



Öljynlaadun vaikutus energiansäästö- mahdollisuuksiin kalanterin telahyd- rauliikassa

Lauri Valta

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Valta, Lauri

Öljynlaadun vaikutus energiansäästömahdollisuuksiin kalanterin telahydrauliikassa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2022, 77 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Tuottavan teollisuuden energia- ja resurssitehokkuuden parantaminen on välttämätöntä kestäväen kehityksen ja ilmaston lämpenemisen hidastamisen kannalta. Teollisuuslaitoksissa on suurten energia- ja ainevirtojen lisäksi paljon huomaamattomampia kohteita, joiden optimoinnilla voidaan parantaa energia- ja resurssitehokkuutta ja sitä kautta saada säästöjä kuluissa. Jokainen pienikin energiatehokkuuden parannus on askel kohti kestävämpää teollisuutta ja tulevaisuutta.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko hydrauliöljyn viskositeetin madaltamisella ja öljynlaatua huomioimalla saavuttaa energiansäästöä. Toimeksiantajana oli Valmet Technologies Oyj. Tarkastelu rajattiin kalanterin vyöhykesäädettäviin taipumakompensoituihin teloihin, koska toimeksiantajalla oli aikaisempaa näyttöä ja kokemusta puristinosan viskositeettimuutosten eduista samankaltaisilla teloilla. Työssä pyrittiin myös selvittämään kalanterin telojen viskositeettimuutoksen markkinapotentiaalia.

Tutkimus toteutettiin laadullisena tutkimuksena, jossa oli case-tutkimukselle ominaisia piirteitä. Aineisto kerättiin haastattelemalla toimeksiantajan eri alojen henkilöstöä sekä laskelmilla, jotka suoritettiin toimeksiantajan laskentaohjelmalla. Haastatteluaineistoa analysoitiin vertaamalla haastateltujen lausuntoja keskenään sekä vertaamalla niitä osin kirjallisuuslähteisiin. Laskelmien tulokset analysoitiin vertaamalla alkupe-
räisarvoilla laskettuja arvoja viskositeettimuutoksen jälkeisiin arvoihin, sekä tarkastelemalla tulosten suuruutta ja todenmukaisuutta.

Tuloksina saatiin näyttöä viskositeettimuutoksen tuomista energiansäästöistä sekä koottua muita asiakas-hyötyjä. Energiankulutuksen vähenemisen todettiin tuovan asiakkaille merkittäviä säästöjä, sekä muiden asiakas-hyötyjen kuten ilmanerottumiskyvyn parantumisen oletettiin pidentävän öljyn elinikää. Toimeksiantajalle laadittiin tulosten pohjalta esitysmateriaali, jota voidaan käyttää viskositeettimuutoksen markkinoinnissa. Kehitysehdotuksiksi nousi viskositeettimuutoksen tuotteistaminen myös uiville teloille, sekä esimerkiksi biohajoavien öljyjen käytön tutkiminen telahydrauliikassa.

Avainsanat (asiasanat)

kalanterointi, hydrauliikka, viskositeetti, energiatehokkuus, öljynlaatu

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 2, 3, 4 ja 5 ovat salassa pidettäviä, ja ne on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 21, teknologista taikka muuta kehittämistyötä ja niiden arviointia koskevat tiedot. Salassapitoaika on viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 5.1.2027.

Valta, Lauri

The effect of oil quality on energy saving possibilities in calender roll hydraulics

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2022, 77 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Improving the energy and resource efficiency of productive industry is a necessity for maintaining a sustainable future and mitigation of climate change. Aside from massive energy and material flows, many factories hold potential places for energy efficiency improvement that may go unnoticed. Focusing on these smaller places can bring significant reductions in energy usage and therefore save on electricity costs. Every step, even the small ones, are steps towards a more sustainable future and industry.

The purpose of this thesis was to find out if lowering hydraulic oil's viscosity and focusing on oil quality can bring energy efficiency. The assignment was given by Valmet Technologies Oyj. Examination was limited to zone-controlled deflection compensated calender rolls because the assignor had previous proof and experience from viscosity change's benefits on press section rolls. Another goal was to investigate the market potential of calender roll viscosity change.

The thesis was carried out as qualitative research with some features typical to case-studies. Data was collected by interviewing the assignor's personnel from different fields and by calculations performed with a calculating program developed by the assignor. The collected data was then analyzed by comparing interviewee statements to each other and in some cases to literature. Data from calculations was analyzed by comparing the results calculated with original parameters to the ones calculated with newly assigned parameters. The validity of the results was assessed as well.

The results of the thesis were proof of viscosity changes effect on energy consumption and compilation of other customer benefits. Energy savings were considered to bring significant cost reductions to customers and other benefits, for example improved deaeration, was assumed to prolong oil's lifespan. A presentation based on the results of the thesis was made for the assignor. The presentation can be used as sales material. Topics that arose during the thesis were for example productization of viscosity change for swimming rolls and the usage of biodegradable oils in roll hydraulics.

Keywords/tags (subjects)

calendering, hydraulics, viscosity, energy efficiency, oil quality

Miscellaneous (Confidential information)

Appendices 2, 3, 4 and 5 are confidential and are removed from the public thesis. The reason for confidentiality is information regarding technological or other development work and their assessment (JulkL 24§, 21). Confidentiality will last for five (5) years, and it will end on 5.1.2027.

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Tausta	4
1.2	Toimeksiantajan esittely	5
2	Tutkimusasetelma	5
2.1	Tutkimuksen tavoitteet	5
2.2	Menetelmät.....	6
2.3	Aineiston kerääminen ja analysointi	7
2.4	Tutkimuksen eettisyys ja luotettavuus	8
3	Kalanterointi	8
3.1	Kalanteroinnin periaatteet ja tavoitteet	8
3.2	Kalanterointimenetelmät.....	10
3.2.1	Konekalanterointi	10
3.2.2	Softkalanterointi	11
3.2.3	Superkalanterointi	11
3.2.4	Pitkänippikalanterointi	12
3.3	Kalanterointimuuttujien hallinta.....	13
3.3.1	Paperiradan ominaisuudet	13
3.3.2	Puristusaine	14
3.3.3	Viipymäaika nipissä.....	15
3.3.4	Puristusimpulssi	16
3.3.5	Gradienttiefekti.....	17
3.3.6	Radan paksuusprofiilin hallinta	18
4	Viskositeetti	19
4.1	Dynaaminen eli absoluuttinen viskositeetti.....	19
4.2	Kinemaattinen viskositeetti	21
4.3	Lämpötilan ja paineen vaikutus viskositeettiin	22
5	Hydraulinesteet	22
5.1	Hydraulinesteiden tehtävät	22
5.2	Hydraulinesteiden ominaisuudet.....	23
5.2.1	Viskositeetti ja viskositeetti-indeksi	23
5.2.2	Tiheys	24
5.2.3	Ilmanerotumisen-, vaahtoamisenesto- ja hapettumisenesto- ominaisuudet	25
5.2.4	Vedenerottumisominaisuudet.....	26
5.2.5	Ominaislämpö ja lämmönjohtavuus.....	27

6	Telat	27
6.1	Taipumakompensoidut telat.....	28
6.1.1	Uiva tela.....	28
6.1.2	Vyöhykesäädettävä tela.....	29
6.1.3	Monivyöhykesäädettävä tela.....	31
6.2	Hydrauliikkajärjestelmä.....	32
6.2.1	Säiliö.....	32
6.2.2	Suodatus ja jäähditys.....	33
6.2.3	Pumput.....	35
7	Kunnossapito	35
7.1	Kunnossapidon määritelmä.....	35
7.2	Öljyjen kunnonvalvonta.....	37
7.3	Kunnossapidon ulkoistaminen.....	37
7.4	Kunnossapidon tuotteistaminen.....	38
8	Öljyjen ongelmat	39
8.1	Lakkautuminen.....	39
8.2	Vahtoutuminen.....	41
9	Toteutus	44
9.1	Haastattelut.....	44
9.2	Esimerkkikohteiden valikointi.....	45
9.2.1	Esimerkkikohde A.....	46
9.2.2	Esimerkkikohde B.....	47
9.3	Laskelmat.....	48
9.3.1	Esimerkkikohde A.....	50
9.3.2	Esimerkkikohde B.....	51
9.4	Markkinapotentiaalin ja muiden asiakashyötyjen kartoittaminen.....	52
10	Tulokset	53
11	Pohdinta	56
	Lähteet	61
	Liitteet	64
	Liite 1. Viskositeettimuutoksen markkinointimateriaali.....	64
	Liite 2. Laskentaohjelman kohteen A raportti ISO VG 150 (Salassa pidettävä).....	66
	Liite 3. Laskentaohjelman kohteen A raportti ISO VG 68 (Salassa pidettävä).....	67
	Liite 4. Laskentaohjelman kohteen B raportti ISO VG 150 (Salassa pidettävä).....	68
	Liite 5. Laskentaohjelman kohteen B raportti ISO VG 68 (Salassa pidettävä).....	69

Kuviot

Kuvio 1. Off-line-kalanteri	9
Kuvio 2. Pitkänippikalanteroinnin ja softkalanteroinnin vertailu: karheus vs. bulkki	13
Kuvio 3. Profiilisäätöjen erot	18
Kuvio 4. Voiteluaineen rakenne viskositeetin määrittelemiseksi Newtonin mukaan	19
Kuvio 5. SymRoll-tela	29
Kuvio 6. SymZ/ZS-telan rakenne	29
Kuvio 7. Kuormituselementti	30
Kuvio 8. SymCDS-telan rakenne	31
Kuvio 9. Hydraulikoneikko	32
Kuvio 10. Puhtaiden ja likaantuneiden putkien lämpövastukset	35
Kuvio 11. Kunnossapitolajit	36
Kuvio 12. Lakkautumista säiliön seinämällä	40
Kuvio 13. Vaahtokerros öljysäiliössä	42
Kuvio 14. Vaahtoutumistilanne parannusten jälkeen	43
Kuvio 15. Öljyä vaipan sisällä	43
Kuvio 16. Tutkimuksen vaiheiden järjestys.....	45

Taulukot

Taulukko 1. Paperin ominaisuuksien muutokset kalanteroinnissa	10
Taulukko 2. Dynaamisen viskositeetin yksiköitä	21
Taulukko 3. Kinemaattisen viskositeetin yksiköitä	22
Taulukko 4. ISO 3448 VG-luokitus	24
Taulukko 5. Esimerkkikohteen A lähtötietoja	46
Taulukko 6. Esimerkkikohteen A öljyn arvot.....	47
Taulukko 7. Esimerkkikohteen B lähtötietoja	48
Taulukko 8. Esimerkkikohteen B öljyn arvot.....	48
Taulukko 9. Esimerkkikohteen A laskennan tulokset	51
Taulukko 10. Esimerkkikohteen B laskennan tulokset	52
Taulukko 11. Viskositeettimuutoksen yhteenveto	56

1 Johdanto

1.1 Tausta

Energiankulutus on ollut jo pidemmän aikaa globaalin keskustelun aiheena. Ilmaston lämpenemistä hidastaviin toimiin on ryhdytty ympäri maailman, toiset valtiot toisia aktiivisemmin. Toimia ovat olleet esimerkiksi teollisuuden ja liikenteen hiilidioksidipäästöjä koskevat rajoitukset ja hiilineutraaliuteen pyrkiminen.

Suomessa tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä (Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035 n.d.). Tavoitteisiin pääsy vaatii kaikkien alojen panostusta, eikä yksikään energiatehokkuutta parantava toimenpide ole turha. Energiatehokkuutta parantamalla voidaan saada sama lopputulos vähemmällä energialla, joka on sekä taloudelle, että ympäristölle eduksi.

Paperinvalmistus vaatii hyvin paljon energiaa sekä muita resursseja. Tämän vuosi viilaamalla tehtaiden energiankulutusta ja parantamalla resurssitehokkuutta voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä vuositasolla. Taloudellisen hyödyn lisäksi energiatehokkuuden parantaminen vähentää välillisesti kohteen aiheuttamaa ympäristökuormaa, joka on kestävä kehityksen kannalta välttämätöntä.

Työn tarkoituksena oli tutkia, voidaanko öljynlaatua muuttamalla saavuttaa energiansäästöä paperikoneen kalanterin telahydrauliikassa. Tarkastelun keskiössä olivat energiansäästömahdollisuudet, mutta samalla oli tarkoitus kartoittaa muita öljynlaadun muuttamisesta seuraavia hyötyjä ja haittoja liittyen esimerkiksi hydraulioöljyn kunnon ylläpitoon. Puristinosalla tällaisista hyödyistä oli toimeksiantajalla jo aikaisempaa näyttöä, mutta kalanterin erotessa puristinosan toiminnasta esimerkiksi käyttölämpötilojen, -paineiden ja ajonopeuksien osalta, oli syytä tarkastella pätevätkö samat lainalaisuudet kalanterillakin.

