaa käyttölaitteen pyörimisnopeutta, momenttia tai pyörimissuuntaa. Vaihdetta pyörittää sähkömoottori, joka voidaan kiinnittää moottoriin käyttötarkoituksen mukaisesti hihnavälityksellä, kytkimellä tai asentamalla suoraan vaihteeseen. /2/, /1/

Yleensä vaihde rakennetaan kaksiosaiseen valurautaiseen koteloon. Kotelon rakenne riippuu vaihteen tyypistä. Perinteinen jalkavaihde avautuu akseleiden laakeroinnin kohdalta, mutta esimerkiksi tappivaihteessa on kaksi puoliskoa, jolloin laakerointi tulee molempiin puoliskoihin. Kotelo toimii myös öljysäiliönä ja se voidaan liittää kiertovoiteluun tai kiertovoitelun ulkopuoliseen vaihteeseen voidaan asentaa öljypumppu. /1/

Kotelon sisällä on laakeroidut akselit, hammaspyörät sekä mahdollinen voiteluputkisto. Hammaspyörien tehtävänä on välittää pyörimisliikettä akselilta toiselle. Hammaspyörien hammaslukuja muuttamalla voidaan saada haluttu pyörimisnopeus aikaiseksi. Monimutkaisemmassa vaihteistossa voidaan yhden sähkömoottorin teho välittää useammalle akselille tai vaihtoehtoisesti yhtä käyttökohdetta voi käyttää kaksi sähkömoottoria. Välityspor-
taiden lukumäärä ilmoittaa moniko portainen vaihde on. /14/

On olemassa monia erilaisia vaihdetyyppejä ja niitä voidaan kategorioida monella tavalla, esimerkiksi asennustavan, akseliasennon tai hammasmuodon perusteella. Vaihteiden jako voi tapahtua jalka- ja tappivaihteisiin, vaaka- ja pystyvaihteisiin sekä lieriö- ja kartiovaihteisiin. Jalkavaihteet ovat vaihteita, jotka on asennettu omalle pedille. Kuvassa 4 on leikkauskuva lieriöhammasvaihteesta, josta selviää vaihteen toimintaperiaate. Tappivaihde on vaihde, jossa toisioakselin tilalla on reikä, johon käytettävän kohteen akseli asennetaan. /18/

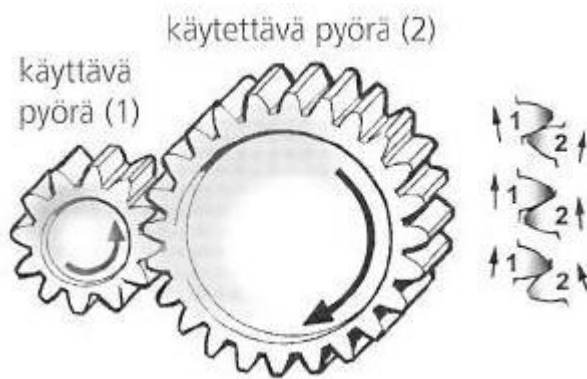


Kuva 4. Leikkauskuva kaksiportaisesta lieriöhammasvaihteesta. /2/

PK5-linjalla käytössä olevista vaihteista suurin osa on Valmet Oy:n valmistamia. LA -sarjan hammasvaihteet ovat Valmet Oy:n valmistamia vaihteistoja, jotka on valmistettu 70-luvulla. LA -sarjan vaihteet ovat katalogista valittuja vaihteita, eikä niitä ole räätälöity kohteeseen. 1980-luvulla S-sarjan hammasvaihteet korvasivat LA -sarjan. S-sarjan vaihteet ovat LA -sarjan tavoin katalogivaihteita. Molemmat LA- ja S-sarjan vaihteet ovat luotettavia ja varmatoimisia vaihteita. LA -sarjan luotettavuudesta kertoo se, että osa käytössä olevista vaihteista on alkuperäisiä. Erona vanhoissa hammasvaihteissa uusiin vaihteisiin on suunnittelussa, vanhojen vaihteiden varmuuskertoimet ovat suurempia, mikä tuo luotettavuutta. /4/, /18/

5.1. Hammaspyörät

Hammaspyörän tutuin muoto on akselille asennettava kiekko, johon on koneistettu hammastus. Hammaspyöräparissa käytävän ja käytettävän hammaspyörän hammastukset sopivat toisiinsa. Hammaspyöräpari muuttaa akselin pyörimissuuntaa, joka selviää kuvasta 5. Hammaspyörien hampaat toimivat voiman ja momentin siirtäjinä. Hampaan muodolla pystytään vaikuttamaan siihen, että rattaat pysyvät kosketuksissa toisiinsa. Suosituin hammas-
tusu muoto on evolventti. /1/



Kuva 5. Hammaspyöräpari. /1/

Hammaspyöriä voidaan valmistaa lastuamalla tai valamalla. Suurien hammaspyörien valmistuksessa voidaan kiekko tehdä teräksestä ja hammastus kalliimmasta materiaalista. Hammaspyörissä käytettävä materiaali on oltava tarpeeksi lujaa, koska hampaan tyviosaan kohdistuu suuri taivutusjännitys. Koska hampaat ovat kosketuksissa toisiinsa, on niiden tribologiset ominaisuudet oltava hyvät, ettei pyöräparin hyötysuhde kärsi. /1/

Hammasvaihteiden välityssuhde muodostuu käytävän ja käytettävän akselin pyörimisnopeudesta. Hammasvaihteiden välityssuhdetta merkataan pienellä i -kirjaimella. Hammaspyörien pyörimisnopeudet, hammasluvut ja jakohalkaisijat ovat verrannollisia toisiinsa. Pyörimisnopeudet ovat kääntäen verrannollisia hammaslukuihin ja jakohalkaisijoihin. Vaihteen välityssuhteen ollessa alle yksi on kyseessä alennusvaihde ja välityssuhteen ollessa yli yksi on kyseessä ylennysvaihde. /18/

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1} \quad (1)$$

missä

i on välityssuhde

n on pyörimisnopeus

z on hammasluku

d on jakohalkaisija

2- tai useampiportaisista vaihteista puhuttaessa on kyseessä vaihde, jossa on kaksi tai useampi hammaspyöräpari. Vaihteen kokonaisvälityssuhde saadaan kertomalla pyöräparien välitykset. /18/

$$i_{kok} = i_1 \times i_2 \quad (2)$$

missä

i_{kok} on kokonaisvälityssuhde

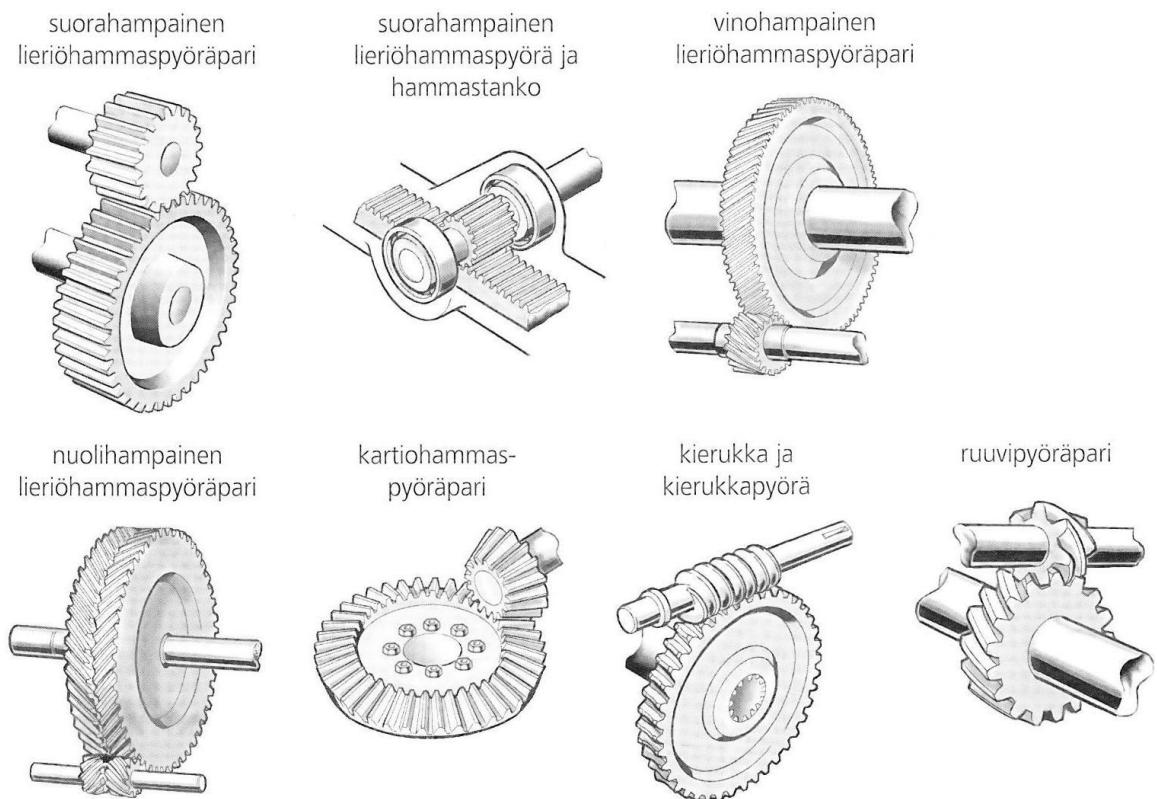
i_1 on ensimmäinen välityssuhde

i_2 on toinen välityssuhde

Hammaspyöräparin rakenne sovelletaan sopivaksi käyttökohteeseen. Lieriöhammaspyöriä, kartiohammaspyöriä sekä kierukkakäyttöä käytetään hammasvaihteissa, vaihteen tyypistä riippuen. /1/

Lieriöhammaspyörät ovat aihioltaan lieriöitä, johon on työstetty suora, vino tai nuolikuviainen hammastus. Suorahampaisten hammaspyörien valmistus on halpaa, mutta niiden käyntiäänät ovat suuret, eikä käynti ei ole tasaista. Vinohampaisessa hammaspyöräparissa käynti paranee, mutta vinosta hammastuksesta johtuen aiheutuu akselinsuuntaisia voimia. Nuolimaisessa hammaskuviossa akselivoimat ovat vastakkaisuuntaiset ja kumoavat toisensa. Hammaspyörien valmistus on standardisoitu ja Suomessa käytetty standardi pohjautuu ISO -standardiin. /1/

Kartiohammaspyörien käyttö on yleistä kohteissa, joissa voimansiirto täytyy kohdistaa eri kulmaan, esimerkiksi kulmavaihteessa. Hammasmuodot kartiopyörissä ovat suora, vino ja kaareva. Suoraa hammastusta käytetään hitaissa kohteissa. Vino- ja kaarevahammaskäyttö sopii kohteisiin, joissa vaaditaan käyntitarkkuutta. Vino- ja kaarevahammasmuoto on suoraa hammastusta hiljaisempi. Kuvassa 6 on kuvattu esimerkkejä erilaisten hammaspyörien ja hammasmuotojen sovelluksista. /1/



Kuva 6. Hammaspyöräkäytöt. /1/

Kierukka on ruuvimainen hammaspyörä. Kierukat ovat tarkasti standardisoituja. Kierukoi-
ta käytetään kohteissa, joissa halutaan saada aikaiseksi suuri välityssuhde. Kierukkavaiht-
teet, työstöpöydät ja jakolaitteet ovat kierukkapyöräparien tyypillisiä sovelluskohteita. /1/

Ruuvipyöräparin hammaspyörät ovat kierukkaa lyhyempiä, mutta muistuttavat ulkonäöl-
tään lieriöhammaspyörää. Pyörät ovat samankätisiä ja akselilinjat antavat paljon joustoa.
Etuina ruuvipyöräparissa on akselilinjien joustavuus sekä jouheva käynti. /1/

5.2. Hammasvaihteiden ja hammaspyörien kehitys

Vaihteiden kehityksen myötä, niiden koko on pienentynyt. Vaihteiden koon pienemiseen on ollut syynä hammasmuotojen helpotukset, lujuuslaskennan kehittyminen, kehittynyt materiaali tuntemus, parempi käyttökohteen tuntemus sekä kova kilpailu. /18/

Pyörimisnopeuksien kasvun myötä, on vaihteiden melutaso noussut. Meluun vaikuttavia syitä on useita. Käyttö, olosuhteet, käytetyt materiaalit sekä valmistustapa vaikuttavat melun syntyyn. Asennusvirheet voivat olla myös yksi melun aiheuttaja. Huono linjaus voi aiheuttaa huonon ryntösuhteen ja hammaskosketuksen. /2/

Hammaspyörien kehitys on edesauttanut melun pienemistä. Hammasmuodot ovat kehittyneet, etenkin evolventti hammastuksen avulla saadaan merkittäviä tuloksia aikaan. Evolventti hammastuksessa hampaiden kosketus alkaa vähitellen ja saadaan jatkumaan mahdollisimman pitkään. Evolventti saadaan matemaattisesta käyrästä. Muita hammaspyörille tehtyjä helpotuksia ovat:

- hampaan profiilihelpotus, eli pää- ja tyvihelpotus
- hampaan tyvipyöristys
- hampaan pituushelpotus
- bombeeraus. /18/, /2/

Hammaspyörissä käytetty materiaali, oikeanlainen voitelu, hammasmuotojen helpotukset ja oikeaoppinen asennus edesauttavat melutason ja värähtelyn hallitsemiseen sekä vaihteen toimivuuteen. /1/

5.3. Hammasvaihteiden kunnonvalvonta

Kunnonvalvonnan avulla pyritään selvittämään kohteen nykytilanne sekä ennakoimaan mahdollinen vaurioituminen. Oikeaoppisella kunnonvalvonnalla voidaan vaikuttaa muun muassa seisokkien määrään ja keston, varaosavaraston kokoon, sekä vähentää ylimääräi-

siä koneen avaamisia. Kunnonvalvonnan avulla voidaan määritellä, millainen vaurio on kyseessä ja tehdä valmistelevat toimenpiteet etukäteen, esimerkiksi valmiiksi laakeroidut akselit säästävät aikaa. /18/

Vaihteiden kehityksen myötä myös vaihteiden kunnonvalvonnan merkitys on korostunut. Mitä yksinkertaisempi vaihde on, sitä helpompi sen kunnonvalvonta on. Lieriövaihteissa voi olla jopa 6 eri pyörimistaajuutta, sekä 10 erilaista laakeria. Planeettavaihteistoissa voi olla jopa 10 pyörimistaajuutta ja 10 erilaista laakeria. /18/

Vaihteiden kunnonvalvontaan on erilaisia menetelmiä, joita yhdistelemällä saadaan parhaat mahdolliset tulokset. Laitteen käyttöhenkilöstön suorittamat päivittäiset aistihavainnot ovat yksi merkittävimmistä ja parhaista kunnonvalvontamenetelmistä. Hiljaisen tiedon omaavat käyttömiehet osaavat laitteen äänen perusteella epäillä mahdollista vaurioitumista. Aistihavainnot ovat kuitenkin vain yksi menetelmä. Visuaalisella tarkastelulla katsotaan kohteesta mahdolliset öljyvuodot, suojiin kunto, kiinnitykset, lämpötila sekä öljyn paine. Myös muiden huomioiden tekeminen on tärkeää. /18/

Säännöllisesti toteutetut kunnonvalvontamittaukset ovat tärkeitä. Värähtelymittauksissa ei yksi yksittäinen mittaustulos kerro vielä paljoa, mutta mittaustulosten seuranta antaa viitteitä mahdollisesta vaurioitumisesta. Värähtelymittausten laadun varmistamiseksi onkin hyvä että mittaukset suorittaa aina sama henkilö, jolloin inhimillisen virheen marginaali jää mahdollisimman pieneksi. Kuvassa 7 PK5-linjan ennakkohuoltomies suorittaa kunnonvalvonnan värähtelymittauksia vaihteelle. Värähtelyyn vaikuttavia asioita ovat muun muassa laitteen perustukset, asennus, huono hammaskosketus, hammaspyörien ja akselien epätasapaino, kytkin, laakerivika sekä käytävä sähkömottori tai käytettävä kone. Värähtelyn aiheuttajan määrittäminen voi olla myös mahdollista vertailemalla värähtelytaajuuksia. Jokaisella vaihteen osalla on oma nimellinen värähtelytaajuus. Värähtelymittauksia varten tarvitaan kohteen tekniset tiedot. Tärkeimmät tekniset tiedot ovat pyörimisnopeus, vaihteen malli, hammasluvut, laakerityypit ja käyttöteho. Mitä pidemmältä ajalta mittaustuloksia on analysoitavaksi, sitä luotettavampi kunnonvalvonta on. /18/, /11/



Kuva 7. LA-450 värähtelymittaukset.

Värähtelymittausten ja aistihavaintojen lisäksi kunnonvalvontaan voidaan liittää lämpötilanseurantaa sekä öljynlaadunvalvontaa. Vaihteen käyttölämpötilan seuranta voidaan toteuttaa mittausohjelmilla ja lämpökameran avulla. Lämpötilan seurannassa on hyvä seurata lämpötilan kehittymistä pidemmällä aikajaksolla. Kohonnut käyntilämpötila voi olla merkki mahdollisesta vauriosta, asennusvirheestä tai heikentyneestä voiteluaineesta. Öljyn laatuun voidaan vaikuttaa vaihtamalla öljyt säännöllisesti tai ottamalla käyttöön öljyanalyysi. /18/, /11/

Vaihteita voidaan myös tarkistaa sisältäpäin. Sisäpuoliseen tarkasteluun voidaan käyttää hyväksi erilaisia kameroita. Vaihteen avaaminen on yksi tapa tarkastella vaihteen kuntoa, mutta ylimääräisellä avaamisella altistetaan vaihteen sisätilat ympäristöstä tuleville epäpuhtauksille. Sisäpuolisessa tarkastelussa tutkitaan vaihteen hammaspyörät, laakerit, öljyn kunto sekä se, onko vaihteen pohjalla metallia. /18/

5.4. Hammasvaihteiden vaurioita

Teollisuudessa käytettävät vaihteet ovat oikein käytettynä varmatoimisia. Vaihteen hajoaminen pysäyttää yleensä koko linjan. Vaurioitumiseen voi olla useita syitä ja vaurion laatu kertoo yksilöllisesti mahdollisen korjausajan. Suurin yksittäinen vaurion aiheuttaja on linjausvirhe. /4/

Hammasvaihteiden vauriot voidaan jakaa viiteen osa-alueeseen:

- hammaspyörien vauriot
- laakereiden vauriot
- koteloiden vauriot
- tiivisteiden vauriot
- kytkimien vauriot. /18/

Hammaspyörien vaurioituminen voi johtua monesta tekijästä ja vauriotyypit vaihtelevat sen mukaisesti. Vaurioon johtaneita syitä voi olla ylikuormitus, voitelussa tapahtunut virhe, materiaalivirheet sekä tärinä. Ylikuormitetun vaihteen hampaat voivat väsyä ja murtua. Voiteluaineessa voi olla väärä viskositeetti, epäpuhtauksia tai vääränlainen voitelutapa, joka aiheuttaa vaurioita. /18/

Hammaspyörissä esiintyvien vaurioiden laatu kertoo voidaanko korjaavia toimenpiteitä suorittaa. Pintakerroksissa tapahtuneita vaurioita voidaan korjata pinnoitteella. Koneistus on myös mahdollinen, mutta silloin on huolehdittava, että kuormankantopinta-ala ei jää liian pieneksi. Yhteen suuntaan pyöriviä hammaspyöriä voidaan myös kääntää. /18/

Laakerivauriot voivat johtua asennusvirheestä, huonosta voitelusta, epänormaaleista käyttöolosuhteista tai epäedullisista ympäristöolosuhteista. Laakerivaurioiden ennakointi on tärkeää sillä laakerivaurio voi aiheuttaa hammaspyörille tai kotelolle vaurioita. Laakerivauriosta syntyneet kulumispartikkelit on tärkeä saada pois voitelujärjestelmästä, etteivät ne aiheuta uutta vauriota. /18/

Koteloon kohdistuneita vaurioita ovat yleensä kulunut laakeripesä tai konerikosta johtunut kotelon vääntyminen. Yleensä vääntynyt kotelo korvataan uudella. Kulunut laakeripesä voidaan koneistaa ja holkita. Syynä kotelon vaurioon voi olla lisääntynyt kuormitus, asennusvirhe, laakeri- tai konerikko. Myös muuttunut linjaus voi aiheuttaa vaurioita. Linjaus voi muuttua lämpötilan eli lämpölaajenemisen vaikutuksesta. /18/

Tiivisteiden vauriot voivat johtua normaalista kulumisesta, väärästä materiaalista, asennusvirheestä tai linjausvirheestä. Tiivisteiden oikeanlainen asennus onkin tärkeä. Vaurioitunut tiiviste voi aiheuttaa akseliin urittumista, jonka korjaamiseen voidaan käyttää metallinruisuttamista sekä koneistamista. On tärkeä huomioida että oikeanlaista tiivistettä käytetään sille tarkoitetuissa olosuhteissa. /18/

5.5. Hammasvaihteiden voitelu

Teollisuudessa käytettävien vaihteiden voitelussa voidellaan hammaspyörien lisäksi myös laakerit ja tiivisteet. Hammaspyörien voiteluolosuhteet eivät pysy vakiona koko hammaskosketuksen ajan. Kosketuksen aikana esiintyy puhdasta vierintää, sekä vierinnän ja liukuvan kosketuksen yhdistelmää. Ryntöviivalla esiintyy puhdasta vierintää, muualla esiintyen vierinnän ja liu'unnan yhdistelmää, liu'unnan ollessa alussa ja lopussa suurimmillaan. /16/

Hammasvaihteiden voitelun voitelutilanne voi muuttua riippuen hammaspyörän kehänopeudesta. Hammaspyöräparin riittävän suurella nopeudella vallitsee hydrodynaaminen voitelutilanne, kun taas pienellä kehänopeudella voi vallita EHD- sekä rajavoiteluolosuhde. Rajavoiteluolosuhteissa vaaditaan voiteluaineelta kulumisenesto- ja EP -lisäaineistusta. Voitelukalvon muodostuminen vaihtelee hampaiden eri kohdissa. Tämä on seurasta muuttuvista liukunopeuksista. Voitelukalvon paksuus ohenee hampaankärkeä kohti, kuitenkin ollen yleensä riittävän paksuinen koko hampaan alueella. Oikean λ -arvon löytymiseksi tehtyjen kenttäkokeiden perusteella on havaittu, että kehänopeus vaikuttaa merkittävästi pintojen vaurioitumisherkkyteen. Kehänopeuden kasvaessa vaadittava λ -arvo kasvaa. /16/

Hammasvaihteiden voitelussa käytetään valmistajan suosittelemia öljyjä. Vaihdevalmistajien suositusten lisäksi voiteluaineen viskositeetin valintaan vaikuttaa DIN 51509 – standardi, sekä kohteen matemaattinen tarkastelu. Suositukset voivat olla vanhentuneita ja suositeltu öljy on voitu korvata uudemmalla. Uudemmissa öljyillä taloudellisia hyötyjä saadaan esimerkiksi öljynvaihtovälin kasvulla sekä voiteluaineen ominaisuuksien parantumisesta johtuvalla hyötysuhteen paranemisella. /8/, /9/

Vaihteelle sopivan voiteluaineen valintaan vaikuttavia kriteereitä ovat:

- Käyttölämpötilan huomioiminen, koska se vaikuttaa voiteluaineen viskositeettiin. Viskositeetin on oltava sopiva, jotta voiteluaineen voitelu riittää hitaasti pyörivissä hammaspyörissä sekä nopeasti pyörivissä laakereissa.
- Oikea viskositeetti käynnistystilanteessa, minkä merkitys kasvaa etenkin ulko-olosuhteissa.
- Riittävä kulumisenesto-, paineenkesto- ja korroosionestolisäaineistus.
- Riittävä hapettumisenestolisäaineistus. Hammaspyörien pyöriessä lentää öljyä vaihteen seinille, jolloin kosketus pinta-ala on suuri. Hapettumisnopeus kasvaa korkeissa lämpötiloissa.
- Vaahtoamisenestolisäaine. /16/

Useimmiten käytetty voitelu vaihteissa on mineraaliöljy tai PAO -perustainen öljy. Lisäaineistuksena on yleensä rikkifosfori. Kierukkavaihteet muodostavat poikkeuksen, haastavan hammasmuodon takia. Niihin suositellaan polyglykolia niiden alhaisen sisäisen kitkan (Traction coefficient) vuoksi. Öljyjen ohella vaihteita voidaan voidella myös rasvalla. Rasvavoitelu on erittäin altis epäpuhtauksille ja kulumisessa voi esiintyä ongelmia. Rasvan vaihto on öljynvaihtoa työllistävämpi toimenpide. /16/

Vaihteiden voitelutavat riippuvat kehänopeudesta. Erittäin hitaille ja nopeille vaihteille tyypillisin tapa voidella on painevoitelu. Voiteluaine pumpataan hammaspyörien ryntöihin ja laakereille. Voiteluaine tuodaan kohteeseen erillisen putkiston ja pumpun avulla. Putkisto voidaan myös kytkeä kiertovoiteluun. Erillinen voitelupumppu voi olla varustettuna omalla sähkömoottorilla tai se voi olla akselitoiminen, joka saa käyttövoimansa hammasvaihteen akselista. /18/, /16/