Tavoitteena on, että toimeksiantaja voi hyödyntää tutkimuksen tuloksia esimerkiksi pohjana markkinointimateriaalille tai esiselvityksenä jatkotutkimuksia tai tuotekehitystä varten. Parhaimmillaan toimeksiantaja saa tutkimuksesta tarvittavia tietoja uuden palvelutuotteen kehittämiseen. Mikäli

tutkimuksessa havaitaan öljynlaadun muutoksella olevan positiivisia vaikutuksia kalanterin telahydrauliikan energiatehokkuuteen, voidaan muutosta markkinoida asiakkaille telahuollon yhteydessä tehtävä parannuksena.

1.2 Toimeksiantajan esittely

Valmet Technologies Oyj (tästä eteenpäin "Valmet") on suomalainen teknologia-alan suuryritys. Sen asiakaskunta koostuu pääosin paperi- ja massateollisuuden sekä energiantuotannon yrityksistä. Valmet kehittää ja valmistaa laitteistoa ja automaattioratkaisuja sekä tarjoaa konsultti- ja kunnossapitopalveluita. Valmetin pitkä historia ulottuu yli 200 vuoden päähän. Yhtiö koki uudistuksen sellu-, paperi- ja voimantuotantoliiketoiminnan irrottua Metso Oyj:stä vuonna 2013. (Valmet lyhyesti n.d.)

Valmetin liiketoiminta jakautuu neljään eri liiketoimintalinjaan: Palvelut, Sellu ja energia, Paperit sekä Automaatio. Maailmanlaajuinen toiminta on jaettu viiteen maantieteelliseen alueeseen, jotka ovat Pohjois-Amerikka, Etelä-Amerikka, EMEA (Eurooppa, Lähi-itä ja Afrikka), Kiina sekä Aasian ja Tyynenmeren alue. Alueet vastaavat omasta toiminnastaan myynnin, palveluiden tarjoamisen sekä projektitoimitusten tukemisesta. (Liiketoiminnat n.d.)

Palvelut-liiketoimintalinjan palvelut ovat pääasiassa sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle suunnattuja. Palveluita ovat muun muassa vara- ja kulutusosat, kunnossapito-, huoltoseisokki- sekä ulkoistuspalvelut, prosessien tuki ja optimointi sekä laiteparannukset. Kunnossapitotoiminnan ulkoistaminen on viime vuosien aikana yleistynyt, joka on luonut kysyntää kunnossapitopalveluille. Yli puolet maailman noin 3800 sellu- ja paperitehtaasta ostavat Valmetilta palveluja vuosittain. (Palvelut n.d.)

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tutkimuksen tavoitteet

Toimeksiantajalla on aikaisempaa näyttöä öljyn viskositeetin alentamisen vaikutuksesta puristin-osan telojen hydrauliikan energiankulutukseen. Viskositeettimuutokset hyödyt on todettu puris-

tinosaalla niin merkittäviksi, että muutosta on tarjottu huoltojen yhteydessä suoritettavana toimenpiteenä. Toimeksiantajaa kiinnostaa, olisiko vastaavanlaista viskositeettimuutosta kannattaa tarjota myös kalanteriosan teloille.

Kalanteriosa eroaa merkittävästi puristinosasta esimerkiksi käyttösuureiden ja halutun lopputuloksen kannalta. Sen takia on tarkoituksenmukaista tarkastella, voidaanko kalanterin teloilla saavuttaa samanlaisia hyötyjä energiankulutuksen suhteen. Tutkimuksella pyritään siis selvittämään, onko telojen hydraulioöljyn viskositeetin alentamisella vaikutusta energiankulutukseen kalanterin telahydrauliikassa. Mikäli hyötyjä voidaan todeta, tulee niiden kannattavuutta asiakkaalle arvioida. Samalla tulee huomioida muutoksen muita vaikutuksia telojen toimintaan.

Toimeksiantaja hyötyy tutkimuksesta esimerkiksi markkinointimateriaalin kannalta. Mikäli tutkimuksessa havaitaan merkittäviä hyötyjä, voidaan tutkimusta käyttää pohjana markkinoinnissa tai esiselvityksenä jatkotutkimuksia ja tuotekehitystä varten. Jos taas tarpeeksi merkittäviä hyötyjä ei havaita, toimeksiantaja voi suunnata resurssit muiden palveluiden kehittämiseen.

Tutkimuskysymykseksi valikoitui ”Voidaanko hydraulioöljyn viskositeetin alentamisella saavuttaa energiansäästöä kalanterin telojen hydraulikassa?” Energiansäästön tarkastelun ohella on myös tarkoituksenmukaista kartoittaa viskositeettimuutoksen muita mahdollisia asiakashyötyjä, liittyen esimerkiksi öljyn ilmanerotus- ja vaahtoamisenesto-ominaisuuksiin. Työn lopputuloksena on selvitys viskositeettimuutoksen vaikutuksista. Esiolettamuksena on, että viskositeetin alentamisella voidaan saavuttaa puristinosalla todettujen hyötyjen kaltaisia vaikutuksia.

2.2 Menetelmät

Tutkimuskysymyksen ratkaisussa apuna oli asiantuntijahaastattelut, niin suunnittelu- kuin kenttähuoltohenkilöstön osalta, esimerkkitapaukseen perustuvat laskelmat, toimeksiantajan materiaalit sekä kirjallisuuslähteet. Henkilöhaastattelut ja laskelmat olivat selvityksen varsinaisena pohjana ja kirjallisuuslähteet sekä toimeksiantajan materiaalit toimivat käsitteiden ja teknologioiden ymmärryksessä. Laskelmien avulla määritettiin tutkimuksen lopputulos ja vastaus tutkimuskysymykseen. Saatu vastaus tulee luultavasti määrittämään, lähdetäänkö kalanterin viskositeettimuutoksia markkinoimaan energiatehokkuutta parantavana toimenpiteenä tai kohdistetaanko aiheeseen jatkotutkimuksia.

Tutkimus- ja aineistonkeruumenetelmien perusteella opinnäytetyön voisi luokitella laadulliseksi tutkimukseksi. Alasuutari (1999) vertaa tutkimuksen tekoa arvoituksen ratkaisemiseen, jossa aineistosta poimitaan johtolankoja, jotka auttavat pääsemään ratkaisuun. Laadullisessa tutkimuksessa näitä johtolankoja, jotka ovat esimerkiksi haastatteluja, tutkitaan sellaisinaan ilman, että niitä asetetaan ennalta laadittuihin raameihin (Alasuutari 1999, 267–268).

Tangin (2021) mukaan Moris (2018) määritteli soveltavan tutkimuksen olevan uuden tiedon hankkimiseksi tehtävää alkuperäistä tutkimusta, joka on ensisijaisesti suunnattu johonkin tiettyyn käytännön päämäärään. Suuri osa tekniikan alan tutkimuksesta, kuten kokeiden teko, uusien teknologioiden edistäminen tai case-tutkimusten suorittaminen, on soveltavaa tutkimusta (Tang 2021, 19). Tämän määrittelyn perusteella voidaan katsoa myös tämän opinnäytetyön olevan soveltavaa tutkimusta.

2.3 Aineiston kerääminen ja analysointi

Aineistoa kerättiin haastatteleamalla toimeksiantajan eri alojen asiantuntijahenkilöstöä. Haastattelut toteutettiin pääosin etänä. Muuta aineistoa oli esimerkiksi toimeksiantajan tuote-esittelyt, sekä opetusmateriaalit. Haastattelujen lisäksi aineistoa tuotettiin laskelmilla, jotka suoritettiin toimeksiantajan laskentaohjelmilla. Aineiston tulkitsemiseen ja opinnäytetyön tietoperustan laatimiseen käytettiin kirjallisuuslähteitä, joita kerättiin esimerkiksi tietokannoista sekä JAMK:n kirjastosta.

Alasuutarin (1999) mukaan laadullisen aineiston analysoinnissa pyritään havaitsemaan aineistojen välisiä sääntöjä ja yhdenmukaisuuksia. Havaintoja voidaan tällöin yhdistellä yhteisten piirteiden perusteella ilman, että tavoitteena on määrittää keskivertotapauksia (Alasuutari 1999, 41–42). Toisin kuin laadullisissa tutkimuksissa yleisesti, oli tutkimuksen tarkoituksena saada jossain määrin yleistettäviä tuloksia. Tutkimuksen käsiteltäessä vain kalanterin hydrauliiikkaa, voitiin perustellusti jopa kahden esimerkitapauksen perusteella tehdä yleistäviäkin johtopäätöksiä.

Tutkimusaineistoa analysoidessa oli tarkoitus etsiä ja tuoda yhteen viskositeettimuutoksen mahdollisia vaikutuksia energiankulutukseen. Esimerkiksi hydrauliiikkasuunnittelijan, öljyasantuntijan ja kunnossapitohenkilöstön lausuntoja vertailtiin toisiinsa, ja tehtiin sen perusteella johtopäätöksiä. Eri henkilöstön lausunnot täydensivät toisiaan.

Aineiston analysointi ei ole laadullisessa tutkimuksessa viimeisenä toteutettava asia, vaan analyysia tulee tehdä koko tutkimusprosessin ajan. Laadullisessa tutkimuksessa ei voida etukäteen määrittää, kuinka paljon aineistoa kerätään. Analysoimalla jo kerättyä aineistoa voidaan todeta, tarvitseeko aineistoa lisää vai riittääkö se tutkimusongelman ratkaisuun. (Kananen 2017, 35.)

2.4 Tutkimuksen eettisyys ja luotettavuus

Tutkimukseen ei liittynyt eettisiä kysymyksiä samoissa määrin kuin esimerkiksi ihmisten toimintaa käsittelevissä tutkimuksissa. Aineistonhankinta koostui kuitenkin suurelta osin henkilöhaastattelusta, joten haastateltavien henkilötietojen ja haastatteluissa esiintyneen arkaluontoisen materiaalin, kuten esimerkiksi liikesalaisuuksien, käsittely tuli huomioida. Haastatteluissa ei kuitenkaan ollut koskaan tarkoitus käsitellä haastateltavien henkilökohtaisia asioita, vaan puhtaasti tutkimuksen suorittamiseen liittyviä asioita.

Aineistoa kerätessä, analysoidessa sekä raportoidessa pyrittiin noudattamaan hyvää tieteellistä käytäntöä. Hyvään tieteelliseen käytäntöön kuuluu esimerkiksi huolellisuus tutkimustyötä tehdessä sekä tulosten tallentamisessa, arvioinnissa ja esittelyssä (Kuula 2011). Eritoten henkilöhaastatteluiden pohjalta muistiinpanoja tehdessä tuli huomioida, ettei omat havainnot tai tulkinnat vääristäneet haastateltavan kertomia asioita.

Kanasen (2017) mukaan Tuomi ja Sarajärvi (2006) ovat todenneet, ettei laadullisen tutkimuksen luotettavuuden arviontiin ole yksiselitteisiä ohjeita. Tutkimuksen tekijä joutuu turvautumaan lähteisiin, joiden pohjalta tekee johtopäätöksensä niiden luotettavuudesta. Valintojen perustelu on yksiselitteisten ohjeiden puutteen vuoksi erittäin tärkeää luotettavuustarkastelussa. (Kananen 2017, 173.)

3 Kalanterointi

3.1 Kalanteroinnin periaatteet ja tavoitteet

Kalanterointi on paperinvalmistuksen prosessi, jossa paperirata puristetaan kahden tai useamman telan välissä. Kalanterointi muuttaa paperin muotoa pinnan, mutta myös paksuuden osalta. Muo-

donmuutoksen pääasiallinen aiheuttaja on puristusaine, mutta myös leikkaus- ja kitkavoimat saavat aikaan muutosta. Lämmön tai kosteuden lisäämisestä seuraava paperin plastisuuden eli muovautuvuuden kasvu edistää muodonmuutosta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204.)

Kalanterointi voidaan suorittaa joko konelinjassa niin sanotulla on-line-kalanterilla tai erillisellä off-line-kalanterilla. Osa kalanterityypeistä, esimerkiksi superkalanterit, ovat väistämättä off-line-sovellutuksia, koska niiden telat eivät kestä paperikoneen ajonopeuksissa (Superkalanterointi n.d.).



Kuvio 1. Off-line-kalanteri (Superkalanterointi N.d.)

Painopaperia valmistettaessa kalanteroinnin päätarkoitus on muokata paperin pintaominaisuudet sellaisiksi, että ne vastaavat parhaiten suunnitellun painomenetelmän asettamiin vaatimuksiin (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204). Paperin ominaisuuksia joihin kalanteroinnissa useimmiten keskitytään ovat kiilto, sileys, tiheys, mustuminen, vaaleus sekä opasiteetti eli paperin läpinäkyväisyys (Feldman 2015, 1085). Toinen tavoite on paperissa esiintyvien kosteus- ja ne-
liöpainovaihteluiden aiheuttamien paksuusvaihteluiden minimointi. Tällä mahdollistetaan hyvä rullanmuodostus ja ajettavuus. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204.)

Kalanteroinnilla saavutettavien pintaominaisuuksien positiivisen muutoksen ohella tulee myös muita, haitallisia muutoksia (ks. taulukko 1). Nämä negatiiviset muutokset ilmenevät paperin pak-suudesta riippuvissa ominaisuuksissa, kuten jäykkyydessä, lujuuksissa ja optisissa ominaisuuksissa. Kalanterointia voidaankin pitää kompromissina, jossa tasapainotetaan halutut ja ei-halutut ominai-suudet käyttötarkoituksen mukaan. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204.)

Taulukko 1. Paperin ominaisuuksien muutokset kalanteroinnissa (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 204, tiedot)

Suotuisat muutokset		Epäsuotuisat muutokset	
Sileyks	+++	Tiheys	+++
Kiilto	+++	Paksuus	---
Ilmanläpäisevyys	---	Jäykkyys	---
Öljynabsorptio	---	Kokoonpuristuvuus	---
Toispuolisuus	-	Opasiteetti	--
		Vaaleus	-
		Repäisylujuus	---
		Vetolujuus	-

+++ = kasvaa paljon

- = laskee hiukan

3.2 Kalanterointimenetelmät

3.2.1 Konekalanterointi

Konekalanterointi on kalanterointimenetelmistä ehkäpä yksinkertaisin. Konekalanteri koostuu yleensä 2–8 päällekkäin olevasta sileästä valurautatelasta eli kokillitelasta, joista alimman telan halkaisija on yleensä suurin ja ainoastaan se on kytketty käyttömoottoriin. Kaksitelaisissa yhden nipin konekalantereissa alatela on taipumakompensoitu ja ylätela vesikierrolla lämmitettävä tela. Korkeampaa lämpötilaa vaadittaessa vesilämmitys on korvattu öljylämmityksellä. Useamman telan konekalantereissa voi myös toiseksi- ja kolmanneksi alimmat telat olla taipumakompensoituja. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 211–212.)

Konekalanterointia käytetään pääosin vähäistä jälkikäsitteilyä vaativille paperilajeille tai esikalanterointina korkeampaa kiiltoa ja/tai sileyttä vaativille paperilajeille (Feldman 2015, 1090). Päättarkoituksena on rainan paksuusprofiilin tasaaminen sekä oikean karheustason aikaansaaminen. Pääasiallinen vaikutusmekanismi on puristuminen. Rainan paksuimmat kohdat ovat suurimman kuormituksen alaisena, eikä kuoppien pohjat saa käytännössä minkäänlaista käsitteilyä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 211).

3.2.2 Softkalanterointi

Softkalanteroinnissa nimensä mukaisesti ainakin nipin toinen tela on pehmeämpi, taipumakompensoitu ja pinnoitettu tela. Pehmeää telaa vastassa on lämmitetty kokillitela, jonka lämmitykseen käytetään joko vesi-, höyry- tai öljykiertoa. Kiertolämmityksen vaihtoehto on myös esimerkiksi induktiolämmitys. Paperiin kohdistuvat vaikutusmekanismit ovat pääasiassa puristuminen ja kopioituminen. Softkalanterilla lämmitykseen käytettävien metallitelojen lämpötila voi olla korkea. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 212–213.)

Konekalanterointiin verrattuna softkalanterilla saadaan aikaan parempi painopinta, sekä toispuolisuuden parempi hallinta sileyden ja tasaisuuden kannalta. Pehmeän telan antaessa enemmän periksi kuin kova metallitela on nipin maksimipaine kovaan nippiin verrattuna pienempi. Matalampi maksimipaine rikkoo vähemmän paperin kuituja, jolloin lujuusominaisuudet säilyvät parempina. Softkalanterin pääkäyttökohteina on usein paperilajit, jotka kalanteroitiin ennen konekalanterilla. Tällaisia lajeja ovat esimerkiksi sanomalehti- ja hienopaperit sekä kalanteroitavat kartongit. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 212.)

3.2.3 Superkalanterointi

Superkalanterissa telat ovat päällekkäin ja niitä on 9–17, yleensä 12. Telojen päällekkäisyyden vuoksi nippien viivakuorma kasvaa ylhäältä alaspäin mentäessä telojen omien painojen vuoksi. Ylin ja alin tela ovat taipumakompensoituja ja niiden välillä olevat telat ovat vuorotellen lämmitettyjä kokilliteloja ja pehmeitä teloja. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 213.)

Lämmitetyn telan pintaa vasten oleva paperin puoli kalanteroituu paremmin lämmön aiheuttaman plastisoitumisen vuoksi (Superkalanterointi n.d). Paperiradan molemminpuolisen käsitteilyn

mahdollistamiseksi jossain välissä on kääntötela. Kääntötelan tehtävänä on vaihtaa lämmölle enemmän altistuva puoli. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 213.)

Superkalanterointia käytetään pääosin painopaperin kalanterointiin. Toinen käyttöalue on erikoispaperien, kuten tarroissa käytettävien irrokepaperien kalanterointi. Erikoispaperien kalanteroinnissa tavoitteena on paperirainan tiivistäminen erityisesti pinnalta. (Superkalanterointi n.d.)

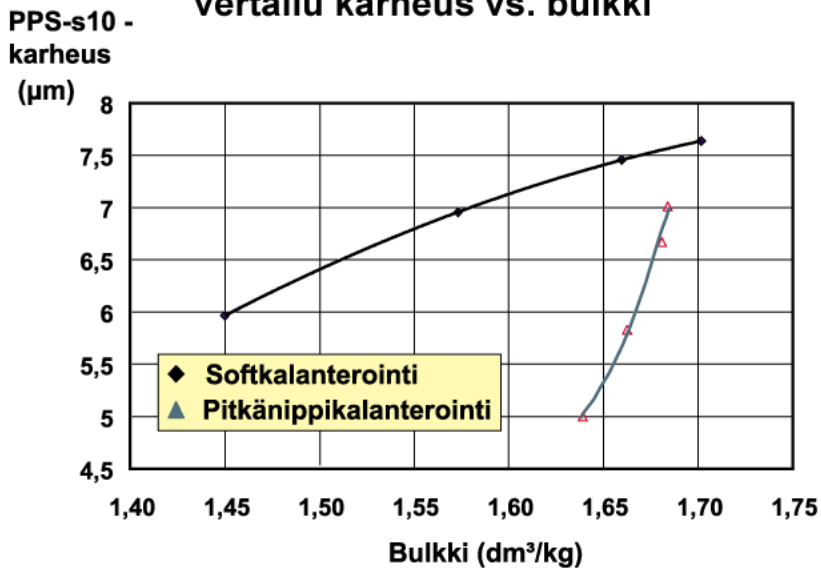
Superkalanterointia tarvitsevien paperilaatujen kysynnän vähenemisestä johtuen tätä kalanterityyppiä ei myydä enää paljoa (Jaakkola, 2022). Digitalisaatiosta on seurannut paperin käytön väheneminen, kun yhä useampi media siirtyy puhtaasti sähköiseen muotoon. Monia paperikoneita, joiden yhteydessä superkalanteria on käytetty, on suljettu.

3.2.4 Pitkänippikalanterointi

Pitkänippikalantereita on kahdenlaisia, kenkä- ja hihnakalantereita. Pitkänippikalanteroinnissa käytettävien pinnoitteiden ollessa pehmeitä on puristuminen vähäistä, jolla on vaikutusta paperinvalmistusprosessin resurssitehokkuuteen bulkin säästöllä. Bulkin säästö voi olla jopa 5 %, josta seuraa myös raaka-ainesäästöä. (Pitkänippikalanterointi n.d.)

Bulkki tarkoittaa paperin tiheyden käänteisarvoa eli ominaistilavuutta (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 268). Bulkin ollessa parempi saadaan vähemmällä raaka-ainemäärällä vaadittava pakkaus. Kuviossa 2 on vertailtu pitkänippikalanteria ja softkalanteria karheuden ja bulkin suhteen ja voidaan huomata, että pitkänippikalanterilla on päästy samalla bulkilla huomattavasti pienempään pinnankarheuteen.

Pitkänippikalanteroinnin ja softkalanteroinnin vertailu karheus vs. bulkki



Kuvio 2. Pitkänippikalanteroinnin ja softkalanteroinnin vertailu: karheus vs. bulkki
(Pitkänippikalanterointi n.d.)

Kenkäkalantereissa lämmitettyä telaa vasten on puristinosalla paljon käytetty kenkätela, esimerkiksi Valmetin SymBelt-tela. Nippileveys määräytyy kengän leveyden mukaan ja se voidaan kenkärakenteen ansiosta vakioda huolimatta kuormituksesta, telahalkaisijoista tai hihnan ominaisuuksista. Tämä mahdollistaa viipymääjan ja nippipaineen optimoinnin toisistaan riippumattomina. Kenkäkalanterissa puristusimpulsseja voidaan säätää kengän kallistusta eli niin sanottua tiliä muuttamalla. (Pitkänippikalanterointi n.d.)

Hihnakalanteri on puolestaan muutoin samanlainen kuin softkalanteri, mutta pinnoite on vastatelasta irrallinen. Irrallinen, hihnamainen pinnoite mahdollistaa softkalanterilla käytettävistä pinnoitteista pehmeämmän nipin käytön. Hihnakalanterissa viipymäaika ja puristusaine riippuvat softkalanteroinnin tavoin viivakuormasta ja hihnan kovuudesta. (Pitkänippikalanterointi n.d.)

3.3 Kalanterointimuuttujien hallinta

3.3.1 Paperiradan ominaisuudet

Kalanterointitulokseen vaikuttaa itse kalanterin mekaniikan lisäksi myös muut asiat, joista iso osa määritetään paperikoneen kuivatus- ja päällystysosilla. Kalanterointiin vaikuttavia tekijöitä ovat

esimerkiksi paperiradan kosteus ja lämpötila, kuitukoostumus sekä formaatio. Myös päällysteen ominaisuudet, kuten pigmentti, sideaineet, päällysteen määrä sekä applikointimenetelmä vaikuttavat kalanterointiin. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 206.)

Tärkeä paperiradan ominaisuus on plastisuus, joka tarkoittaa kykyä muovautua pysyvästi. Hägglom-Ahngerin ja Komulaisen (2003) mukaan pelkät puristusvoimat eivät saa paperiradassa aikaan pysyviä muutoksia. Plastisuuteen vaikuttaa olennaisesti paperiradan lämpötila ja kosteuspitoisuus (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 208). Paperin muodostuessa pääosin selluloosaa, hemiselluloosaa sekä ligniiniä sisältävistä kuiduista, on kosteudella suuri vaikutus plastisuuteen. Kosteus laskee hemiselluloosan ja ligniinin pehmenemislämpötiloja, jolloin paperin plastisuus lisääntyy (Kalanteroinnin prosessimuuttajat N.d).

Kosteuspitoisuuden lisäksi on tärkeää huomioida, kuinka pitkän ajan paperirata altistuu lämpötilalle nipissä. Tähän vaikuttaa ajonopeudet sekä telahalkaisijat ja -kivuudet. Viipymääjan lisäksi lämmön siirtymiseen vaikuttaa se, kuinka radan vienti nippiin on toteutettu. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 208).

3.3.2 Puristusaine

Puristuksen aiheuttama pintapaine on kalanteroinnin kannalta tärkeä muuttuja. Pintapaineen muodostumiseen vaikuttaa kalanterin telojen halkaisijat sekä viivakuorma. Jos viivakuorma pidetään vakiona, saadaan halkaisijaltaan pienemmillä teloilla aikaan suurempi pintapaine, koska nipin leveys jää pienemmäksi. Viivakuormaa nostessa kovat telat painuvat syvemmälle paperiin, jolloin nipin leveys ja viipymäaika kasvavat. Liian suuri kuormitus voi heikentää paperin ominaisuuksia. (Kalanteroinnin prosessimuuttajat n.d.)