Kylpyvoitelussa öljyn pinta nostetaan niin ylös että hammaskosketus sekä kaikki pyörivät osat ovat öljyn pinnan alapuolella. Kylpyvoitelu sopii hitaasti pyöriville vaihteille, joiden hammaspyörien kehänopeudet ovat alle 6 m/s. /18/, /16/

Roiskevoitelussa öljyn pinnan korkeus määräytyy siten, että alimman hammaspyörän hampaat ovat pinnan alapuolella. Hammaskosketus saa öljyn hampaiden mukana kulkeutuvasta tai roiskuvasta öljystä. Laakereiden voiteluöljy roiskuu hammaspyöristä. Voitelutapa sopii keskinopeille vaihteille, joiden kehänopeudet ovat 2-15 m/s. Roiskevoitelun puhtaudesta huolehditaan riittävän usein toteutetulla öljynvaihdolla. Öljytila on hyvä huuhdella huuhteluaineella, joka on yhteensopiva voiteluaineen kanssa, mutta omaa alemman viskositeetin, täten pohjalle vajonneet kulumispartikkelit saadaan pois. /18/, /16/

6. TRIBOLOGIA

Tribologia käsittelee toisiinsa nähden liikkuvien pintojen ilmiöitä ja teknologiaa. Keskeisiä käsitteitä ovat kitka, kuluminen ja voitelu. Tribologia on siis tieteenala, jossa yhdistyvät fysiikka, kemia, koneensuunnittelu, materiaalioppi sekä tuotekehitys. Tribologian avulla pyritään saamaan haluttuja tuloksia kohteissa, joissa jokin ominaisuus halutaan saada pienemmäksi toista lisäämällä. Kitkaa vähentämällä voidaan hallita kulumista, esimerkiksi voitelun avulla. Toisaalta esimerkiksi hihnapyörissä pyritään saamaan mahdollisimman suuri kitka ja hallittu kuluminen. /7/

6.1. Pintojen väliset kosketukset

Pintojen välisissä kosketuksissa vaikuttavat tribologiset ominaisuudet riippuvat pintojen pintakerroksista, pintakerrosten alapuolisista ominaisuuksista sekä pinnankarheudesta. /7/

Tyypillisesti ilman kanssa kosketuksissa olevan metallipinnan normaalin kiderakenteen päällä on muokkautunut kerros, joka on syntynyt työstövaiheessa. Beilby-kerros syntyy kappaleen työstövaiheessa pinnan sulaessa ja levittyessä pinnalle. Kerroksen raekoko on erittäin pieni. Muokkautuneen kerroksen päällä voi olla kemiallisen reaktion tuloksena syntynyt kerros. Jos metalli on kosketuksissa ilman kanssa, syntyy pinnalle oksidikalvo. Oksidikalvolla on merkittävä vaikutus metallin kitkaan ja kulumiseen. Pinnan ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa pintakäsittelyillä sekä voiteluaineilla. /7/

Korkea pintapaine ja lämpötila voivat aiheuttaa kiinnileikkautumista. Erilaiset kerrokset ja kerrostumat pitävät normaaliolosuhteissa kitkan pienenä, eikä kiinnileikkautumista pääse tapahtumaan. Tällaisia kerroksia ovat muun muassa rasvahappo- ja oksidikerrokset. Täysin puhtaita pintoja joilla ei ole kerrostumia, on vain absoluuttisessa tyhjiössä. Puhtaalla pinnalla kitka muodostuu suureksi ja pinnat hitsautuvat toisiinsa. /7/

Pintojen lähempi tarkastelu osoittaa, ettei täysin tasaista pintaa voida saada aikaan millään valmistusmenetelmällä. Pinnan karheuden suurena käytetään keskipoikkeamaa eli R_a -arvoa. R_a -arvo ei kuitenkaan suoraan kerro millaiset tribologiset ominaisuudet materiaalilla ovat. Pintojen aaltomaisuuden vuoksi kahden pinnan kosketuksessa pinnankarheushuiput kantavat kuormituksen. Kosketuksessa vallitsevan kuormituksen suuruus määrittää onko kosketus plastinen, elastinen vai sekoitus molempia. Todellinen pinta-ala on kuitenkin näennäistä pinta-alaa huomattavasti pienempi. /7/

Monet koneenosat siirtävät kuormitusta pintoihin kehittyvän paineen avulla. Pintojen mahdollisten kaarevuuksien takia voi kosketuspinta olla pistemäinen tai viivakosketus. Tällaisen tapauksen vallitessa sovelletaan mitoituksessa Hertzin teoriaa. Teoria edellyttää että materiaalit ovat homogeenisiä, isotrooppisia ja lineaarisesti elastisia. Hertzin teoriaa sovelletaan esimerkiksi hammaspyöräparien pintapaineen mitoituksessa. Hertzin teoriaa voidaan soveltaa pallojen ja kahden lieriön väliseen kosketukseen sekä elliptiseen kosketukseen.

/7/

EHD –voitelutilanteessa vierivien pintojen väliin jäävä painejakauma eroaa Hertzin painejakaumasta. Voiteluaineen sisäänmenokohdassa paineen nousu on loivempaa kuin Hertzin teoriassa ja ulostulokohdassa sijaitsee painehuippu. Kitkavoima aiheuttaa jännitysjauman muutosta kosketuskohdassa. EHD –voitelussa kitkakerroin on tyypillisesti alle 0,1 joten jännitystilojen muutokset ovat hyvin pieniä. /7/

Jäykän pyöreän pinnan ja elastis-plastisen tason kosketuksessa saavutetaan tason myötöraja, kun kuormitus kasvaa riittävän suureksi. Plastisen muodonmuutoksen alue kasvaa ja painejakauma muuttuu puolielliptisestä kohti vakiopainetta. /7/

6.2. Liikkuva kosketus

Kosketuksissa olevien pintojen välissä vallitsee kitkavoima, joka pyrkii vastustamaan liikkettä. Kappaleen pysyessä liikkeessä vaikuttaa siihen ulkopuolinen voima, joka on yhtä

suuri kuin kitka voima, mutta vastakkaismerkkinen. Kitkakerroin tarkoittaa kitkavoiman ja normaalivoiman suhdetta. /7/

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{F_N} \quad (3)$$

missä

μ on kitkakerroin

F_{μ} on kitkavoima

F_N on normaalivoima

Kitka voidaan jaotella sen ilmenemismuodon perusteella lepokitkaan, liikekitkaan sekä sisäiseen ja ulkoiseen kitkaan. Lepokitka vaikuttaa kappaleen ollessa paikallaan ja vastustaa sen liikkeellelähtöä. Liikekitka vaikuttaa liikkeen aikana vastustaen liikettä. Lepokitka on suurempi kuin liikekitka. Toisella tapaa kitkan voi erotella ulkoisena ja sisäisenä. Ulkoinen kitka esiintyy kappaleen pinnoilla. Sisäinen kitka ilmaisee kappaleen sisällä tarvittavaa voimaa molekyylien siirtämiseksi pois tasapaino asemasta. Nesteillä ja kaasuilla sisäistä kitkaa ilmoitetaan viskositeettinä. Sisäistä kitkaa vastaan tehdystä työstä syntyy lämpöä. Kuormituksen poistuttua eivät molekyylit välttämättä palaa takaisin poikkeutettuun asemaan vaan tuloksena on muodonmuutos. /7/

Klassiset kitkalait käsittävät neljä lakia. Kaksi ensimmäistä lakia toteutuvat useimmissa tapauksissa, kolmannen lain soveltuvuus on kahta aikaisempaa pienempi. Neljättä lakia esitetään toisinaan klassisten lakien yhtenä lakina. Lait ovat:

- Kitka ei ole riippuvainen näennäisestä kosketusalasta.
- Kitkavoiman suuruus on suoraan verrannollinen normaalivoiman suuruuteen.
- Liukumisnopeus ei vaikuta liikekitkan suuruuteen.
- Lepokitka on liukukitkaa suurempi. /7/

Energiahäviöt sekä kuluminen ovat kitkasta aiheutuvia haittoja. Haitat ovat hyvin tiedostettuja ja niitä pyritään hallitsemaan monin eri tavoin. Kitkakertoimeen voidaan vaikuttaa materiaalivalinnoilla, voitelulla tai muuttamalla konstruktioita. Konstruktio muutoksissa voidaan liukuva kosketus muuttaa vieriväksi kosketukseksi. /7/

Kitkateoriat perustuvat havaintoon todellisen ja näennäisen pinta-alan sekä normaalivoiman yhteydestä. Todellinen pinta-ala on näennäistä alaa pienempi ja todellinen kosketuspinta-ala kasvaa normaalivoiman kasvaessa. /7/

Kahden pinnan puristuessa toisiaan vasten koskettavat pinnankarheushuiput vastakkaista pintaa. Kosketuskohtiin voi syntyä adhesiivisiä liitoksia, joiden purkamiseen tarvittava voima on osa kitkavoimaa. Kyntötermi tulee esille, kun toisen pinnan pinnankarheushippu tekee vastinpintaan uran. /7/

Adhesiivisen liitoksen aiheuttama kitka on kolmivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa pinnankarheushuiput koskettavat toisiaan, jolloin syntyy plastista ja elastista muodonmuutosta ja mahdollisesti kyntämistä. Toisessa vaiheessa syntyy adhesiivinen liitos, jonka purkamiseen tarvitaan energiaa. Kolmannessa vaiheessa liitos repeää ja tapahtuu elastinen palautuminen. /7/

Kosketuksessa olevia materiaaleja voi peittää kalvo, joka voi olla esimerkiksi polymeeripinnoite. Kevyellä kuormituksella tai paksulla kalvolla kosketuksen kitkavoima riippuu suojaavan kalvon lujuusominaisuuksista. /7/

6.3. Vierivä liike

Vierintälaakerit sekä erilaiset rulla- ja kuulajohteet ovat ratkaisuja, joiden avulla on hyödynnetty vierivää liikettä kitkan ja kulumisen pienentämiseksi. Voimansiirrossa esiintyviä sovelluksia ovat muun muassa kitkapyörävälitykset, nokka-akselit sekä hammaspyörät. Vierivä liike voidaan jakaa kolmeen eri tapahtumaan. Vapaassa vierinnässä kosketuskohdassa ei esiinny tangentialista voimaa. Vedon vaikuttaessa vierintään esiintyy normaalivoiman lisäksi myös tangentialista voimaa. Osittainen liukuminen on mahdollinen vedon vaikutuksen alaisuudessa. Osien geometriat voivat estää puhtaan vierimisen, tällaisessa tapauksessa puhutaan geometrisesti liukuvasta vierinnästä, esimerkiksi kuulan vieriminen urassa. /7/

Kappaleiden vieriessään toisiaan vasten tapahtuu kappaleissa elastisuudesta johtuvia muodonmuutoksia. Vierivän kappaleen etuosassa tapahtuu puristusta ja kosketuksen takaosassa palautumista. Palautumiseen tarvitaan vähemmän energiaa kuin puristumiseen. Kappaleen vierintävastus voidaan määrittää puristukseen ja palautumiseen tarvittavan energian häviön perusteella. /7/

6.4. Kuluminen

Kuluminen on ilmiö, joka ilmenee materiaalihäviönä kappaleen pinnoilta. Kulumista tapahtuu, kun kaksi pintaa on vuorovaikutuksessa toisiinsa. Kulumiseen vaikuttavia tekijöitä voi olla yhtäaikaaisesti niin monta, ettei niiden hallitseminen ole mahdollista. Vaikka kulumista pyritäänkin hallitsemaan ja se mielletään haitalliseksi, on tapahtumia jolloin kulumista pyritään hyödyntämään. Laakereiden, hammaspyörien sekä muiden liikkuvien koneen osien sisään ajovaiheessa pyritään saamaan hallittua kulumista toivoen pinnankarheushuippujen tasoittumista. Kulumista hyödynnetään muun muassa kipinätyöstössä. /7/

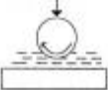
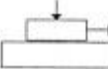

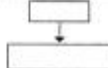
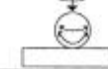
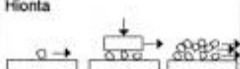


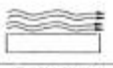
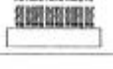

Kulumista on yritetty jakaa eri kategorioihin eri perustein. Vaurion laadun ja fysikaalisen tapahtuman perusteella voidaan kulumista nimetä eri tavoin, riippuen siitä mitä halutaan korostaa. Koneenrakennuksessa puhutaan muun muassa kuoppautumisesta, naarmuuntumisesta, kitkakulumisesta ja väsymiskulumisesta. Karkeasti kuluminen voidaan kuitenkin jakaa kahteen päätyyppiin:

- Suhteellisen liikkeen pohjalta aiheutuvaan kulumiseen.
- Kulumismekanismin pohjalta aiheutuvaan kulumiseen. /7/

Suhteellisen liikkeen pohjalta aiheutuva kuluminen voidaan määritellä vielä kuuteen osaan, jotka kertoo millainen liike aiheuttaa kulumisen. Liiketapahtumia ovat liukuminen, vierintä, iskukuormitus, värähtely sekä nesteistä aiheutuva kuluminen, kiinteiden partikkeleiden kanssa ja ilman. /7/

Lujuusopillisesti tarkasteltuna jaottelu tapahtuu ulkoisten kuormitusten aiheuttamaan kulumiseen sekä tuhoutumismekanismin perusteella, esimerkkinä hauras murtuma. Ulkoisiin

kuormituksiin luetellaan muun muassa veto, puristus, taivutus sekä vääntö. Kuluminen voidaan jaotella myös kulumismekanismien avulla. Esimerkkejä useiden kulumismekanismien samanaikaisesta vaikutuksesta liikkeessä on esitetty kuvassa 8. /7/

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasitustyyppi	Kulumistyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abrasio	Pinnan väsyminen	Tribokemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumis- kuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintä- kuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Isku- kuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtely- kuluminen	X	X	X	X
Kiinteät pinnat ja kulumispartikkeli	Hionta 			X		
Kiinteät pinnat ja partikkelit	Partikkeli- suihku 	Erosio		X	X	X
Kiinteä pinta ja kaasu	Virtaus 	Kaasu- erosio				X
Kiinteä pinta ja neste	Virtaus Värähtely 	Kavitaatio			X	X
	Virtaus Isku 	Pisara- erosio			X	X
Kiinteä pinta ja nesteessä kuluttavia partikkeita	Virtaus 	Erosio		X	X	
		Korroosio- erosio		X	X	X

Kuva 8. Kulumismekanismien lajittelu. /7/

6.4.1. Kulumismekanismit

Teoriassa kulumismekanismit voidaan jakaa neljään tapaan jolla materiaali voi irrota pinnasta. Materiaali voi irrota väsymällä, abrasiiivisesti, adhesiivisesti tai tribokemiallisen re-

aktion kautta. Käytännössä kuitenkin kulumisen voi olla useamman kulumismekanismin tulos. /7/

Kahden pinnan kosketuksessa voi pinnankarheushuippujen välille syntyä adhesiivisiä liitoksia. Adhesiivisten liitosten leikkautuessa syntyy adhesiivista kulumista. Kulumisen riippuu liitoksen leikkautumiskohdasta. Jos liitos repeää muualta kuin alkuperäiseltä liitospinnalta, siirtyy materiaalia pinnalta toiselle sekä kehittyi irtopartikkeleita. Adhesiivisesta liitoksesta käytetään myös nimitystä kylmähitsautuminen, jonka syntyyn vaikuttavat fyysiset, kemialliset ominaisuudet, voitelu sekä kuormitus. /7/

Kuorman kasvaessa pinnankarheushuippujen alla olevat alueet voivat plastisoitua ja tahmautua vastakkaisen pinnan kanssa. Tällaisessa tapauksessa liikkeen jatkuessa tapahtuu voimakasta kulumista, sekä tapahtumasta syntyy lämpöenergiaa. Kun tahmautumista tapahtuu tarpeeksi, se voi pysäyttää liikkeen, jolloin puhutaan kiinnileikkautumisesta. /7/

Abrasiivista kulumista esiintyy, kun kovempi ja pehmeämpi materiaali liikkuvat toisiaan vasten. Kovemman materiaalin pinnan epätasaisuudet tekevät uria pehmeämpään materiaaliin. Pintojen liikkeen ja kulumisen seurauksena voi kahden pinnan väliin jäädä kulumispartikkeleita, jotka voivat muokauslujittumisen jälkeen olla kovempia kuin kumpikaan materiaali. Tällaisessa tapauksessa kovemmat kulumispartikkelit aiheuttavat kulumista molemmilla pinnoilla. Kulumispartikkelit voivat irrota kyntämällä, leikkaamalla tai haurasmurtumalla. /7/

Ilman kanssa kosketuksissa olevilla metalleilla on yleensä oksidikalvo pinnalla. Oksidikalvo suojaa kulumiselta sekä pienentää kitkaa. Pinnankarheushuipun ollessa kosketuksessa vastinpinnan kanssa syntyy lämpöenergiaa, joka kasvattaa oksidikerrosta. Kerroksen kasvettua tarpeeksi irtoaa se seuraavalla kosketuksella, muodostaen kulumispartikkelin. Kyseessä on kemiallinen reaktio eli hapettuminen. /7/

Kulumispartikkeleita voi syntyä myös materiaalin väsymisestä johtuen. Kosketuksessa olleiden pinnankarheushuippujen muokkautumisen vuoksi voi huippu irrota väsymisen

seurauksena. Jos kulumista ei voida luokitella adhesiiviseksi tai abrasiiviseksi kulumiseksi, johtuu kuluminen useimmiten materiaalin pinnan väsymisestä. /7/

6.4.2. Liikkeen aiheuttama kuluminen

Vierivän liikkeen sovelluksissa tapahtuu useasti myös liukumista, esimerkiksi hammaspyörissä. Tällaisessa tilanteessa kulumista tapahtuu enemmän liukumisen kuin vierinnän aikana. Vierivän liikkeen aiheuttama kuluminen voi tapahtua eri tavoin. Yleisin on adheesion seurauksena siirtynyt materiaali pinnalta toiselle. Myös kemiallisen reaktion ja väsymisen seurauksena voi syntyä kulumista. Vierintäväsyminen on ilmiö, joka ilmenee esimerkiksi teollisuudessa käytettävissä vaihteissa. /7/

Iskumainen kuormitus voi aiheuttaa iskukohdassa plastista muodonmuutosta. Iskun vaikutuksesta vastinpinnat muuttuvat ja pinnalle voi syntyä repeämiä, joista syntyy kulumispartikkeleita. Iskun aikana esiintyy myös voimakasta lämmön nousua, joka vaikuttaa materiaalin ominaisuuksiin. /7/

Värähtely aiheuttaa kulumista etenkin kahden pinnan ollessa puristuksissa ja liikkeessä edestakaisin. Puristuksessa syntyy adhesiivisia liitoksia, jotka ratkeavat värähtelyn seurauksena, synnyttäen kulumispartikkeleita. Kulumispartikkelit ovat hapettuneita, muokkauslujittuneita sekä lämmentyneitä. Partikkelit aiheuttavat abrasiivista kulumista. Partikkelit kuluttavat ympäristöönsä nopeammin, irrottaen kohdan reunoilta lisää kulumispartikkeleita. Kulumisen alkukohta muodostuu puolipallon muotoiseksi, jonka seurauksena kuluminen leviää kolon ulkopuolelle. Värähtely kuumista voidaan ehkäistä oikeanlaisilla pinnoitteilla ja sekä voitelulla. Kosteassa ympäristössä värähtelykulumisen herkkyys pienenee. /7/

Eroosiossa pintaa kuluttavana tekijänä toimivat kiinteät ja nestemäiset virtaavat partikkelit, jotka iskeytyvät pintaan. Eroosiota hyödyntäviä sovelluksia ovat muun muassa hiekka- ja kuulapuhallus. Eroosiota esiintyy prosessiteollisuuden putkistoissa, tulipesissä sekä koh-teissa, joissa kuljetetaan kiinteää materiaalia. Ilmiön tehokkuus riippuu pintaan iskeytyvien partikkeleiden iskeytymiskulmasta ja törmäysnopeuden neliöstä. Sitkeillä materiaaleilla

kuluminen on nopeinta partikkeleiden iskeytyessä viistosti pintaan. Hauraiden materiaalien kuluminen on nopeinta partikkeleiden iskeytyessä kohtisuoraan. Eroosiota voidaan ehkäistä minimoimalla virtaavan materiaalin nopeus, muuttamalla konstruktiota sekä kestäväillä pinnoitteilla. /7/

Kavitaatiokuluminen johtuu jännitysiskuista. Nesteessä olevien kaasukuplien luhistuessa niistä vapautuu pintajännitysenergia, joka vaurioittaa metallipintaa. Ilmiötä esiintyy muun muassa laivan potkureissa sekä tietyissä laakereissa. Kavitaatiokuluminen tekee metallin pinnan hyvin rosoiseksi. /7/

6.4.3. Kulumisen vaikuttavat tekijät

Kulumiseen vaikuttavat kosketuksissa olevien pintojen ominaisuudet sekä ulkopuoliset tekijät, kuten lämpötila, kuormitus ja liike. Pintojen ominaisuuksista kulumiseen vaikuttavat pinnankarheus, pinnoitteet, kitka ja käytettävät materiaalit. /7/

Oksidikalvo metallin pinnalla suojaa kulumiselta, mutta sen kuluttua pois lisääntyy adhesiivisten liitosten määrä. Rakenteen pintakerrokset ja niiden ominaisuudet vaikuttavat kulumiseen merkittävästi. Koneenrakennuksessa pyritäänkin käyttämään materiaaleja joille on suoritettu erilaisia käsittelyjä, jotta pinnalle saataisiin muodostettua kovempi kerros. Voitelun lisäaineistuksella voidaan parantaa esimerkiksi oksidikalvon kehittymistä. /7/

Koneenosille käytetään perinteisesti hydrodynaamista voitelua, mutta kohteissa joissa tätä ei voida toteuttaa, nousee voiteluaineen lisäaineistus merkittävään asemaan. Kohteissa joissa öljyvoitelu ei ole mahdollista käytetään yleensä kiinteitä voiteluaineita. Kiinteävoiteluaine voi olla esimerkiksi teflon tai grafiitti. Kiinteiden voiteluaineiden lisäksi voidaan käyttää myös perinteistä voiteluainetta tehostamaan voitelutapahtumaa. /7/

Ympäristön vaikutus kulumiseen riippuu käyttökohteesta. Lämpötilan kasvu johtaa usein pintaominaisuuksien muutokseen, pintakalvojen kehittymisnopeuteen sekä väliaineen ominaisuuksiin. Esimerkiksi liukulaakerit voivat toimia tietynlaisessa ympäristössä moitteet-

tomasti, mutta tapahtuvien kosteus- ja happamuusmuutosten seurauksena voi laakerin käyttöikä lyhentyä merkittävästi. Kohteissa, joissa on toteutettu öljyvoitelu, ympäristön muutoksen aiheuttamat seuraukset ovat vähäisempiä. Kuitenkin esimerkiksi veden pääsy voiteluaineen sekaan voi heikentää merkittävästi voiteluaineen ominaisuuksia. /7/

Kuormituksen ja liikenopeuden vaihtelut vaikuttavat kulumiseen. Kuormituksen kasvaessa adhesiivisten liitosten määrä kasvaa ja kiinnileikkautumisen liikenopeudella on merkitystä lämpöenergian synnyssä voitelemattomilla pinnoilla. Voitelulla estetään pintojen kosketus toisiinsa. /7/

6.5. Voitelu

Koneenosissa tai niiden komponenteissa käytetään voitelua siellä, missä se on mahdollista ja sillä pyritään pienentämään kitkaa sekä vähentämään kulumista. Tehokkain tapa vähentää kahden liikkuvan pinnan välistä kitkaa ja kulumista on luoda pintojen väliin voiteluainekalvo. Perinteisten öljyjen ja rasvojen lisäksi voiteluaineena voi toimia myös kiinteä tai kaasumainen aine. Teollisuudessa käytetään pääosin rasvoja ja öljyjä. Toimivan voitelun perusta luodaan jo laitteen suunnitteluvaiheessa. /12/, /7/, /9/

Voitelun tärkeimpiä tehtäviä ovat:

- erottaa käyttävät pinnat toisistaan.
- vähentää pintojen välistä kitkaa → pienemmät tehohäviöt.
- vähentää kulumista.
- estää lämpöenergian synty kosketuksessa.
- estää epäpuhtauksia joutumasta voideltavaan kohteeseen.
- kuljettaa epäpuhtaudet ja kulumishiukkaset pois kohteesta.
- vaimentaa värähtelyä.
- estää korroosiota. /12/

Oikeaoppisella voitelulla sekä oikeanlaisilla voiteluaineilla voidaan saada aikaan suuria taloudellisia hyötyjä. Voiteluaineiden kehityksen myötä niiden ominaisuudet ovat parantu-

neet ja niiden ansiosta voidaan saada taloudellisia säästöjä, jotka syntyvät muun muassa parantuneen suorituskyvyn ja energiatehokkuuden ansiosta. Vähentynyt kuluminen antaa edellytyksen käyttöiän pidentymiselle. /12/, /8/, /9/