Kalanterinipin maksimipuristusaine määräytyy viivakuorman, nipin leveyden sekä telojen kovuuden mukaan ja se voidaan laskea Hertzin yhtälöillä (kts. kaavat 1 ja 2) (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 207). Telojen kovuutta kuvastavat Poisson-luku ν sekä kimmomoduuli E , jotka ovat materiaalikohtaisia elastisia ominaisuuksia.

$$P = \frac{q}{b} \quad (1)$$

missä P = keskimääräinen nipipaine, kPa

q = viivakuorma, kN/m

b = nipin leveys, m

$$P_{\max} = \frac{4}{\pi} * P \approx 1,273 * \sqrt{\frac{q * E_1}{\frac{D_1 * D_2}{D_1 + D_2} * (1 - \nu^2)}} \quad (2)$$

missä P_{\max} = maksimipaine nipissä, kPa

ν = pehmeän telan Poisson-luku

E_1 = pehmeän telan kimmomoduuli, Mpa

D_1 = pehmeän telan halkaisija, m

D_2 = kokillitelan halkaisija, m

3.3.3 Viipymäaika nipissä

Paperin viipymäajan nipissä määrittää ajonopeus, nipin leveys sekä nippien lukumäärä. Viipymäaika määrittää, kuinka kauan paperi on puristuksen ja lämmön plastisoivan vaikutuksen alaisena. Nipin leveyteen vaikuttaa viivakuorma, telojen halkaisijat, ajonopeus, paperin paksuus ja pehmeän telan kimmomoduuli sekä Poisson-luku. Staattisessa tapauksessa nipin leveys ilman paperirataa lasketaan kaavan 3 mukaisesti ja viipymäaika kaavan 4 mukaisesti. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 207.)

$$b = 1000 * \sqrt{\frac{8q}{\pi} * \frac{1 - \nu^2}{E_1} * \frac{D_1 * D_2}{D_1 + D_2}} \quad (3)$$

$$t = \frac{b}{\nu} \quad (4)$$

missä t = viipymäaika nipissä, s

v = ajonopeus, m/s

Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että ajonopeutta kasvattaessa viipymäaika lyhenee ja kalanterointitulokseksi huononee (Kalanteroinnin prosessimuuttajat N.d). Häggblom-Ahngerin ja Komulaisen (2003) mukaan viipymäaika nostamalla ajonopeutta vähentämällä saadaan lähtökohdallisesti parempia tuloksia, mutta samalla paperi altistetaan lämmölle pidemmäksi aikaa, joka voi aiheuttaa paperissa ylikuivumista. Lämmön ehtiessä vaikuttaa pelkän pinnan sijaan rainan koko paksuuteen, menetetään niin sanottu gradienttiefekti (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2003, 208). Gradienttiefektiä käsitellään tarkemmin alaluvussa 3.3.5.

Nippien lukumäärän kasvaessa yksittäisen nipin viipymäajan merkitys pienenee. Viipymäaikojen summa kasvaa useiden nippien tapauksessa jo niin suureksi, että ajonopeuden vaikutuksen merkitys muuttuu kalanterointituloksen kannalta lähes olemattomaksi. Mikäli kalanterilla on nippejä 9 tai enemmän, on ajonopeuden merkityksen havaittu vähenevän oleellisesti. (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2003, 208.)

3.3.4 Puristusimpulssi

Lämpötilan ja paperiradan ominaisuuksien ohella suurin vaikutus kalanterointitulokseen on puristusaineella ja viipymäajalla. Näihin voidaan vaikuttaa välillisesti viivakuorman ja ajonopeuden avulla. Mitä suurempi on ajonopeus, sitä lyhyemmän ajan paperirata on nipin vaikutuksen alaisena. Ajonopeutta nostamalla joudutaan siis myös viivakuormaa nostamaan, jos puristusimpulssi halutaan pitää samana. (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2003, 206–207.)

Puristusimpulssi on paineen ja paineen vaikutusajan tulo (kts. kaava 5). Paineena käytetään keskimääräistä painetta, joka lasketaan kaavan 6 mukaisesti. Aika lasketaan kaavan 7 mukaisesti. (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2003, 206.)

*impulssi = paine * aika*

(5)

$$\text{keskimääräinen paine} = \frac{\text{viivakuorma}}{\text{nipin leveys}} \quad (6)$$

$$\text{aika} = \frac{\text{nipin leveys}}{\text{nopeus}} \quad (7)$$

Impulssin voi laskea myös yhdistämällä kaavat 6 ja 7 kaavan 5 mukaisesti, jolloin ne supistuvat muotoon:

$$\text{impulssi} = \frac{\text{viivakuorma}}{\text{nopeus}} \quad (8)$$

Tarkastelemalla yllä olevia kaavoja huomataan, että nipin leveys supistuu pois. Kaavaa 8 voisikin pitää helpoimpana tapana laskea puristusimpulssi, koska viivakuorma sekä ajonopeus ovat yleensä hyvin tiedossa olevia suureita paperikoneella. Puristusimpulssi käsitteenä on puutteellinen, mutta hyvä tapa kuvata ajonopeuden ja viivakuorman muutosten vaikutusta lopputulokseen (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 207).

3.3.5 Gradienttiefekti

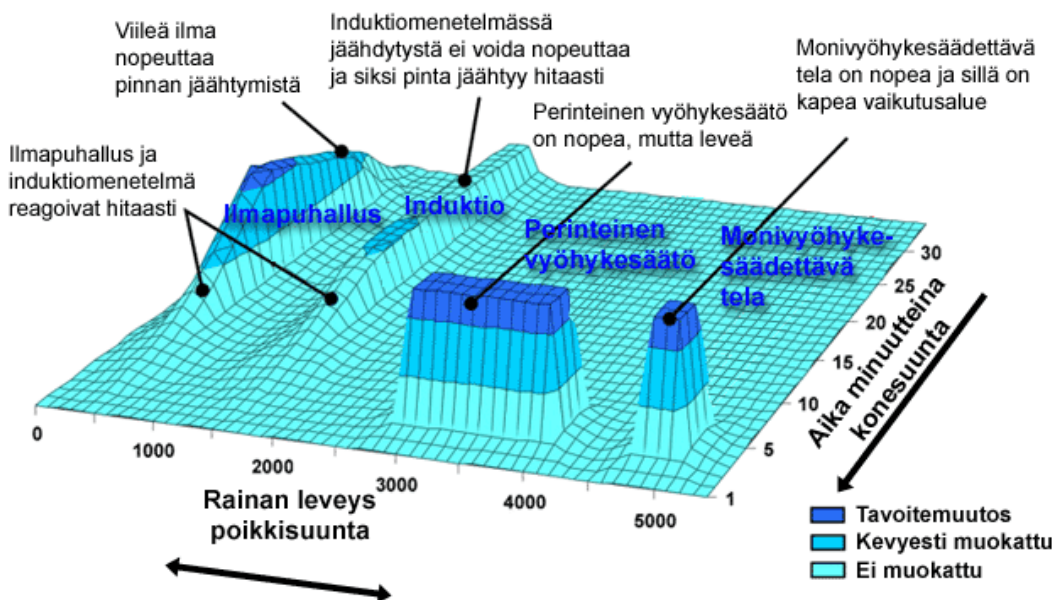
Kalanteroinnin tavoitteena on pintaominaisuuksien parantaminen mahdollisimman vähäisellä sisäosan ominaistilavuuden muutoksella (Kalanteroinnin prosessimuuttajat n.d.). Tämä vaatii käytännössä sitä, että paperiradan plastisuus vaihtelee pinnan ja keskiosan välillä. Paine vaikuttaa tasaisesti koko rainan paksuudella tehden siitä periaatteessa huonon tasoittajan, mutta kosteutta ja lämpöä voidaan kuitenkin hallita paksuussuuntaisesti. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003, 209.)

Gradienttiefekti saadaan aikaan tekemällä pinta plastisemmaksi kuin sisäosa. Kosteusgradienttikalanteroinnissa tämä tehdään kostuttamalla rainaa juuri ennen nippiä. Lämpötilagradienttikalanteroinnissa efekti saadaan aikaiseksi korkeilla telälämpötiloilla ja ajonopeuksilla. Viipymääjan ollessa lyhyt, lämpö ehtii vaikuttaa vain pintaosiin. (Kalanteroinnin prosessimuuttajat n.d.)

3.3.6 Radan paksuusprofiilin hallinta

Paperinvalmistuksessa halutaan saada aikaiseksi mahdollisimman tasalaatuista tuotetta. Paperiradan paksuus vaihtelee jonkin verran telan pituussuunnassa, johtuen esimerkiksi telojen omasta painosta johtuvasta muodonmuutoksesta (Telatyyppit ja rakenteet n.d.). Tämän vuoksi paksuusprofiiliin joudutaan vaikuttamaan erilaisilla tekniikoilla. Kuviossa 3 kuvataan erilaisten profiilinhallintamenetelmien vaikutusalueita ja -aikoja.

Profiilisäätöjen erot



Kuvio 3. Profiilisäätöjen erot (Kalanterin profiilinsäätölaitteet n.d.)

Paksuusprofiilia voidaan säätää erilaisilla taipumakompensoiduilla teloilla, sekä metallin lämpölaajenemiseen perustuvilla profiilinsäätölaitteilla. Tällaisia profiilinsäätölaitteita ovat jäähdytys ja lämmitys ilmapuhaltimilla sekä induktiokuumennus. Näillä kaikilla säätölaitteilla pyritään vaikuttamaan paikallisesti telan paksuuteen, joka puolestaan vaikuttaa paikallisesti paperiradan paksuuteen. Telan laajentuessa paperirata ohenee sekä päinvastoin. (Kalanterin profiilinsäätölaitteet n.d.)

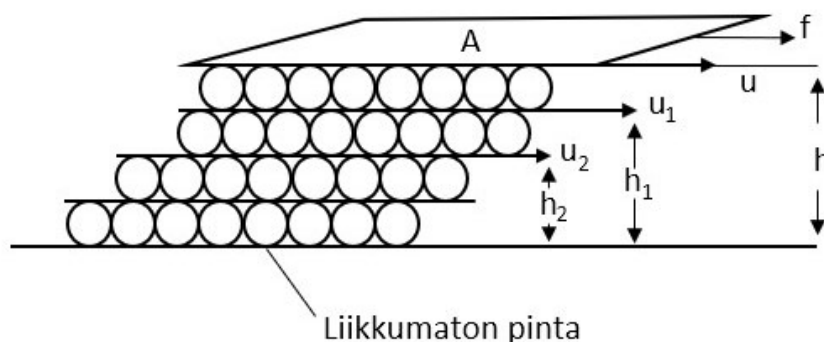
Taipumakompensoiduissa teloissa paperiradan paksuusmuutos saadaan aikaan kuormittamalla telaa hydraulisesti sisältä päin. Tähän käytettäviä tekniikoita on erilaisia, joiden tarkkuus profiilinsäädössä vaihtelee telatyypeittäin. Taipumakompensoituja teloja käydään läpi tarkemmin luvussa 6.

4 Viskositeetti

Viskositeetti on aineen ominaisuus, joka kuvaa sen kykyä vastustaa liikettä aineen "sisäisistä kitkoista" johtuen (Kivioja, Kivivuori & Salonen 2007, 172). Kiviojan ja muiden (2007) mukaan korkeamman viskositeetin omaavat aineet, esimerkiksi öljyt, virtaavat matalan viskositeetin omaavia, esimerkiksi vettä, hitaammin. Viskositeetti on hydraulinesteen olennaisin tunnusluku. Oikeansuuruksen viskositeetin omaavan aineen valinnalla voidaan pitää järjestelmän tehohäviöt minimissä ja voitelukyky parhaana mahdollisena. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 20.)

4.1 Dynaaminen eli absoluuttinen viskositeetti

Kiviojan ja muiden (2007) mukaan Newton määritteli viskositeetin kuvion 4 mukaisen mallin mukaisesti. Nestekerroksen päällä olevan levyn sekä liikkumattoman pinnan välillä olevan aineen voidaan ajatella liikkuvan äärettömän ohuina kerroksina, joille $d_y = h_i - h_{i+1}$. Ylin kerros liikkuu nopeudella u ja alin pysyy paikallaan. Välissä olevat molekyylikerrokset liikkuvat kukin nopeudella u_i ja sijaitsevat korkeudella h_i . (Kivioja, Kivivuori & Salonen 2007, 172; Teollisuusvoitelu 2006, 17.)



Kuvio 4. Voiteluaineen rakenne viskositeetin määrittelyä varten Newtonin mukaan (Kivioja, Kivivuori & Salonen 2007, 172, tiedot)

Nestekerrosten välillä oleva kitka saa aikaiseksi leikkausvoiman, jonka takia levyn liikuttamiseen tarvitaan voima F , joka voidaan laskea kaavan 9 mukaisesti:

$$F = \eta * A * \frac{u}{y} \quad (9)$$

missä η = nesteen sitkeysominaisuuksia kuvaava verrannollisuuskerroin, jota kutsutaan **dynaamiseksi viskositeetiksi** [Pa*s]

A = nestekerroksen päällä olevan levyn kosketuspinta-ala [m²]

u = levyn (sekä ylimmän nestekerroksen) nopeus suhteessa liikkumattomaan pintaan [m/s]

y = levyn (sekä ylimmän nestekerroksen) korkeus suhteessa liikkumattomaan pintaan [m]

Leikkausvoiman F ja pinta-alan A avulla saadaan laskettua leikkausjännitys τ :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (10)$$

Yhdistämällä yhtälöt 9 ja 10 saadaan Newtonin laiksi kutsuttu yhtälö:

$$\tau = \eta * \frac{du}{dy} \quad (11)$$

Yhtälöä noudattavat nesteet ovat niin sanottuja newtonilaisia nesteitä. Tähän kategoriaan kuuluvat esimerkiksi kaikki hydraulinesteet. Newtonilaisille nesteille on tyypillistä se, että pienikin leikkausjännitys saa niissä aikaan virtausta. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 24.)

Dynaamisen viskositeetin määritelmäksi saadaan Newtonin lain yhtälöä muokkaamalla:

$$\eta = \frac{\tau}{du/dy} \quad (12)$$

Dynaamisen viskositeetin SI-järjestelmän mukainen yksikkö on [Pa*s]. Muita käytettyjä yksiköitä ovat Poisi [P] sekä sen kerrannaiset (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 24). Näitä on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Dynaamisen viskositeetin yksiköitä (Kauranne ym. 2013, 25, tiedot)

Yksikkö	Pa*s
1 P (Poisi)	0,1
1 cP	10 ⁻³

4.2 Kinemaattinen viskositeetti

Kauranne ja muut (2013) sekä Kivioja ja muut (2007) molemmat toteavat kinemaattisen viskositeetin olevan teoreettisissa tarkasteluissa yleisemmin käytetty vaihtoehto. Se voidaan laskea dynaamisen viskositeetin ja nesteen tiheyden avulla kaavan 13 mukaisesti. (Kauranne ym. 2013, 25; Kivioja ym. 2007, 172.)

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (13)$$

missä η = dynaaminen eli absoluuttinen viskositeetti [Pa*s]

ρ = nesteen tiheys [kg/m³]

Kinemaattisen viskositeetin SI-järjestelmän mukainen yksikkö on [m²/s]. Muita käytettyjä yksiköitä ovat Stoki [St] sekä sen kerrannaiset (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 25). Näitä on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kinemaattisen viskositeetin yksiköitä (Kauranne ym. 2013, 25, tiedot)

Yksikkö	m ² /s
1 St (Stoki)	10 ⁻⁴
1 cSt	10 ⁻⁶

4.3 Lämpötilan ja paineen vaikutus viskositeettiin

Lämpötilan vaikutus viskositeettiin on sekä Kauranteen ja muiden (2013) että Kiviojan ja muiden (2007) mukaan erittäin merkittävä. Lämpötilan noustessa viskositeetti laskee. Pienikin lämpötilan nousu aiheuttaa merkittävän muutoksen viskositeettiin, joten hydraulineestettä valitessa on ensiarvoisen tärkeää huomioida käyttölämpötila. (Kauranne ym. 2013, 26; Kivioja ym. 2007, 172.)

Paineen nousu aiheuttaa puolestaan viskositeetin kasvamista. Lämpötila kuitenkin vaikuttaa paineen vaikutuksen suuruuteen; korkeassa lämpötilassa paineen vaikutus viskositeettiin vähenee. Käyttöpainetasojen ollessa alle 40 MPa, ei paineen vaikutusta viskositeettiin lähtökohtaisesti tarvitse huomioida, vaan sitä voidaan pitää merkityksettömänä. (Kauranne ym. 2013, 26–27.)

5 Hydraulinesteet

5.1 Hydraulinesteiden tehtävät

Hydraulinesteen pääasiallinen tehtävä on toimia pumpulta toimilaitteelle tehoa välittävänä väliaineena. Tämän ohella hydraulinesteillä on myös järjestelmän kunnon ylläpitoon liittyviä tehtäviä, kuten esimerkiksi voitelu, tiivistys, jäähdytys sekä puhtaanapito. Parhaan mahdollisen hyötysuhteen saamiseksi täytyy valita viskositeetiltaan sopiva neste. Liian juokseva eli pienen viskositeetin omaava neste aiheuttaa ylimääräisiä vuotohäviöitä, kun taas liian jäykkä eli korkean viskositeetin omaava neste puolestaan aiheuttaa kitkahäviöitä. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 112.)

Järjestelmän tehohäviöt aiheuttavat lämpötilan nousua. Mikäli lämpötila nousee liian korkeaksi, aiheutuu siitä haittoja sekä nesteen toiminnalle että komponenteille. Lämpötilan nousun ehkäisemiseksi tarvitaan usein jäähdytysjärjestelmä, jossa virtaavan hydraulinesteen avulla kuljetetaan häviöistä nesteeseen siirtynyt lämpö pois järjestelmästä. (Kauranne, Kajaste & Vilenius 2013, 112–113.)

Kauranteen, Kajasten ja Vileniuksen (2013, 112) mukaan erillinen voitelujärjestelmä on hydraulikomponenttien yhteydessä tarpeeton, koska hydraulineeste itsessään voitelee komponentteja. Esimerkiksi telahydrauliikassa kuormitus ja voitelu tapahtuvat samaan aikaan öljyfilmin toimesta. Kuormituselementtien rakennetta käsitellään tarkemmin luvussa 6.1.2. Riittämätön öljyfilmi aiheuttaa telassa esimerkiksi vaihteen kytkinrenkaiden vaurioitumista. Voitelun ollessa yksi hydraulineesteen tärkeä tehtävä, tulee nesteellä olla hyvät voiteluominaisuudet (Kauranne ym. 2013, 112).

Ruostuminen ja korroosio ovat seurausta järjestelmässä olevasta vedestä ja ilmasta. Ne aiheuttavat komponenttien kulumista, joka puolestaan heikentää järjestelmän hyötysuhdetta. Näiden ilmiöiden ehkäisemiseksi hydraulineesteen tulisi muodostaa komponenttien pinnoille suojaava kalvo. Hydraulineesteen hyvät ilman- ja vedenerotusominaisuudet edesauttavat korroosiolta ja ruostumiselta suojautumista. (Kauranne ym. 2013, 113.)

5.2 Hydraulineesteiden ominaisuudet

5.2.1 Viskositeetti ja viskositeetti-indeksi

Järjestelmän tehohäviöiden minimoimiseksi viskositeetin tulee olla sopiva (Kauranne ym. 2013, 121). Kauranteen ja muiden (2013) mukaan alhainen viskositeetti on lähtökohtaisesti kitkasta johtuvien tehohäviöiden sekä pumppauksen kannalta parempi, mutta liian alhainen viskositeetti johtaa voitelukalvon pysymättömyyteen ja sitä kautta komponenttien ennenaikaiseen kulumiseen. Viskositeetin aiheuttamat kitkahäviöt vaikuttavat esimerkiksi paperikoneen telan pyörittämiseen vaadittavan tehon suuruuteen.

Lämpötilan vaikuttaessa suuresti viskositeettiin, tulee niiden luokittelussa käyttää vakiolämpötilaa. Hydraulineesteeet jaetaan viskositeettiluokkiin ISO 3448 -standardia noudattaen (Kauranne ym. 2013, 121). Siinä luokittelu tehdään nesteen kinemaattisen viskositeetin mukaan lämpötilassa 40°C ja kussakin luokassa sallitaan $\pm 10\%$ vaihtelu keskiviskositeetin arvossa (Kauranne ym. 2013, 121). Taulukossa 4 on kuvattu ISO VG-luokkia ja niiden raja-arvoja.

Taulukko 4. ISO 3448 VG-luokitus (PSK 6701:2006, 5)

ISO-viskositeetti-luokka ISO Viscosity grade	Viskositeetin keskipiste Mid point of viscosity	Kinemaattisen viskositeetin rajat 40 °C:ssa [mm ² /s] Kinematic viscosity limits at 40 °C [mm ² /s]	
		Min.	Max.
VG			
2	2,2	1,98	2,42
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	4,14	5,06
7	6,8	6,12	7,48
10	10	9,00	11,0
15	15	13,5	16,5
22	22	19,8	24,2
32	32	28,8	35,2
46	46	41,4	50,6
68	68	61,2	74,8
100	100	90,0	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650
2200	2200	1980	3520
3200	3200	2880	3520

Viskositeetti-indeksi, lyhenteeltään VI, kuvastaa nesteen viskositeetin muutosta suhteessa lämpötilan muutokseen. Suuri VI tarkoittaa pienempää lämpötilan vaikutusta viskositeettiin. Tämä tarkoittaa sitä, että suuren VI-arvon omaava neste toimii paremmin laajemmalla lämpötilaskaalalla. Esimerkiksi käynnistyksen yhteydessä vallitseva matalampi lämpötila tai käytön aikaiset hetkelliset lämpötilapiikit eivät aiheuta suuren VI-arvon omaavalle nesteelle ongelmia. (Kauranne ym. 2013, 123.)

5.2.2 Tiheys

Nesteen tiheys esiintyy muun muassa kinemaattisen viskositeetin laskentakaavassa. Sillä on sen lisäksi vaikutusta Kauranteen ym. (2013) mukaan paineiskujen suuruuteen ja järjestelmässä esiintyviin häviöihin. Tiheyden tulisi olla näiden minimoimiseksi mahdollisimman pieni. (Kauranne ym. 2013, 124.)

Tiheyden ollessa lämpötilasta riippuvainen, tulee sille määrittää perusarvo. ISO-standardin mukaisesti perustiheys määritetään 15°C lämpötilassa. Kaavalla 14 voidaan määrittää tiheys muuttuneessa lämpötilassa. (Kauranne ym. 2013, 124.)

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_{15}}{1 + \alpha * (\theta - 15)} \quad (14)$$

missä ρ_{θ} = nesteen tiheys muuttuneessa lämpötilassa

ρ_{15} = nesteen tiheys lämpötilassa 15 °C

α = tilavuuden lämpötilakerroin

θ = muuttunut lämpötila

5.2.3 Ilmanerottumis-, vaahtoamisenesto- ja hapettumisenesto- ominaisuudet

Hydraulineste voi sisältää ilmaa joko liuenneena tai vapaina kuplina. Ilma pääsee nesteeseen useimmiten vuotavien tiivisteiden, heikon ilmauksen tai pyörteilystä seuraavan vaahtoamisen takia. Normaalisti hydraulineste voi sisältää muutamia prosentteja ilmaa, joka ei vielä vaikuta nesteen suorituskykyyn. Vapaan ilman aiheuttamalla ilmakuplilla on sen sijaan suurempia haittavaikutuksia, jonka takia ne tulisivat poistaa järjestelmästä mahdollisimman nopeasti.

Ilmanerottumiskyvyllä tarkoitetaan nesteen kykyä tuoda vapaat ilmakuplat pintaan. Pinnalle nousevan ilman muodostamien kuplien tulisi myös rikkoutua nopeasti, jolloin pinnalle ei synny vaahtoa. (Kauranne ym. 2013, 126.)

Vapaat ilmakuplat lisäävät nesteen kokoonpuristuvuutta, joka Kauranteen ja muiden (2013) mukaan tekee järjestelmän toiminnasta epämääräisempää ja laskee hyötysuhdetta. Ilmakuplat voivat myös aiheuttaa kavitaatiota, joka voi vaurioittaa komponentteja (Kauranne ym. 2013, 126; Teollisuusvoitelu 2006, 135). Kavitaatiossa nopean paineenalennemisen seurauksena nesteeseen muodostuu höyrykuplia, jotka paineen taas noustessa luhistuvat takaisin nestemäiseen muotoon. Tämä aiheuttaa erittäin voimakkaita paineiskuja, jotka voivat aiheuttaa komponenttien vaurioitumista. (Teollisuusvoitelu 2006, 132.)

Ilmanerotumiskykyyn tehostavasti vaikuttavia ominaisuuksia ovat matala viskositeetti ja pintajännitys (Kauranne ym. 2013, 126). Kauranteen ja muiden (2013) mukaan ilmanerotumiskykyä voidaan parantaa nesteeseen lisäaineistuksella ja Kivioja ja muut (2007) toteavat piipohjaisten aineiden parantavan vaahtoamisenestoa.

Hydraulinesteeseen sekoittunut happi nopeuttaa nesteen vanhenemista. Hapettuminen aiheuttaa nesteen koostumuksen muutosta sekä muodostaa nesteeseen lietettä ja orgaanisia happoja, jotka voivat vahingoittaa esimerkiksi tiivisteitä sekä tukkia välyksiä. Hapettuminen heikentää myös hydraulinesteen ilman- ja vedenerotusominaisuuksia. Korkea lämpötila ja nesteen epäpuhtaudet lisäävät hapettumisalttiutta. Hapettumisenestoon voidaan vaikuttaa laadukkaan perusnesteeseen valinnalla sekä ylläpitämällä järjestelmässä sopivaa lämpötilaa ja poistamalla epäpuhtauksia mahdollisimman tehokkaasti. (Kauranne ym. 2013, 125.)