6.5.1. Voitelumekanismit

Voitelualueet jaetaan kolmeen ryhmään, jotka määräytyvät kohteen käyttö- ja suunnittelu-arvojen mukaan. Nämä kolme voitelualueetta ovat rajavoitelu, sekavoitelu ja nestevoitelu, joiden periaatteet selviävät kuvasta 9. Voitelualueet erotetaan toisistaan pintojen etäisyyden mukaan, joka on suhteutettu kosketuspintojen karheuksiin. Voitelukalvon ominaisuus paksuutta merkitään λ -merkillä. Voitelukalvon ominaisuus paksuus määrittää voitelualueen. Rajavoitelussa $\lambda \approx 1$, nestevoitelussa $\lambda > 4-5$ ja väliin jäävä alue on sekavoitelu. Voitelukalvon paksuuden λ arvo voidaan laskea seuraavasti. /7/

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (4)$$

missä

h_{\min} on voitelukalvon paksuus

σ_1 ja σ_2 on pintojen karheuksien RMS-arvo

Nestevoitelussa käytettävien pintojen väliin muodostetaan voitelukalvo, joka pitää pinnat täysin erillään toisistaan. Kahden pinnan välinen nopeusero tasoittuu voiteluaineessa. Koska pinnat ovat täysin erillään toisistaan, on kokonaiskitka pieni. Voitelukalvon ansiosta ei kulumista ja väsymistä juurikaan tapahdu. Käytettävän materiaaliparin ominaisuudet rajoittuvat lähinnä paineensietokykyyn sekä öljyn tarttuvuuteen. Nestevoitelu voi olla hydrostaattinen, hydrodynaaminen tai elastohydrodynaaminen voitelu. /12/, /9/

Rajavoitelu:

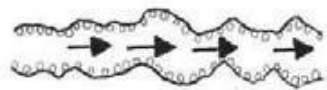
pintojen kosketus
- kuiva kitka



pintojen kosketus
- polaarinen komponentti on kiinnittynyt pintaan

Sekavoitelu:

osittain rajavoitelu/kuiva kitka ja osittain nestevoitelu

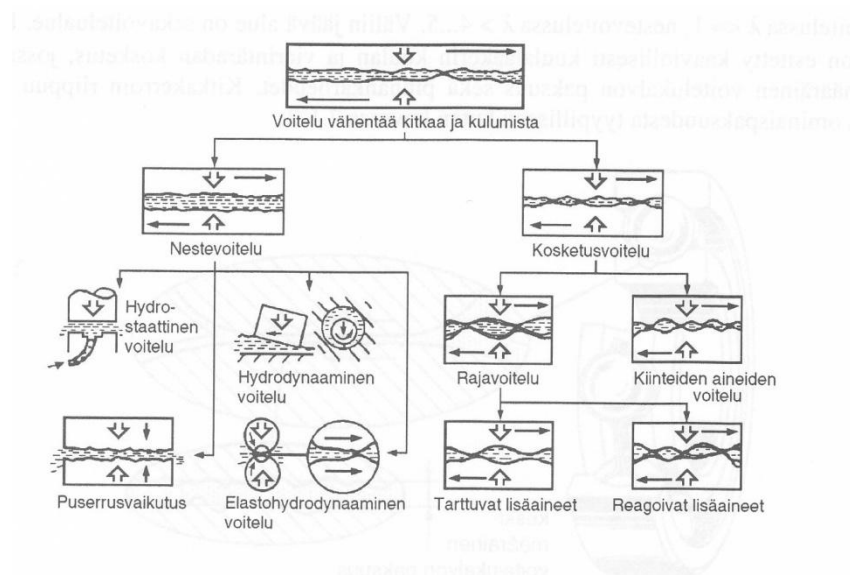
Nestevoitelu:

voiteluaine erottaa pinnat täysin toisistaan

Kuva 9. Voitelumekanismit. /7/

Rajavoitelussa eli kosketusvoitelussa tapahtuu selvää kosketusta pintojen pinnankarheus-
huippujen toimesta, jolloin pintoja erottavaa voiteluainekalvoa ei enää tai vielä ole. Koske-
tusvoitelu on tapahtuma jolloin nestevoitelua ei voida toteuttaa. Kuorma välittyy osin voi-
teluaineen ja osin pintojen välisen kosketuksen kautta. Voiteluaineen alhainen viskositeetti
käyttölämpötilassa, pieni nopeusero pintojen välillä, liian vähän voiteluainetta ja huonot
lämmönsiirto ominaisuudet johtavat usein rajavoitelu-tilanteeseen. Voitelun toimivuus
riippuu keskeisten pintakalvojen tarttuvuuteen, stabiilisuteen ja muodostumisnopeuteen
kosketuskohdassa. /12/, /7/, /9/

Voiteluaineen lisäaineet muodostavat suojaavat ja liukastavat kalvot reagoiessa käyttö-
pinnan kanssa, erityisesti kulumisenesto- ja paineenkestolisäaine. Käytettävien materiaali-
en tribologiset ominaisuudet vaikuttavat myös kitkaan ja kulumiseen. Jos pintakalvot pet-
tävät, voivat kitkakertoimet nousta kuiva-kitka-arvojen tasolle. Voitelumekanismien jako
ja periaatteet on kuvattu kuvassa 10. /12/, /9/



Kuva 10. Voitelumekanismien jaottelu. /9/

Sekavoitelutilanteessa sekoittuvat nestevoitelu ja rajavoitelu. Kuormitus jakautuu pienikitkaiselle voitelukalvolle sekä pinnankarheushuipuille. Voitelukalvon paksuuden vaihdellessa muuttuu pinnankarheushuippujen kantaman kuormituksen määrä. Voitelukalvon paksuuntuessa kosketuksen kokonaiskitkakerroin pienenee. Olosuhteen muutoksilla voi olla merkittävät vaikutus sekavoitelutilanteessa. Lämpö ja alhainen voiteluaineen viskositeetti voivat aiheuttaa sen, että sekavoitelutilanne muuttuu rajavoiteluksi. Seka- ja rajavoitelussa tapahtuu metallipintojen kosketusta, jonka seurauksena syntyy paikallisia hitsautumia pintakerroksessa. Pintakerroksessa esiintyvät hitsautumat lisäävät kitkaa, lämpöä, kulumista sekä pinnan väsymistä. /9/

6.5.2. Hydrodynaaminen ja hydrostaattinen voitelu

Hydrodynaamisessa voitelussa voitelukalvo erottaa käyttävät pinnat täysin toisistaan. Hydrodynaamisessa voitelussa syntyy pintojen väliin hydrodynaaminen paine, jonka tehtävänä on kantaa kuormitusta. Hydrodynaamisen voitelun edellytyksenä on suppeneva voitelukalvo sekä pintojen välillä vallitseva nopeusero. Suppeneva voitelukalvo syntyy kiilamaisesta rakenteesta. Voiteluaine kalvoon syntyy ylipaine, joka tasaa kiilan sisään- ja ulosvirtaavan voiteluaineen määrän. /12/, /7/

Toinen tapa jolla hydrodynaaminen paine syntyy, on puserrusvaikutus. Puserrusvaikutus syntyy tilanteessa jossa kaksi tasaista pintaa lähestyy toisiaan kohtisuorasti. Voiteluaineeseen kohdistuu puristusta ja voiteluaine pusertuu ulos pintojen välissä olevasta kapeasta reiästä. Kohtisuora paine aiheuttaa liukukosketukseen painejakauman jolla on kuormankantokykyä lisäävä vaikutus. Voiteluaineen viskositeettiin vaikuttaa ainoastaan lämpötila. /12/, /7/

Hydrostaattisessa voitelussa liukupintojen välissä on voitelutasku, jonne voiteluaine tuodaan pumpun avulla. Öljyn hydrostaattinen paine erottaa liukupinnat toisistaan. Hydrostaattisessa voitelutilanteessa ei esiinny suhteellista liikettä. Hydrostaattisissa laakereissa kitka on pieni, koska liikkeen puuttuessa ei esiinny kitkaa. Myös kitkateho on pieni, vaikka pumpun tehontarve otetaan huomioon. Hydrostaattisten laakereiden etuna on jäykkyys. Aerostaattisissa laakereissa hyödynnetään kaasuja voiteluaineena alhaisen viskositeetin ansiosta. Aerostaattisia laakereita käytetään instrumenteissa, työkonoiden karoissa ja luitteissa sekä prosessilaitteissa. /12/, /7/

Hydrostaattisissa sekä hydrodynaamisissa laakereissa vallitsee huomattavasti pienempi paine kuin elastohydrodynaamisessa tilanteessa. Hydrostaattisissa ja hydrodynaamisissa laakereissa ei esiinny vierintälaakereille tyypillistä materiaalin väsymistä eikä plastista muodonmuutosta. /12/

6.5.3. Elastohydrodynaaminen voitelu

Elastohydrodynaamisesta voitelusta puhutaan silloin kun kuormitus on suuri ja kosketuspinnat ovat pieniä. Elastohydrodynaamisen voitelun sovelluskohteita ovat muun muassa vierintälaakerit sekä hammaspyörät. Korkea kosketuspaine aiheuttaa viskositeetin kasvua voiteluaineessa sekä kosketuspinoissa esiintyy elastista muodonmuutosta. Elastista muodonmuutosta sekä viskositeetin kasvua paineen vaikutuksesta esiintyy EHD -tilanteessa toisin kuin hydrostaattisessa ja hydrodynaamisessa voitelussa. Kimmoiset muodonmuutokset suurentavat vaikutuspinta-alaa ja paine jäykistää voiteluaineen siten, ettei se pääse puristumaan pois. Tämän ansiosta voitelukalvo säilyy ehjänä. Voiteluaineiden kehityksessä

pyritään parantamaan voiteluaineiden ominaisuuksia siten, että voiteluaine puristuu tehokkaammin voitelutilanteessa, eikä energiaa kulu öljyn sisäisen kitkan voittamiseksi. Voiteluöljyjen sisäisen kitkan pienentäminen parantaa energiatehokkuutta, kun kitkaa vastaan tehty työ ei muutu lämpöenergiaksi. /12/, /8/, /7/

Kosketuspintojen pinnankarheudella on suuri merkitys elastohydrodynaamisessa voitelussa. Suuren kuormituksen ja ohuen voitelukalvon myötä voitelu on erityisen herkkä painehuipuille, joita voi synnyttää esimerkiksi kulumispartikkelit. Tämän vuoksi voiteluaineen puhtauden ja suodatuksen merkitys kasvaa. /9/

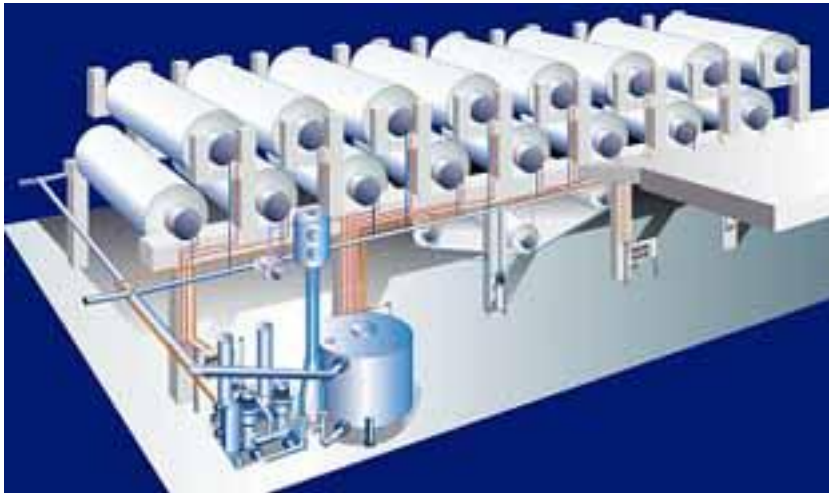
Kosketushetkellä vallitsevan kitkan arviointi EHD -tilanteessa on hyvin vaativa tehtävä. Kitkaan vaikuttavat voiteluaineen ominaisuudet, lämpötila, olosuhteet ja kosketusmekanismi. Korkea kosketuspaine ja kosketuksessa tapahtuvan luiston seurauksena voi voiteluaineen käyttäytyminen muuttua. Leikkausnopeuden kasvaessa leikkausjännityksen kasvu hidastuu. Voiteluaine leikkautuu plastisesti sen saavutettua voiteluaineen maksimileikkauslujuuden. Tapahtumalla on merkittävä vaikutus kosketuksen kitkaominaisuuksiin. Voiteluaineen maksimileikkauslujuus riippuu paineesta ja lämpötilasta. Kosketuksessa vaikuttava kitkavoima nostaa lämpötilaa, joka vaikuttaa voiteluaineen ominaisuuksiin vaikuttaen kitkaan. Lämpötila on vuorovaikutuksessa kosketuksen kitkaominaisuuksiin. /9/

Voitelukalvon paksuuteen vaikuttaa merkittävästi pyörimisnopeus sekä voiteluaineen viskositeetti sekä viskositeetin paine-eksponentti. Kuormituksen määrällä ei ole niin suurta merkitystä voiteluainekalvon paksuuteen. Suurinta mahdollista kuormitusta rajoittavat käytettyjen materiaalien ominaisuudet, kuten hampaan maksimivilujuus ja kosketuspinnan maksimi suurin sallittu kosketuspaine. Suunnitteluvaiheessa kuormitushuippujen arviointi on tärkeä pintojen kestoiän kannalta. /9/

6.6. Kiertovoitelu

Kiertovoitelua on käytetty jo vuosikymmeniä kohteissa, joissa halutaan voitelun lisäksi myös jäähdyttää kohdetta. Kuvassa 11 on kuvattu perinteinen kiertovoitelujärjestelmä.