5.2.4 Vedenerottumisominaisuudet

Kauranteen ja muiden (2013) mukaan hydraulinesteessä oleva vesi heikentää voitelukykyä sekä edistää ruostumista ja korroosiota. Vesi voi myös tehdä vaahtoamisenestoon tarkoitetun lisäaineistuksen toimintakyvyttömäksi (Teollisuusvoitelu 2006, 131). Näin ollen voidaan sanoa veden olevan hydraulijärjestelmille haitallinen aine. Telahydrauliikassa normaalioloissa vettä ei juurikaan esiinny, joten se ei tuota juurikaan ongelmia (Järvenpää 2022).

Veden pääsy järjestelmään tulisi estää mahdollisimman hyvin, vaikka täydellinen estäminen ei lähtökohtaisesti ole mahdollista. Hydraulijärjestelmien säiliöt ovat lähes aina hengittäviä, jotta säiliön paine pysyy vaaditulla tasolla. Hengittämisen mahdollistavan aukon kautta pääsee ilman mukana vettä järjestelmään. Lämpötilan laskiessa vesi pyrkii muodostamaan hydraulinesteen kanssa emulsion, joka edistää veden pääsyä säiliöstä itse järjestelmään. (Kauranne ym. 2013, 126.)

Vedenerottumiskykyyn vaikuttavat esimerkiksi nesteen viskositeetti ja tiheys, lisäaineistus, epäpuhtaudet sekä nesteen sisältämät kemikaalit. Mitä suurempi tiheys on hydraulinesteellä ja vedellä, sitä nopeammin vesi lähtökohtaisesti erottuu. Osa ruosteen- ja kulumisenestoaineista hidastavat veden erottumista. Myös epäpuhtaudet hidastavat veden erottumista tai pahimmassa tapauksessa tyystin estävät sen. Esimerkiksi vettä tehokkaasti sitovat sellu- ja puukuidut voivat estää vedenerottumisen. (Teollisuusvoitelu 2006, 134.)

5.2.5 Ominaislämpö ja lämmönjohtavuus

Ominaislämpö tarkoittaa energiamäärää, joka vaaditaan nostamaan tietyn massan lämpötilaa yhdellä asteella (Boles & Çengel 2015, 174). Tämä sama voidaan kertoa myös ominaislämpökapasiteetilla c , joka on ainekohtainen ominaisuus. Ominaislämpökapasiteetti löytyy esimerkiksi kappaleen vastaanottaman lämpömäärän kaavasta (kaava 15) (Valtanen 2016, 193):

$$Q = c * m * \Delta T \quad (15)$$

missä Q = vastaanotettu lämpöenergia [J]

c = aineen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]

m = kappaleen massa [kg]

ΔT = lämpötilan muutos [K]

Lämmönjohtavuuden tulisi olla Kauranteen ja muiden (2013) mukaan hydraulineesteellä mahdollisimman suuri. Suuri lämmönjohtavuus vaikuttaa edullisesti nesteen jäähdytyskykyyn (Kauranne ym. 2013, 127). Suuren lämmönjohtavuuden omaava neste kuljettaa helpommin lämpöä pois.

6 Telat

Telat ja sylinterit ovat yksiä kalleimmista paperikoneen komponenteista, muodostaen noin 60 % uuden paperikoneen hinnasta (Telatyypit ja rakenteet n.d.). Teloja on monia erilaisia, joita käytetään paperikoneen eri osilla eri tarkoituksiin. Tässä luvussa keskitytään opinnäytetyön aiheen vuoksi pääosin kalanterilla käytettäviin taipumakompensoituihin teloihin. Osaa käsiteltävistä telatyypeistä käytetään kuitenkin myös kalanterin lisäksi muilla paperikoneen osilla.

Telojen hydrauliiikan monimutkaisuus vaihtelee huomattavasti eri sovellutusten välillä. Tästä hyvänä esimerkkinä on uivan telan vertaaminen monivyoohykesäätöteloihin. Näiden telatyypien rakenteita käydään tarkemmin läpi vastaavissa alaluvuissa.

6.1 Taipumakompensoidut telat

Ulkoisten voimien ja telan oman painon muodostama yhteiskuorma aiheuttaa telassa taipumista, jonka suuruuteen vaikuttavat telan rakenne ja mitoitus, kuormien suuruus ja suunta sekä käytetyt materiaalit (Telatyypit ja rakenteet n.d.). Taipuminen aiheuttaa nippikuorman epätasaista jakautumista telan pituudella, joka puolestaan aiheuttaa epätasaisuutta paperiradan laadussa. Vastauksena tälle taipumalle on kehitetty taipumakompensoidut telat.

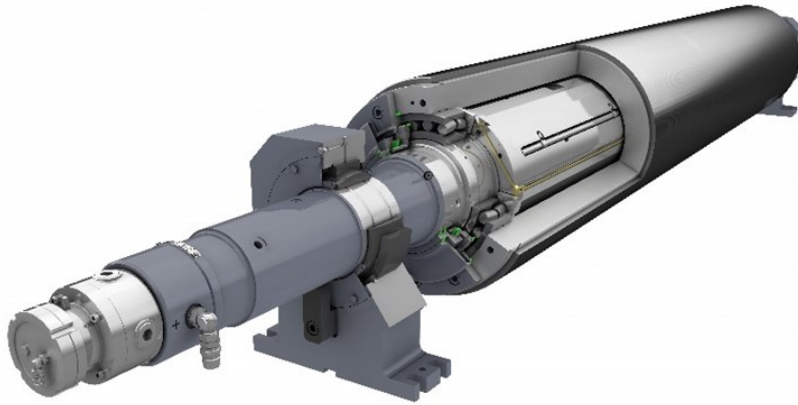
Ensimmäinen taipuman kompensointiin kehitetty menetelmä oli telan muodon pysyvä muuttaminen, eli bombeeraus. Bombeeraus ei ole kuitenkaan optimaalinen menetelmä, koska kaarevan muodon vuoksi telan kehänopeus on erilainen eri kohdassa telaa, joka aiheuttaa suurilla bombeerauksilla viiran ja huovan käyristymistä. Kiinteän bombeerauksen suurin ongelma on sidonnaisuus tiettyyn viivakuormaan. Nykyisin samalla paperikoneella saatetaan tehdä eri paperilajeja, jolloin mahdollisuus ajaa eri viivakuormilla on välttämättömyys. (Telatyypit ja rakenteet n.d.)

6.1.1 Uiva tela

”Uiva tela” on saanut nimityksensä liikkuvasta vaipasta. Vaipan asemaa akseliin nähden voidaan säätää tarvittaessa. Uivaa telaa ei suositella käytettävän koneilla, joilla ajonopeus ylittää 1200 m/min. Hydraulikaltaan uiva tela on taipumakompensoiduista teloista yksinkertaisin. (Telatyypit ja rakenteet n.d.)

Uivassa telassa taipumakompensointi perustuu kahteen tiivisteillä toisistaan erotettuun painekammioon. Kammioiden välille tuotetaan säädettävä paine-ero, jota käytetään tukemaan vaippaa nippivoimaa vasten. Tuloksena on kohtuullisen tasainen nippikuormitus. Konekalanterilla uivan telan vaippa on yleensä päällystämätöntä kokillivalurautaa, kun taas softkalanterilla pinnoitettua suomugrafiittivalurautaa. (Telatyypit ja rakenteet n.d.)

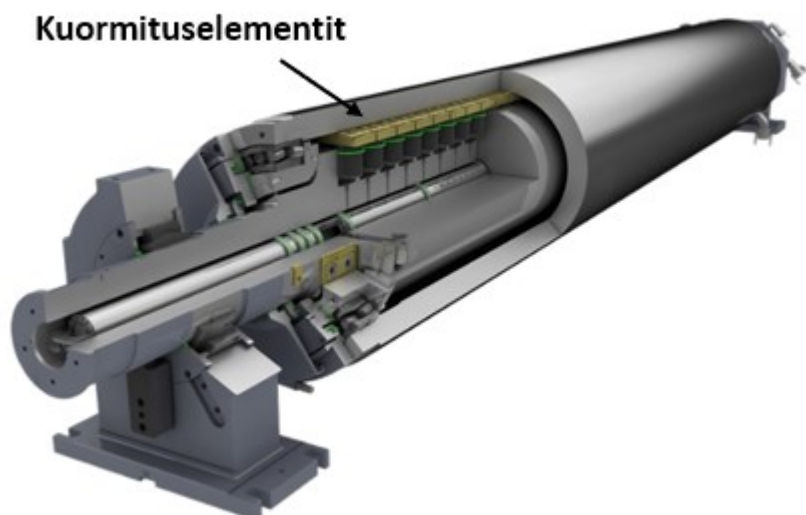
Uivia teloja valmistaa useat eri valmistajat mutta rakenteellisesti ne poikkeavat toisistaan hyvin vähän (Telatyypit ja rakenteet n.d.). Kuviossa 6 kuvataan Valmetin SymRoll-telan rakennetta. SymRoll- telat ovat kalantereilla ja erityisesti kapeammilla koneilla yleisesti käytettyjä (Järvenpää 2022).



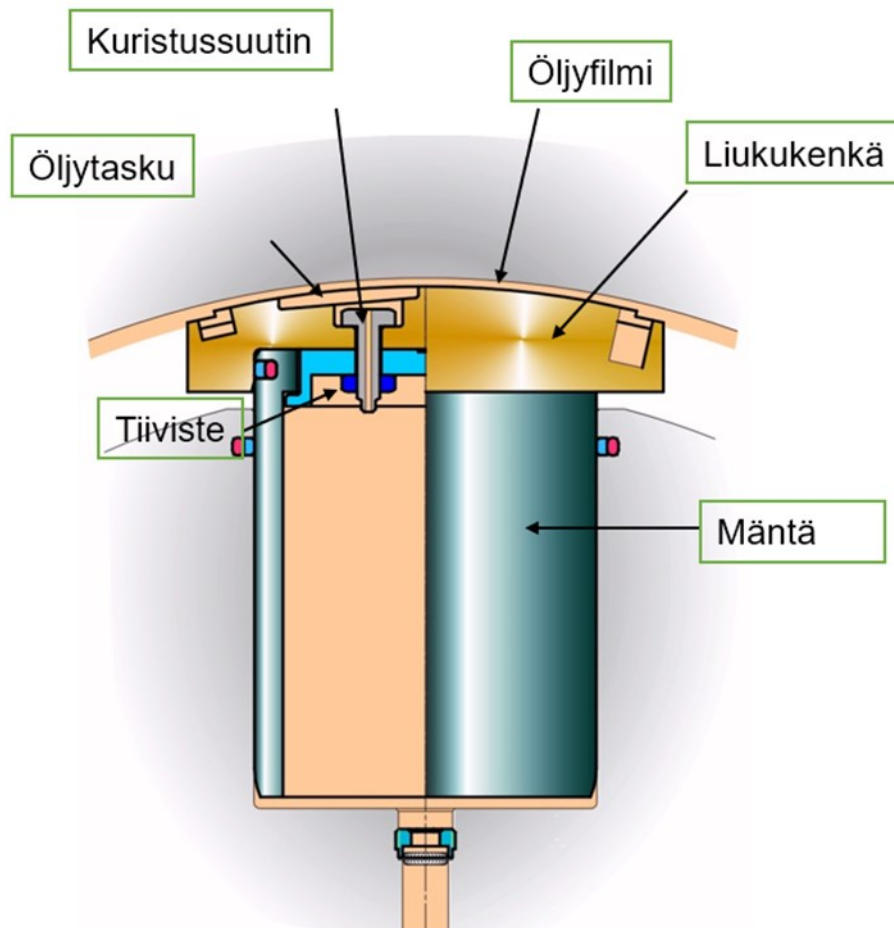
Kuvio 5. SymRoll-tela (Valmetin koulutusmateriaali 2021)

6.1.2 Vyöhykesäädettävä tela

Vyöhykesäädettävillä teloilla päästään uivaa telaa tarkemmalle tasolle profiilinsäädössä. Taipumakompensaatio perustuu vyöhykkeisiin jaettuihin hydraulisiin kuormituselementteihin (Telatyypit ja rakenteet n.d.). Kuviossa 6 on esitetty Valmetin SymZ/ZS-telan rakennetta. Kuviossa 7 puolestaan on esitetty tarkemmin kuormituselementin rakenne.



Kuvio 6. SymZ/ZS-telan rakenne (Valmetin koulutusmateriaali 2021, muokattu)



Kuvio 7. Kuormituselementti (Valmetin koulutusmateriaali 2012, muokattu)

Kuormituselementin männän alle syötetään öljyä tarvittavalla paineella. Öljy pääsee männän läpi kapillaariputkien ja kuristussuuttimen kautta liukukengän öljytaskuun, jonka reunojen yli purkautuva öljy muodostaa öljyfilmin. Öljyfilmin tehtävä on voidella vaippaa sekä pitää se vakioetäisyydellä. (Telatyypit ja rakenteet n.d.)