Käyttökohteena ovat muun muassa paperikoneen kuivausosat sekä suuret vaihdelaatikat. Kiertovoitelun käyttöä on lisätty paperikoneiden nopeuksien ja lämpötilojen kohoamisen myötä. Aluksi voitelukohteena ovat olleet pääosin kuivaussyliinterit, mutta kehityksen myötä kiertovoitelu käsittää telat ja vaihteistot viira-, kuivaus- ja puristinosilla./5/



Kuva 11. Kiertovoitelujärjestelmä /12/

Kiertovoitelussa öljy on varastoitu yhteen tai useampaan säiliöön, josta se jaetaan putkistojen avulla haluttuun kohteeseen. Järjestelmän on pystyttävä tuottamaan oikea määrä puhdasta öljyä käyttökohteille ja sen on toimittava korkeissa lämpötiloissa sekä pystyttävä poistamaan ulkoisia epäpuhtauksia, kuten kulumisesta syntyneet partikkelit, ilmakuplat, vesi, hapettumistuotteet sekä ylimääräinen lämpö. Suuret lämpötilaerot kiertovoitelussa aiheuttaa veden kondensoitumista, jolla on merkittävä vaikutus laakerivaurioihin. /12/, /5/

Öljy pumpataan säiliöstä suodattimien kautta lämmönvaihtimelle ja siitä verkostoon. Verkosto haarautuu virtausmittariryhmille, joissa virtaukset säädetään kohteelle sopivaksi. Palaava öljy voidaan ohjata välisäiliöiden kautta takaisin pääsäiliöön. /12/

Paperikoneilla käytettävät kiertovoitelusäiliöt mitoitetaan 25 – 30 minuutin lepoajalle. Lepoaika tarkoittaa aikaa jonka kierrosta palaava öljy on säiliössä ennen uudelleen kiertoa lähtöä. Lepoajan aikana öljyssä oleva vesi, epäpuhtaudet ja kulumispartikkelit, jotka ovat öljyä raskaampia, vajoavat pohjalle. Öljyn mukana tuleva ilma poistuu myös lepoajan aikana. Olettamuksena mitoitukselle on se että öljy siirtyy tasaisesti paluupäästä kohti

pumppuja. 30 minuutin säiliö tarkoittaa tilavuudeltaan 30 – 40 m³ säiliötä, kiertovoitelun pumppauskapasiteetin ollessa 1000 l/min. Kehittyneemmillä säiliöillä ja epäpuhtauksien poistomenetelmillä voidaan säiliön koko puolittaa. /5/

Säiliöiden sisään on rakennettu seinämiä ja lamelleja rauhoittamaan öljynkulkua, sekä estämään öljyn virtaaminen suoraan paluupuolelta imupuolelle. Vesi, ilma ja epäpuhtaudet öljystä pyritään poistamaan pääasiallisesti painovoimaisin menetelmin. Uusissa kehittyneemmissä säiliöissä käytetään erotuslevyjä, sekä kartiota joka kerää ja keskittää paluupuolen öljyn. Säiliöiden varustukseen kuuluu lisäksi sähkövastukset, pinnankorkeusmittarit sekä huohotin. Huohotin mahdollistaa pinnankorkeuden vaihtelut kierron eri vaiheissa. Kiertovoitelujärjestelmän öljy pidetään oikeassa lämpötilassa lämmönvaihtimen ja sähkövastusten avulla. /12/, /5/

Kiertovoitelujärjestelmä on yleensä varustettu kahdella pumpulla, joista toinen valitaan pääpumpuksi. Pumput ovat yleensä ruuvipumppuja, joiden tehtävänä on ylläpitää tasaista painetta linjastossa, riippumatta virtauksen määrästä. Painetta voidaan säädellä pumppujen päädyssä sijaitsevilla ylipaineventtiileillä. /12/

Kiertovoitelun öljyn suodatusjärjestelmässä on käytössä kaksinkertainen määrä suodattimia tarpeeseen nähden. Suodattimista vain puolet on käytössä. Jokaiselle suodattimelle on olemassa varasuodatin. Suodattimien valinta tapahtuu kolmitieventtiilin avulla. /12/

Putkistossa vallitsee vakioaine, kohteen virtausmäärät säädetään virtausmittareilla. Virtausmittareita voi olla analogisia ja digitaalisia. Analogisten mittareiden toiminta perustuu usein paine-eroon tai jousivoimaan (rotametrimittareissa). Tekniikan kehityksen myötä virtausten digitaalinen valvonta on yleistynyt ja virtaukset ovat monesti luettavissa valvomosta. Digitaaliset mittarit voidaan jakaa kahteen ryhmään toimintaperiaatteen mukaisesti, hydrodynaamisesti ja syrjäytysperiaatteella toimiviin mittareihin. Hydrodynaamisella mittarilla on laaja toiminta-alue mutta ne aiheuttavat järjestelmässä pienen painehäviön. /12/

7. TYÖN SUORITUS

Työn suorittamiseen on käytetty SAP -tietojärjestelmää, Stora Enson Veitsiluodon tehtaalla sijaitsevaa arkistoa, valmistajilta ja edustajilta saatuja tietoja, Eforan ja Stora Enson henkilöstön tietämystä sekä kokemusta ja kirjallisuudesta saatuja tietoja.

Nykytilanteen kartoituksessa listattiin PK5-linjalla käytössä olevat vaihteet, niiden varaosat, varavaihteet ja niiden saatavuus. Ympäristöt tutkittiin mahdollisten muutostöiden, puutteiden ja erityishuomioiden varalta. Vaihteistojen öljynvaihdon sekä kunnonvalvonnan suunnitelmat tutkittiin ja tiedot kirjattiin ylös, minkä jälkeen tutkittiin öljyhuollon kehittämismahdollisuuksia.

7.1. Nykytilanteen kartoitus

PK5-linjan vaihteet on merkattu telakaavioon. Telakaaviot on piirretty pohjapaperikoneelle sekä paperinpäälystyskoneelle. Kaaviot eivät kuitenkaan kata paperikone 5:n VR51 välirullainta, päälystyskoneen VR52 välirullainta, jälkikäsitteilyn SK51 ja SK52 superkalantereita, PL52 ja PL53 pituusleikkureita sekä URK:ta eli uudelleenrullauskonetta. Paperikoneen telakaavio on päivitetty 2002 ja päälystyskoneen telakaavio on päivitetty 1993. Suuret muutokset ja projektit paperikoneella ovat olleet 1985, 1995 ja 1996 jolloin käyttöihin on tullut muutoksia.

Telakaavioiden pohjalta vaihteiden tiedot saa helposti SAP-tietojärjestelmästä. Toimintopaikan rakenne-esitykseen (IH01) valitaan toimintopaikaksi FI-VL jolloin saadaan Veitsiluodon tehtaan toimipaikkarakenne esille.

Toimintopaikkarakenne-esityksen alta löytyy listaus Veitsiluodon toiminnoista. Veitsiluoto-valikon alta valitaan paperitehdas ja paperitehdas-valikon alta PK5-linja. PK5 linjan alta löytyy kaikki linjan toiminnot. Kun hierarkiaa avataan lisää ja edetään eteenpäin, löydetään valikosta kohteen toiminnot ja laitteet. Kuvan 12 esimerkkipolku viiraosan käytön

vaiheisiin on: Veitsiluodon tehdas → Paperitehdas → PK 5 linja → perälaatikko ja viiraosa → viiraosa → telojen käyttölaitteet → alaviiran vetotelan käyttölaitteet.

The screenshot shows the SAP SPRO interface for 'Toimintopaikan rakenne-esitys: rakenneluettelo'. The plant is FI-VL, named VEITSILUOTO, with an effective date of 02.12.2011. The structure is as follows:

- FI-VL-201 SELUTEHDAS
- FI-VL-202 PAPERITEHTAAN HIOMO
- FI-VL-301 PAPERITEHDAS
 - FI-VL-301-010 PK 1 LINJA
 - FI-VL-301-020 PK 2 LINJA
 - FI-VL-301-030 PK 3 LINJA
 - FI-VL-301-035 PK2-3 YHTEISET
 - FI-VL-301-040 PK1-5 RULLIENKÄSITTELY
 - FI-VL-301-050 PK 5 LINJA
 - FI-VL-301-050-020 PAPERIKONE PK5
 - FI-VL-301-050-020-510 MASSAN JA VESIEN KÄSITTELY
 - FI-VL-301-050-020-520 PERÄLAATIKKO JA VIIRAOSA
 - FI-VL-301-050-020-520-510 PERÄLAATIKKO
 - FI-VL-301-050-020-520-521 VIIRAOSA
 - FI-VL-301-050-020-520-521-210 ERITTELEMÄTTÖMÄT
 - FI-VL-301-050-020-520-521-211 OHJAUS JA KIRISTYS
 - FI-VL-301-050-020-520-521-212 VEDENPOISTO
 - FI-VL-301-050-020-520-521-213 PESU JA KAAVINTA
 - FI-VL-301-050-020-520-521-214 VIROJENVAIHTO
 - FI-VL-301-050-020-520-521-215 TELOJEN KÄYTTÖLAITTEET
 - VL-2521501 ALAVIIRAN IMUTELAN KÄYTTÖLAITTEET
 - VL-2521502 ALAVIIRAN VETOTELAN KÄYTTÖLAITTEET (highlighted in green)
 - VL_H2521502 HAMMASVAIHDE
 - VL_K02521502 TELAN KÄYTTÖLAITTEET
 - VL-2521504 YLÄVIIRAN VETOTELAN KÄYTTÖLAITTEET
 - FI-VL-301-050-020-520-521-223 VIIRAOSAN TELAPAIKAT
 - FI-VL-301-050-020-530 PURISTINOSA
 - FI-VL-301-050-020-540 KUIVAUSOSA
 - FI-VL-301-050-020-541 PK5 ILMASTOINTI

Kuva 12. Toimipaikan rakenne-esitys: rakenneluettelo. /13/

Käyttölaitteen valikon alta löytyy hammasvaihte, josta avautuu lista vaihteeseen liitetystä varaosista. Varaosatiedoista täytyy löytyä tärkeimmät tiedot eli laakereiden, akseleiden ja hammaspyörien tiedot. Varastossa oleva varavaihte on myös merkitty valikkoon. Tiedoista selviää kuinka monta kyseistä komponenttia vaihte tarvitsee. Näkymä on esitetty kuvassa 13. Osa tärkeistä vaihteiden tiedoista on merkitty vaihteen lisätietoihin. Lisätiedot voi sisältää hammaspyörien hammaslukuja, mahdollisen varavaihteen sijainnin, sähkömoottorin tiedot, varaosatieoja sekä muita havaintoja ja huomioita.