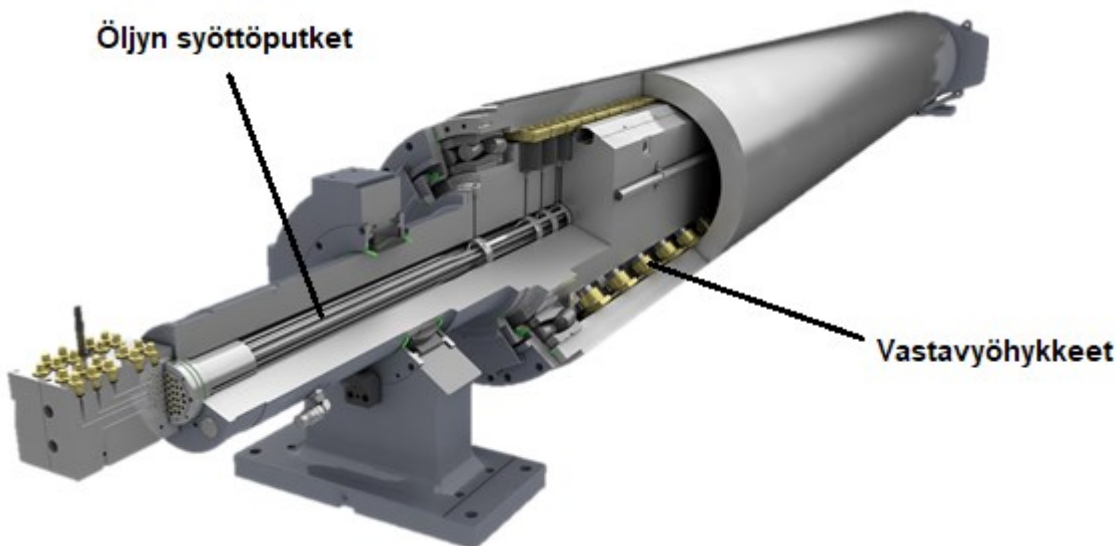
Vyöhykkeitä on Järvenpään (2022) mukaan yleensä 8 ja kaikille vyöhykkeille on oma öljynsyöttöputkensa. Mikäli koneella ei tarvita profilointimahdollisuutta, voidaan vyöhykesäädettävää telaa käyttää yksivyöhykkeisenä (Telatyypit ja rakenteet n.d.). Tässäkin tapauksessa saadaan kuormituselementtien hyvät puolet, kuten värähtelyjen vaimennus, alhainen tehonkulutus ja huoltovapaa rakenne (Telatyypit ja rakenteet n.d.).

6.1.3 Monivyöhykesäädettävä tela

Monivyöhykesäädettävillä teloilla saadaan taipumakompensoiduista teloista hienovaraisin profiilinsäätö. Näitä teloja käytetään pääosin vain kalanterilla, koska puristimella kuiva-aineprosentti on vielä sen verran alhainen, ettei monivyöhyketelojen mahdollistamaa profiilinsäätötarkkuutta tarvita. Pääasiallinen ero tavalliseen vyöhyketelaan on vyöhykkeiden määrä. (Järvenpää 2022.)

Monivyöhyketelassa jokaista kuormituselementtiä voidaan säätää omana vyöhykkeenään. Kuormituselementtejä voi olla jopa 70, joten hydrauliiikan kannalta tällainen tela on varsin monimutkainen (Järvenpää 2022). Jokainen kuormituselementti vaatii erilliset öljynsyötöt sekä säätöventtiilit (Telatyypit ja rakenteet n.d.).

Monivyöhykesäädettävissä teloissa on kuormituselementtien lisäksi vastavyöhyke-elementit, joilla säädetään kuormituksen vastavoimaa (Järvenpää 2022.). Tällä saadaan aikaiseksi parempi säädön hallinta matalilla viivakuormilla ajettaessa (Järvenpää 2022.). Kuviossa 8 on esitetty Valmetin SymCDS-telan rakenne, sekä sen eroavaisuuksia SymZ/ZS-vyöhyketelaan. Suurimpana erona ovat SymCDS-telan syöttöputkien suurempi määrä.

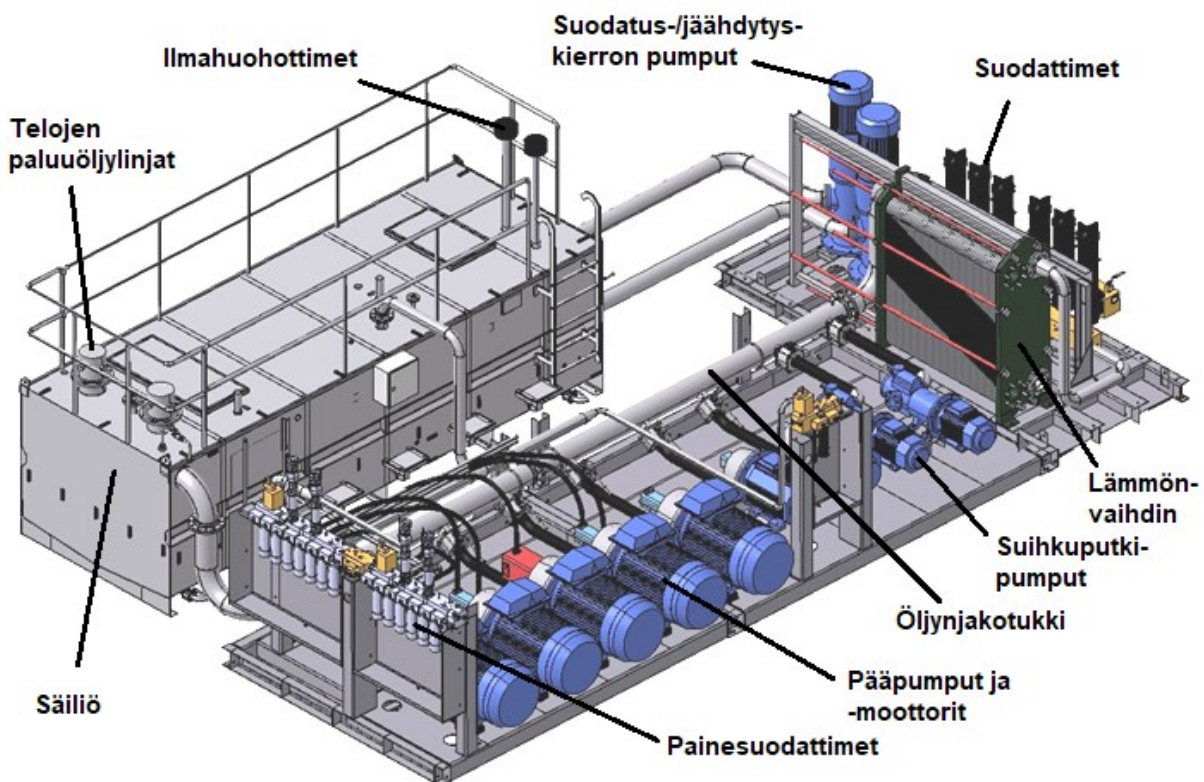


Kuvio 8. SymCDS-telan rakenne (Valmetin koulutusmateriaali 2021, muokattu)

6.2 Hydraulikkajärjestelmä

Telahydrauliikka eroaa tavallisesta teollisuushydrauliikasta varsin suuren mittakaavansa vuoksi, minkä takia monet hydraulikan standardit eivät täysin sovellu telahydrauliikkaan (Järvenpää 2022). Telojen lisäksi hydraulikkajärjestelmässä on lukuisia muitakin osia. Tässä luvussa käsitellään näiden eri osien tehtäviä.

Telahydrauliikan koneikot ovat Valmetin tapauksessa melko standardoitua ja modulaarisia (Järvenpää 2022). Osien kokoa skaalataan aina kuitenkin asiakaskohtaisen tarpeen mukaan (Järvenpää 2022). Kuvio 9 esittää tyypillisen koneikon rakenteen.



Kuvio 9. Hydraulikkoneikko (Valmetin koulutusmateriaali 2012, muokattu)

6.2.1 Säiliö

Kalanterille tyypilliset säiliökoot ovat 4–6 kuutiometriä, mutta leveällä kalanterilla, jossa on käytetty liukulaakereita voi koko olla jopa 16 kuutiometriä (Järvenpää 2022). Säiliön päätehtävänä on

säilyttää tarvittava määrä öljyä järjestelmässä. Sen lisäksi säiliössä tapahtuu ilman- ja vedenpoisto (Järvenpää 2022).

Säiliöön palaava öljy tulee ensin paluukammioon suodatinkorin läpi. Suodatinkorissa olevat nylonsukat ovat myös telan kunnonvalvonnan kannalta tärkeitä, koska niistä voidaan helposti havaita epäpuhtauksia. Paluukammioista öljy siirtyy itse säiliöön, jossa se virtaa seinämien välissä mahdollisimman hyvän sekoittumisen aikaansaamiseksi. Tällä tavoitellaan hyvää ilmanpoistoa. Säiliöstä öljy imetään ruuvipumpulla kohti suodattimia ja jäähdyttimiä. (Järvenpää 2022.)

6.2.2 Suodatus ja jäähdytys

Säiliön jälkeen tyypillisesti tulee suodatus. Suodatuksen tarkoituksena on erottaa öljystä epäpuhtauksia, ensin matalapaineisesti ja myöhemmin kierrossa korkeapaineisesti. Suodattimet voidaan vaihtaa ajon aikana. (Järvenpää 2022.)

Telan virtaustarve on riippuvainen viskositeetista. Öljyn lämpötilaa ja sitä kautta viskositeettia säädelään jäähdyttimellä, joka on tyypillisesti kustannustehokas ja pieneen tilaan menevä levylämmönvaihdin. Telahydrauliikassa jäähdytysteho on maksimissaan 1,5 MW luokkaa. Öljyn lämpötila jäähdyttimeltä poistuessa on tyypillisesti 40–45°C. (Järvenpää 2022.)

Lämmönvaihtimen mitoitusta varten tulee tietää siirrettävän lämpötehon määrä joko lämmitettävän tai jäähdytettävän ainevirran osalta sekä virtaavien aineiden lämpötilan muutos lämmönvaihtimessa. Lämmönvaihtimen siirtämä teho on verrannollinen lämmönsiirtimen pinta-alaan, lämmönläpäisykerroimeen sekä jäähtyvän ja lämmitettävän ainevirran väliseen lämpötilaeroon. Lämpöteho voidaan laskea kaavalla 16. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 202.)

$$\phi = k * A * \Delta T \quad (16)$$

missä ϕ = lämpöteho [W]

k = lämmönläpäisykerroin [W/m²K]

A = lämmönsiirtopinta-ala [m^2]

ΔT = lämpötilaero [K]

Lämmönvaihtimen tehokkuuden kuvaamiseen käytetään usein niin kutsuttua rekuperaatioastetta (kts. kaava 17). Rekuperaatioaste kuvastaa kuinka paljon lämpöä on mahdollista siirtää teoreettiseen maksimiarvoon verrattuna. Energiatehokkuus on lämmönvaihtimessa parhaillaan, kun aineiden lämpötilan muutos on mahdollisimman suuri. Virtausnopeuksien ollessa vakiot, lämmönsiirron tehokkuuteen vaikuttaa eniten lämmönsiirtopintojen puhtaus. (Energiatehokas lämmönsiirto 2016.)

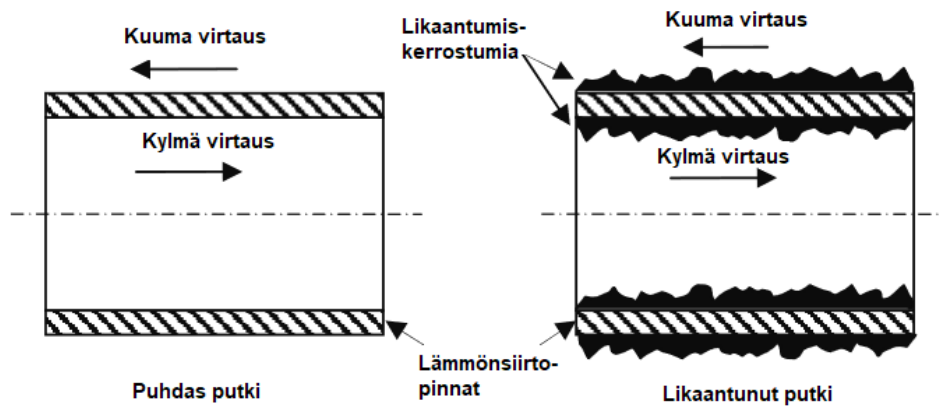
$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{max}}{\theta_0} \quad (17)$$

missä ε = rekuperaatioaste

ΔT_{max} = suurempi lämpenevän ja viilenevän virran lämpötilamuutoksista

θ_0 = suurimman ja pienimmän lämpötilan erotus

Jäähdytysaineena on tyypillisesti vesi. Usein jäähdytykseen käytettävä vesi tulee luonnonvesistöistä, jolloin tiheät lämmönvaihtimet ovat alttiita epäpuhtauksille ja sitä kautta tukkiintumiselle. Lämmönsiirtopinnoille muodostuvat epäpuhtaudet heikentävät lämmönvaihtimen tehoa (kts. kuvio 10). Luonnonvesiä käytettäessä jäähdytysteho voi vaihdella vuodenajan mukaan merkittävästikin. (Järvenpää 2022.)