Toimintopaikka		FI-VL	Voim. alku	02.12.2011	Varastotilanne (Ctrl+F3)
Nimitys		VEITSILUOTO			
FI-VL-301	PAPERITEHDAS				
FI-VL-301-010	PK 1 LINJA				
FI-VL-301-020	PK 2 LINJA				
FI-VL-301-030	PK 3 LINJA				
FI-VL-301-035	PK2-3 YHTEISET				
FI-VL-301-040	PK1-5 RULLIENKÄSITTELY				
FI-VL-301-050	PK 5 LINJA				
FI-VL-301-050-020	PAPERIKONE PK5				
FI-VL-301-050-030	PÄÄLLYSTYSKONE PPK 5				
FI-VL-301-050-030-552	VÄLIRULLAIN VR52				
FI-VL-301-050-030-560	PÄÄLLYSTYSKONE				
FI-VL-301-050-030-561	INFRA-KUIVAUS				
FI-VL-301-050-030-562	TELOJEN PYÖRITYS				
VL-2562001	AUKIRULLAIMEN KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562002	TOISIORULLAIMEN KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562003	AUKIRULL PAPERINJOHTOTELAN KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562004	SAUMAUSTELAN KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562005	SIIRTOKELKKOJEN KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562101	KUIVATUSRYHMÄ 1:N KÄYTTÖLAITTEET				
VL_H1483	LIERIÖVAIHDE				
214085	HAMMASPYÖRÄ 3K060-1538 +3K066-0379 AKS	L	1,00	KPL	
207646	ENSIOAKSELI 3K062-1264 METSO	L	1,00	KPL	
130289	RULLALAAKERI 22228 CC/W33	L	2,00	KPL	
131707	RULLALAAKERI 32318 J2	L	2,00	KPL	
110430	O-RENGAS 139,2X5,7 NBR	L	1,00	KPL	
VL_K02562101	KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562102	KUIVATUSRYHMÄ 2:N KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562201	PÄÄLLYSTYSASEMA 1:N KÄYTTÖLAITTEET				
VL-2562202	PÄÄLLYSTYSASEMA 2:N KÄYTTÖLAITTEET				

Kuva 13. IH01 varaosatieidot./13/

Varaosien varastotilanne selviää aktivoimalla merkityt varaosat ja painamalla varastotilanne-painiketta tai näppäinyhdistelmällä Ctrl+F3. Valikosta voi rajata haun koskemaan vain tiettyä tehdasta. Kirjoittamalla avautuvassa valikossa Toimipiste-kohtaan *92*, rajautuu haku koskemaan vain Veitsiluodon tehtaita. Sama nimike voi listautua useampaan kertaan jos sen toimipiste on eri. Laakerit ovat aikaisemmin olleet Stora Enson varastossa 1925, josta ne on siirretty Eforan varastoon X92J. Laakereiden fyysinen sijainti ei ole muuttunut. Jos varaosien saldo näyttää varastossa nollaa, voi varaosa olla tilauksessa.

Puuttuvien varaosien tiedot voidaan hakea ylävalikon kohdasta ympäristö ja tilaukset. Tämän kautta voidaan hakea halutulle varaosalle käyttöhistoria, josta nähdään milloin ja minkä tilauksen yhteydessä varaosaa on käytetty ja onko varaosa tilauksessa. Tilauksessa olevan varaosan tiedoista näkyy oletettu toimituspäivä.

Käyttölaitevalikosta aktivoimalla Hammasvaihte-teksti pääsee käsiksi SAP-tietojärjestelmään syötetyistä vaihteen tiedoista. Kuvassa 14 on esimerkki hammasvaihteen

tiedoista SAP-tietojärjestelmässä. Tietojen määrät vaihtelevat suuresti eri vaihteiden välillä. Tärkeimmät tiedot valikosta ovat: valmistaja, valmistusnumero, vaihteen tyyppi, positio numero, laitenumero, piirustusnumero, välityssuhde, nimellisteho, kriittisyys luokitus ja kohteeseen liitetyt asiakirjat.

The screenshot shows the SAP 'Luokittelu' (Classification) view for a gear component. The main data entry area contains the following fields and values:

LAITENUMERO	VL_H2521502
LAITTEEN NIMITYS	HAMMASVAIHDE
LAJI	HAMMASVAIHDE, ALAV.VETOTELAN K
TEHONSIIRTOKYKY	1.060,000 kW
KOKONAISVÄLITYS	3,916
PYÖRINTÄNOPEUS N1	25,000 1/s
PYÖRINTÄNOPEUS N2	
ENSIÖAKSELIN HALKAISUJA [mm]	
TOISIOAKSELIN HALKAISUJA	
HOLKKIAKSELIN HALKAISUJA [mm]	
ÖLJYTIIVÄYYS [l]	
VOITTELU	
AKSELIASEMA	
ASENNUSASENTO	
TOIMITTAJA	VALMET VPT
PIIRUSTUSNUMERO	5K035-0727 / 15272
OSTOTILAUSNUMERO	
VOITTELUVAINE	
RISKILUKU	16

Kuva 14. Hammasvaihdenäkymä. /13/

SAP-tietojärjestelmästä saadut tiedot kerätään yhteen Microsoft Excel -ohjelmalla. Tuloksena on taulukko, johon on kartoitettu PK5-linjan vaihteet ja niiden tärkeimmät tiedot. Taulukkoon syötetyt varastossa olevat varaosatiedot elävät käytön mukaan, joten laitetaulukon tiedot kuvaavat tilannetta työn tekohetkellä.

7.2. Ympäristön tutkiminen

Yhtenä osana työtä oli tutkia jokaisen vaihdelaatikon ympäristöt mahdollisten puutteiden, huomioiden sekä muutostöiden osalta. Erillisvaihteiden ympäristön tutkiminen ja havaintojen teko on tärkeä osa kunnossapidon suunnittelua. Ennakoimalla mahdolliset ongelmat, puutteet sekä erikoistyökalujen tarve, voidaan ongelmat selvittää ennen mahdollista vaihderikkoa tai huoltotoimenpidettä. Ympäristön tutkimisessa toimi apuna Efora Oy:n kunnossapitoasentaja Pekka Kummu, jolla on pitkä työura takana ja paljon kokemusta kunnossapitotöistä. Huomiot ja havainnot on koottu Microsoft Excel -ohjelman avulla taulukkoon, joka on toimitettu Efora Oy:lle.

PK5-linjalla olevat hammasvaihteet ovat osa linjan alkuperäisiä 1970-luvulla valmistettuja laatikoita ja oli tärkeä selvittää valmistetaanko vaihteita enää. PK5-linjalla käytössä olevista vaihteista suurin osa on Valmet Oy:n valmistamia. Valmet Oy:n toiminta on nykyään Moventas Oy:n nimissä.

PK5-linjan vaihteiden tyypit listattiin taulukkoon ja toimitettiin sähköpostilla Moventas Oy:n Satu Hurmalalle. Pian selvisi, että kaikkia listan vaihdetyyppejä on saatavilla. Varavaihteilla on kuitenkin pitkät toimitusajat, jonka vuoksi vaihteiden kunnonvalvonta korostuu. PK5-linjalla päällystyskoneella on myös Kumera Oy:n valmistama vaihde. Kumera Oy:n tekniseen tukeen lähetettiin kysely, josta selvisi, että kyseiseen vaihteeseen on saatavilla varaosia sekä myös mahdollinen varavaihde.

Osana insinööriä oli selvittää muutostyöt vaihteen hajotessa, jos tilalle joudutaan vaihtamaan korvaava vaihde. Mahdollisia muutostöitä voi aiheutua esimerkiksi vaihteiden ulkomittojen muuttuessa. Koska kaikkia PK5-linjalla käytössä olevista vaihteista on saatavilla, ei muutostöitä tarvita.

Listauksessa selviää muun muassa kuvaus, huoltosuunnitelma, toimintopaikka ja vastuullinen työpiste. Listauksessa esiintyy kunnonvalvontatoimenpiteitä sekä ennakkohuoltotoimenpiteitä. Kuvassa 16 on esitetty listaus erilaisista huoltosuunnitelmista. Huoltosuunnitelmien tiedot kerättiin laitetaulukkoon, josta selviää millä aikataululla ja millaisia toimenpiteitä suoritetaan.

Huoltorivi	H.suunn.	Työpiste	S	Huoltorivin kuvaus	Toimintopaikka	Toimintopaikan nimitys	SR	VastTyöp.	Muutospv
405015	1119227		X	VIIRAOSAN KÄYTTÖAKSELEIDEN KÄSIVOITELU.	FI-VL-301-050-020-520-521-215	TELOJEN KÄYTTÖLAITTEET	350	FIVL2004	21.11.201
405093	1119277		X	KÄYTTÖLAITTEIDEN TARKASTUS	FI-VL-301-050-020-520-521-215	TELOJEN KÄYTTÖLAITTEET	954	FIVL2500	24.11.201
405094	1119278		X	PK5 VIIRAOSAN KÄYTÖT, KV_MITTAUKSET.	FI-VL-301-050-020-520-521-215	TELOJEN KÄYTTÖLAITTEET	951	FIVL2002	04.11.201
395405	1114286		X	NIVELAKSELIN TARKASTUS, VOITELU.	FI-VL-301-050-020-520-521-215	TELOJEN KÄYTTÖLAITTEET	350	FIVL2004	21.11.201
395408	1114289		X	HAMMASKYTKIMEN VOITELU.	FI-VL-301-050-020-520-521-215	TELOJEN KÄYTTÖLAITTEET	350	FIVL2004	21.11.201

Kuva 16. Huoltorivien luettelo. /13/

Ennakkohuoltomiesten suorittamat KV-mittaukset tarkoittavat värähtelymittauksia. Värähtelymittaukset suoritetaan suunnitellusti huoltosuunnitelman tai ennakkohuoltomiesten ajoitettujen tehtävien perusteella. Kaikkien vaihteiden KV-mittauksia ei ollut merkitty huoltosuunnitelmiin vaan, ne löytyivät ennakkohuoltomiesten ajoitetuista tehtävistä. Värähtelymittaukset analysoidaan SKF @ptitude Analyst -ohjelmalla. Ohjelmassa on mittaus-tuloksia vuodesta 1992 alkaen, joten värähtelyn analysointi on luotettavaa. Ennakkohuoltomiehet suorittavat myös lämpökamerakuvauksia. Stora Enson käyttöhenkilöstö suorittaa Marlin -mittauksia vaihteille, mutta mittausten syklit eivät näy huoltosuunnitelmissa. Marlin -mittauksissa mitataan muun muassa värähtelyjä, sekä vaihteen käyntilämpötilaa. Marlin -mittausten tulokset tulevat näkyviin SKF @ptitude Analyst -ohjelmaan, SKF ODR -järjestelmään.

PK5-linjalla työskentelevät Eforan huoltomiehet suorittavat visuaalisia tarkasteluja vaihteille. Huoltosuunnitelmassa ilmoitetaan tarvittavat tehtävät kohteelle. Kohteesta tarkistetaan muun muassa öljyt, lämpötila, värähtelyt ja äänet.

8. ÖLJYHUOLTO

PK5-linjan vaihteista suurin osa on kiertovoitelun piirissä. Kiertovoitelun ulkopuolella on 19 vaihdelaatikkoa. Suunnitellut öljynvaihdot löytyvät huoltosuunnitelmista kuten kohdassa 7.3 on kerrottu. Huoltosuunnitelmista kävi ilmi, että vaihteissa on käytössä Mobil-mineraaliöljyt ja öljynvaihdon sykli vaihtelee 26 ja 156 viikon välillä.

Huoltosuunnitelmia tarkastellessa lisättiin opinnäytetyön ohjelmistoon alustavaa tutkimusta öljyhuollon uudistamisesta. Tutkimuksessa tutkittiin synteettisten öljyjen tuomaa etua verrattuna mineraaliöljyihin. Tutkittavia etuuksia ovat rahallinen hyöty öljynvaihdossa sekä energiansäästö. Tutkimuksessa on käytetty Exxonmobililta sekä Efora Oy:ltä saatua materiaalia ja tietoa. Laskelmissa on käytetty viitteellisiä arvoja sekä hintoja.

8.1. Öljyhuollon kehittäminen

Laskelmissa on käytetty hyväksi eräälle paperitehtaalte tehtyä öljynvaihtolaskelmaa. Tietoja on muutettu siten että ne sopivat PK5-linjan öljyhuoltoon. Käytetyt hinnat sekä työtunnit ovat viitteellisiä eivätkä edusta Eforan eikä Exxonmobilin virallista kantaa.

Tarkastelussa olevissa vaihteissa on noin 45 litran öljytilavuus ja öljynvaihtoväli on noin 2 vuotta. Yhdessä öljynvaihdossa tarvitaan kaksi huoltomiestä ja yhden öljynvaihdon keskimääräinen kesto on noin 2,75 tuntia. Yhden työtunnin arvona laskuissa on käytetty 40 €/h. Yhden öljynvaihdon hinta muodostuu: $2 \times 40 \text{ €/h} \times 2,75 \text{ h} = 220 \text{ €}$. Mineraaliöljyn hintana on käytetty 1,5 €/l ja synteettisen öljyn hintana on käytetty 6 €/l.

Öljynvaihtoväli on mahdollisesti mitoitettu vanhemmalle mineraaliöljylle, jonka suositus öljynvaihdolle on 2 vuotta, uudistunut mineraaliöljy lupaa vaihtoväliksi 3 vuotta ja synteettisen öljyn vaihtoväliksi voidaan asettaa jopa 10 vuotta. Laskelmat suoritetaan 20 vaihteelle.

Voiteluaineiden ja öljynvaihdon kustannukset 10 vuodessa 20 vaihteelle:

- Vanha mineraaliöljy: $20 \times 5 \times (45 \text{ l} \times 1,5\text{€} + 220\text{€}) = 28750 \text{ €}$.
- Uudempi mineraaliöljy $20 \times 3,3 \times (45 \text{ l} \times 1,5\text{€} + 220\text{€}) = 18975 \text{ €}$.
- Synteettinen öljy $20 \times 1 \times (45 \text{ l} \times 6\text{€} + 220\text{€}) = 9800 \text{ €}$.

Öljynvaihto kustannuksia saadaan jopa 65 % pienemmäksi, käyttämällä 4 kertaa kalliimpaa vaihteistoöljyä, jonka voiteluominaisuudet ovat paremmat. Öljyn laatua voidaan valvoa käyttämällä öljyanalyysiä, jonka kokonaiskustannukseksi tulee noin 200 €. Öljyanalyysin tulokset saadaan noin viikon kuluessa.

8.2. Energiansäästö

Synteettisen vaihteistoöljyn voiteluominaisuudet ovat paremmat kuin mineraaliöljyjen. Voiteluominaisuuksien ansiosta vaihdelaatikon hyötysuhde paranee, kun työtä ei tarvitse tehdä niin paljoa esimerkiksi kitkan voittamiseksi. Synteettisessä öljyssä on pienempi kitkakerroin sekä pienempi öljyn sisäinen kitka (Traction), joka takaa paremman voitelun. Muun muassa näiden asioiden takia vaihde käy viileämpänä, kun energiaa ei mene kitkan voittamiseen, johon mennyt energia purkautuu lämpönä. /8/

Energian säästöä koskeva lasku on tehty GEARSOFT -ohjelman antamilla tiedoilla. GEARSOFT -ohjelmaan syötetään vaihteen ja käytettävän öljyn tiedot, jonka jälkeen ohjelma laskee vaihteessa käytettävän öljyn lämpötilan sekä vaihteen hyötysuhteen.

Oletusvaihteen tiedot:

- Teho 100 kW.
- Hyötysuhde 96 %
- Ympäristön lämpötila 20 °C
- Mineraali öljyn lämpötila 65 °C
- Käyttötunnit vuodessa 8000 h/a
- Sähköenergian hinta 7 sent/kWh

Gearsoft -ohjelman antamat tiedot synteettisestä öljystä:

- Synteettisen öljyn käyntilämpötila 60 °C
- Hyötysuhde 96,5 %

Hyötysuhteen kasvu ei ole ohjelman antama paras arvo, vaan hieman alakanttiin otettu arvo. Puolen prosenttiyksikön hyötysuhteen kasvun aiheuttama rahallinen säästö lasketaan seuraavasti. $8000 \text{ h/a} \times 100 \text{ kW} \times 0,07\text{€/kWh} \times [(96,5 - 96)/100] = 280 \text{ €/a}$. Todellinen hyötysuhteen kasvu ja energian säästö saataisiin tekemällä mittaukset linjalla käytössä olevaan vaihteeseen.

Englannissa eräessä paperitehtaassa suoritettussa tutkimuksessa, mitattiin vaihdetta käyttävän sähkömoottorin energian kulutusta. Mittaukset suoritettiin vanhoilla ja uusilla mineraaliöljyillä, synteettisellä vaihteistoöljyllä ja vielä tuloksen tarkistamiseksi lopuksi uusilla mineraaliöljyillä. Mittauksissa kuormitus pyrittiin pitämään jokaisessa mittauksessa samanlaisena. Tulokseksi saatiin jopa 6,5 % hyötysuhteen kasvu. Vaihteen käyttötuntien perusteella tehdyssä laskelmassa taloudelliseksi hyödyksi saatiin noin 2500 £/vuosi. /8/

9. TYÖN TULOKSET

PK5-linjan erillisvaihteiden kartoituksen tärkein tulos on laitetaulukko, josta käy ilmi kaikki PK5-linjalla olevat erillisvaihteet sekä niiden tärkeimmät tiedot. Lähes kaikki vaihteet ovat Valmet Oy:n valmistamia. Toinen vaihdelaatikko-valmistaja on Kumera Oy. Osa vaihteista on linjan alkuperäisiä 70-luvulla valmistettuja vaihteita. Vaihteita on uudistettu 80- ja 90-luvuilla tehdyissä projekteissa, joissa paperikonetta on modernisoitu. Vaihteiden vanhoista malleista huolimatta vaihteiden varaosia sekä varavaihteita on vielä saatavilla, minkä vuoksi ympäristöön ei tarvitse suunnitella muutoksia.

Varaosakartoituksen alkuvaiheessa kävi ilmi, että eräässä linjan vaihteessa oli väärät varaosatieidot. Tästä johtuen varaosatieiden oikeellisuuteen kiinnitettiin erityistä huomiota. Varaosakartoitus osoittaa, että kaikkiin linjalla oleviin vaihteisiin oli olemassa varaosat tai varavaihteet. Osa varaosista oli vielä tilauksessa, mutta oletettu saapuminen tehtaalta oli vuoden 2011 loppuun mennessä. Puutteelliset varaosatieidot listattiin ja vaihteiden varaosaluettelot saatiin vaihdelaatikkovalmistajalta. Suurimmat puutteet varaosatieidoissa olivat tiivistieiden tiedoissa. Lähes kaikista LA-sarjan vaihteista puuttui tiivistie tiedot ja S-sarjan vaihteissa oli ilmoitettu O- ja V-renkaiden tiedot. Puutteelliset tiedot on toimitettu Efora Oy:lle.

Varavaihteilla ja varaosilla on pitkät toimitusajat. Investoinneilla voidaan parantaa valmiuksia odottamattoman vaihderikon sattuessa. Ehdotelmat mahdollisista vaihteinvestoinneista on ilmoitettu taulukossa 1. Investointien avulla voidaan varmistaa että lähes kaikilla A- ja useimmilla B-kriittisyysluokan vaihteilla on varaosat sekä varavaihteet. Vaihteen välityssuhde vaikuttaa kotelon mittoihin.

Linjalta löydettiin myös yksi käytöstä poistettu S-sarjan vaihteet. Vaihteen mallin ja välityssuhteen perusteella vaihdetta ei voida hyödyntää esimerkiksi varaosa vaihteena, koska linjalla ei ole toista samanlaista vaihdetta käytössä.

Taulukko 1. Investointiehtotukset.

Tyyppi	Välityssuhde	Kpl linjalla	Investointi
LA-125	2,811:1	3	Kotelo/varavaihde
LA-355	5,5:1	2	Kotelo
LA-450	5,5:1	3	Kotelo
S1G-315E	4,5:1	4	Kotelo/varavaihde
S1G-400	3,158:1	1 (A-kriit)	Varavaihde

Kunnonvalvonnan kartoituksessa selvisi, että kaikille linjan vaihteille suoritetaan kunnonvalvontaa, joko ennakkohuoltomiesten tai PK5-linjan omien asentajien toimesta. Vaihteille suoritettavat toimenpiteet ovat kunnonvalvontamittaukset sekä visuaaliset tarkastelut. Stora Enson käyttöhenkilöstö suorittaa myös omat Marlin -mittaukset, joiden tuloksia voidaan hyödyntää kunnonvalvonnassa.

Öljyhuollon tarkastelussa havaittiin vaihteissa suhteettoman lyhyitä öljynvaihtovälejä. Öljyhuollon päivittämisessä on mahdollista saada säästöjä niin Eforan kuin Stora Ensonkin osalta.

Ympäristön tarkastelu suoritettiin yhteistyössä Pekka Kummun kanssa. Ympäristöstä haettiin puutteita, havaintoja sekä kehittämiskohteita. Havainnot on listattu taulukkoon, joka on toimitettu Efora Oy:lle. Havaintojen avulla pyritään nopeuttamaan vikaantuneen vaihteen korjausta.

Yksi opinnäytetyön aiheeseen vaikuttanut tapahtuma oli kesällä 2011 erään vaihdelaatikon vikaantuminen, joka johtui laakeriviasta. Laakeri oli harvinainen muovipitimellinen laakeri. Selvityksessä kävi ilmi että laakereita käytettiin joskus 80- ja 90-luvuilla. Laakereiden havaitseminen ilman visuaalista tarkastusta on lähes mahdotonta. Täten visuaalinen tarkastelu on ainoa tapa saada selville onko muovipitimellisiä laakereita käytössä linjan vaihdelaatikoissa.

10. YHTEENVETO

Stora Enson Veitsiluodon paperitehtaalla oli kesällä 2011 ongelmia PK5-linjallan erillisvaihteiden kanssa. Vaihteiden vikaantumisen sekä opinnäytetyökyselyn johdosta nousi esiin tarve linjan vaihteiden kartoitukselle. Kartoituksen avulla pyrittiin saamaan selvyys PK5-linjan vaihteiden nykytilasta sekä siitä millaiset valmiudet Efora Oy:llä on toimia, jos linjalla esiintyy vaihderikko.

PK5-linjan erillisvaihteiden kartoitus on kunnossapidon suunnittelua, analysointia sekä ennakoivaa kunnossapitoa. Työn tuloksena syntynyt laitetaulukko on monivaiheinen ja kertoo lukijalle linjalla toimivan vaihteen nykytilan, varaosatilanteen, kunnonvalvonnan sekä vaihteen ympäristöstä tehdyt huomiot. Laitetaulukkoa voidaan soveltaa muun muassa vaihteisiin liittyvien kunnossapitotöiden suunnittelussa.

Laitetaulukon tiedot olivat jo olemassa, joten niiden kasaaminen yhdeksi kattavaksi pakettiksi oli haastavinta työssä. Tietojen keräämiseen apuna käytetty SAP-tietojärjestelmä on kattava, mutta myös raskaskäyttöinen. Järjestelmään syötettyjen tietojen löytäminen vaati monesti etsimistä useammalta tasolta, jolloin työn eteneminen oli hidasta. SAP:in ulkopuolisten tietojen etsimisessä vaadittiin sosiaalisia taitoja ja kykyä luoda uusia kontakteja.

Kunnonvalvonnan ja öljyhuollon tutkiminen todistaa sen, kuinka investoimalla voi saada aikaan merkittäviä taloudellisia säästöjä. Pelkkä voiteluaineiden vertailu ei kerro miksi eri voiteluaineella voidaan saada pienempi energiankulutus. Tarkastelemalla voiteluaineiden ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä, ymmärtää miksi ja mitä voitelutilanteessa tapahtuu.

Hammasvaihteita tarkastelemalla selviää kuinka nykypäivänä harjoitettava kunnossapito ei ole enää pelkkää vioittuneiden laitteiden korjaamista. Kunnossapidossa yhdistyy taloudelliset, tulokselliset sekä tekniset tavoitteet.

11. LÄHDELUETTELO

/1/ Ansaharju, Tapani, Koneenasennus ja kunnossapito, WSOY, 2009.

/2/ Blom, Lahtinen, Nuutio. Koneenelimet ja mekanismit, Edita, 1999.

/3/ EforaNet, Efora Oy [Eforan Intranet], 23.11.2011

/4/ Hirvonen, Mika, Testausinsinöörin puhelinhaastattelu, Moventas Oy, 8.11.2011

/5/ Härkönen, Hannu, Paperikoneiden tehokkaammat voitelujärjestelmät, Kunnossapito, nro. 8, 2007.

/6/ Järviö, Jorma, Kunnossapito, kunnossapidon julkaisusarja N:o 10, KP -media 2007.

/7/ Kivioja, Seppo, Kivivuori, Seppo, Salonen, Pekka, Tribologia – Kitka, Kuluminen ja Voitelu, 4 painos, Otatieto, 2004

/8/ Kojonen, Miika, Tuotespecialistin haastattelu, Exxonmobil, 15.11.2011

/9/ Kunnossapito-koulu N:o 80, Kunnossapito-lehden erikoisliite 2005, [PDF -tiedosto]
[www.promaint.net/downloader.asp?id=1662&type=1]

/10/ Mikkonen, Henry, Kuntoon perustuva kunnossapito, Kunnossapidon julkaisusarja 13, KP -Media, 2009.

/11/ Olkoniemi, Alpo, Ennakkohuoltomiehen haastattelu, Efora Veitsiluoto, 2.12.2011

/12/ Opetushallitus, Oppimismateriaalit, kunnossapito menestystekijä, [WWW-dokumentti] [<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka.html>], 17.12.2011

/13/ SAP - tietojärjestelmä, Efora Oy, 2.12.2011

/14/ Stora Enso Oyj, Stora Enso Lyhyesti, [WWW-dokumentti],
[<http://www.storaenso.com/about-us/stora-enso-in-brief/Pages/Stora-Ensolyhyesti.aspx>]
23.11.2011

/15/ Stora Enso Veitsiluodon tehdas, Veitsiluodon tehtaiden esittely [PowerPoint-esitys]
2011

/16/ Teollisuusvoitelu, Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 8, KP-media, 2006

/17/ Tuotanto 2011, Stora Enson esittely [PowerPoint-esitys] 2011

/18/ Voimansiirron kunnonvalvontamittaukset, SKF Koulutukset, 27.4.2010 [Kansio]

12. LIITELUETTELO

LIITE 1 Laitetaulukko.