Kuvio 10. Puhtaiden ja likaantuneiden putkien lämpövastukset (Awad 2011, 527, muokattu)

6.2.3 Pumput

Telojen hydraulikoneikoissa käytetään erilaisia pumppuja eri käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi öljyn esipaineistamiseen, telojen kuormittamiseen ja jäähdytykseen käytettäville suihkuputkille on omat pumppunsa. Käytettäviä pumppuja ovat esimerkiksi mäntä-, siipi- ja ruuvipumput.

Kalanterilla kuormittamiseen käytetään mäntäpumppua, joka säätyy virtaustarpeen mukaan. Mäntäpumppu pitää yllä vakioapainen. Rinnalla on edullisempia siipipumppuja, joita käytetään tarvittaessa mäntäpumpun lisänä. (Järvenpää 2022.)

Ruuvipumppuja käytetään matalapaineisina suodatus-/jäähdytyskierron syöttöpumppuina. Ruuvipumppulla paineistetaan öljyä kevyesti, jotta vapaana olevaa ilmaa saadaan liukenemaan. Tällä ehkäistään muun muassa tulevien pumppujen kavitointia. (Järvenpää 2022.)

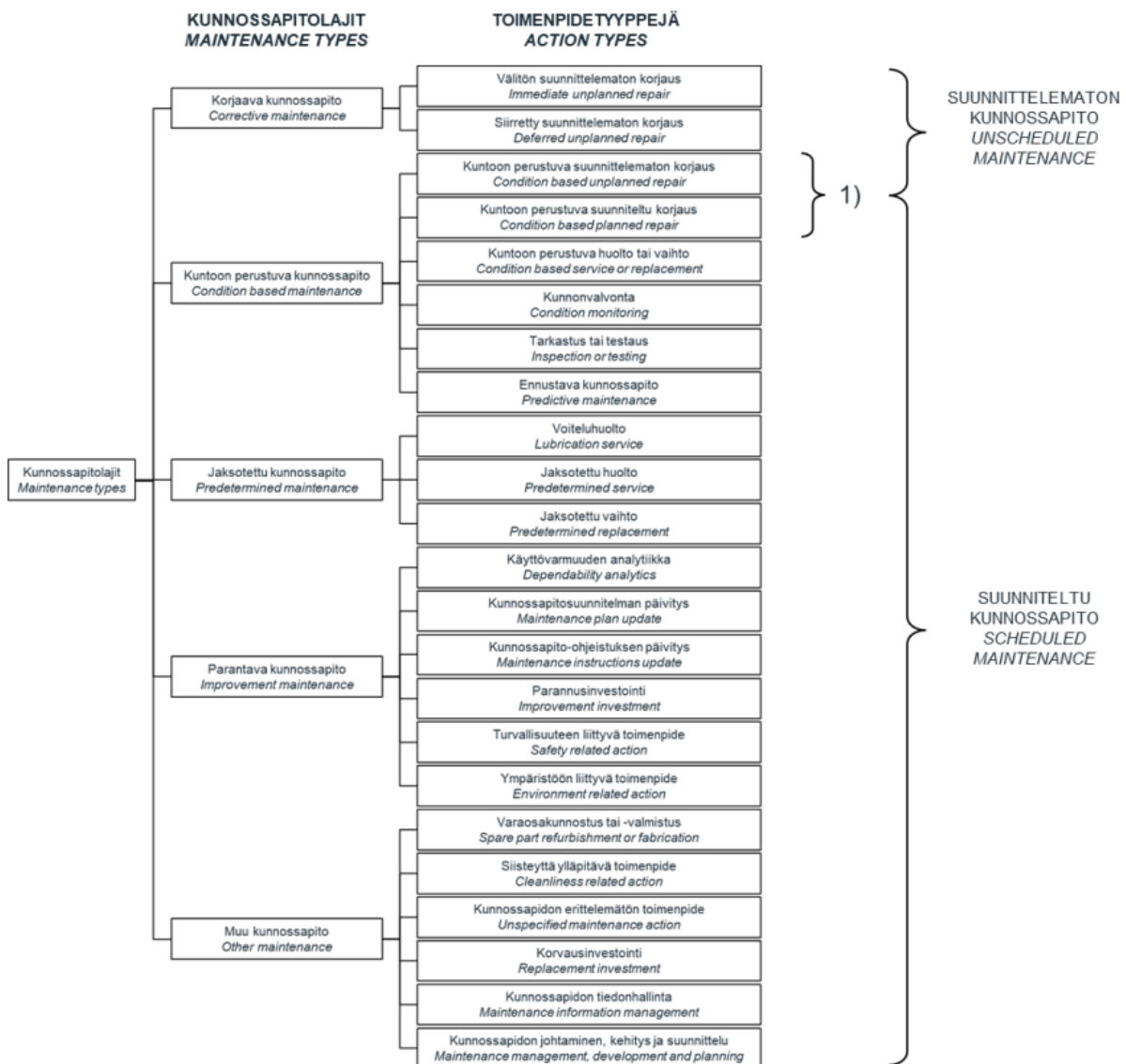
7 Kunnossapito

7.1 Kunnossapidon määritelmä

PSK-standardi määrittelee kunnossapidon olevan ”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 aikana”. (PSK 6201:2022, 3). SFS-standardi määrittelee kunnossapidon kattavan ” kaikki kohteen elinjakson aikaiset tekniset, hallinnolliset ja liikkeenjohdolliset toimenpiteet, joiden tarkoituksena on ylläpitää

tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon” (SFS-EN 13306:2017, 5). Vertaamalla näitä määritelmiä voidaan havaita niiden sisältävän käytännössä samat asiat.

Kunnossapito voidaan jakaa eri kunnossapitolajeihin. Jako voidaan suorittaa esimerkiksi toimenpidetyyppien ja sen mukaan, onko toimenpide suunniteltu vai suunnittelematon (PSK 6201:2022, 26). Kuvio 11 havainnollistaa kunnossapitolajien jakautumista.



Kuvio 11. Kunnossapitolajit (PSK 6201:2022, 26)

7.2 Öljyjen kunnonvalvonta

Hydraulijärjestelmissä öljyn kunnolla on suuri merkitys järjestelmän toimintaan. Siksi komponenttien kunnonvalvonnan lisäksi tulee tarkkailla myös öljyä. Öljyn kunto kertoo usein paljon komponenttien kunnosta, esimerkiksi öljyn seassa olevien hiukkasten kautta. Öljyn kunnonvalvonnalla pyritään pääosin tarkastelemaan järjestelmän kuntoa sekä öljyn itsensä kemiallista kuntoa (Öljyn kunnossapito 2018, 8).

Järjestelmän kuntoa selvitetessä öljystä analysoidaan esimerkiksi epäpuhtauksien laatua ja määrää (Öljyn kunnossapito 2018, 8). Esimerkiksi öljyn seassa olevat pallomaiset kappaleet voivat kertoa alkavasta laakeriviasta (Öljyn kunnossapito 2018, 8), kun taas esimerkiksi paperikoneen telan öljykierrosta löytyvät vaipan pinnoitteen kappaleet viestivät kulumisesta ja mahdollisesti vaihdon tarpeesta.

Öljyanalyysiin tarvittavan näytteenoton tavoista puhutaan joko nimillä on-line, in-line tai off-line. On-line tarkoittaa sitä, että näyte tuodaan mittalaitteeseen putken tai letkun kautta. In-line tarkoittaa sitä, että mittalaite sijaitsee suoraan esimerkiksi paluuöljyn putkessa. Off-line taas tarkoittaa perinteisempää erillisen näytteen ottamista esimerkiksi säiliöstä pulloon. Pullossa oleva näyte analysoidaan sitten joko kentällä tai laboratoriossa. On- ja in-line-näytteenotot ovat anturitekniologian kehityksen myötä yleistyneet. (Öljyn kunnossapito 2018, 9, 13.)

Öljynvaihtovälit vaihtelevat tehdaskohtaisesti ja vaihtoväleihin vaikuttaa isolta osin tehtaalla käytettävä öljyn kunnonvalvontamenettely. Joissain kohteissa vaihto tehdään aina säännöllisin väliajoin, kun taas toisissa vaihto perustuu analyysiin ja arvioihin. Esimerkiksi erään suomalaisen metsäteollisuusalan yrityksen tehtailla yleisesti öljyn vaihtovälit ovat 2–5 vuotta ja vaihto tehdään tarpeen mukaan. Pidemmällä öljynvaihtoväleillä saadaan aikaiseksi säästöjä öljykuluissa. (Öljyjen kunnossapito 2018, 110.)

7.3 Kunnossapidon ulkoistaminen

Perinteisesti kunnossapidon ostaminen on toteutettu työtuntien ja varaosien ostamisena. Usein ostopäätöksen tekemisen avainasia on edullinen hinta. Työtuntien hinnassa säästämällä on kuitenkin usein työn laadun kannalta heikentävä vaikutus. Pelkkiä työtunteja ja varaosia ostaessa

työn sisällön määrittely voi jäädä melko epämääräiseksi, jolloin työn suorittamisen jälkeen voi heittää vaikeasti selvitettäviä erimielisyyksiä lopputuloksesta. (Laine 2010, 171.)

Koko laitoksen kattavan kunnossapitopalvelun siirtäminen yksittäiselle sopimuskumppanille on viimeisten vuosikymmenten aikana Laineen (2010) mukaan merkittävästi yleistynyt tapa toteuttaa kunnossapito. Tällaisesta menettelystä käytetään nimeä kunnossapidon ulkoistaminen. Kunnossapitoa ulkoistettaessa ei kuitenkaan lähtökohtaisesti ulkoisteta kaikkia kunnossapitotoimenpiteitä, koska tämä vaatisi myös käyttötoimintojen ulkoistamista. Ulkoistussopimuksissa määritellään, mitkä toimenpiteet kuuluvat laitokselle ja mitkä sopimuskumppanille. (Laine 2010, 198.)

Toimivan ulkoistussopimuksen ja sitä kautta palvelusuhteen luominen vaatii myös ostajalta omaa osaamista kunnossapidosta. Ostajalta edellytetään esimerkiksi toimivaa kunnonvalvontaa, kattavia historiatietoja, toimivia huolto-ohjelmia ja tietoa työmääristä sekä tavoitteita kunnossapidon kehittämiseksi. Ostaja tarvitsee myös itse näitä tietoja tarjouspyyntöä laatiessa, jotta voi kriittisesti arvioida potentiaalisilta kumppaneilta saatuja tarjouksia. (Laine 2010, 198–199.)

Ulkoistaminen esimerkiksi laitevalmistajan tarjoamiin kunnossapitopalveluihin mahdollistaa myös vaativampien kunnossapitotoimien hankinnan. Esimerkiksi telahydrauliikan parannuksiin ei välttämättä tehtaan omalla kunnossapitohenkilöstöllä ole tarvittavaa osaamista. Vaikka tehtaan oma henkilöstö suorittaisikin osan kunnossapitotoimenpiteistä itse, todennäköisesti parannukset tilataan kuitenkin ulkoiselta toimijalta. Tällaiset parannukset on usein muotoiltu palveluntarjoajan toimesta tuotteiksi, joista ostajan on helppo valita itselleen sopivin. Kunnossapidon tuotteistamista käsitellään tarkemmin seuraavassa alaluvussa.

7.4 Kunnossapidon tuotteistaminen

Laineen (2010) mukaan Moisio (2005) kuvailee tuotteistamista asiakaslähtöiseksi palvelun määrittelyksi ja kehittämiseksi, tuotantovalmiuden luomiseksi ja markkinoille saattamiseksi siten, että asiakashyöty- ja tulostavoitteet saavutetaan. Palvelutuotteelle ominaisia piirteitä ovat Moisio (2005) mukaan esimerkiksi kiinteä hinta, vakioitu toteutus sekä ostamisen helppous (Laine 2010, 171).

Jaakkola (2022) nostaa globaalisti toimivan yrityksen palveluiden tuottamisessa olennaiseksi tekijäksi myös kohdeasiakasryhmän sijainnin maapallolla, liiketoimintapotentiaalin sekä osaavien resurssien määrän ja sijoittumisen asiakaskohteisiin nähden. Uutta palvelutuotetta asiakkaille tarjottaessa vaaditaan vähintään asiakashyödyt sekä referenssit esittelevää markkinointimateriaalia, hinnoitteluohje, toteutuksen ohje, asiakasraportoinnin pohjat sekä tarjouspohja, sisältäen teknisen erittelyn (Jaakkola 2022).

Palveluiden tuotteistamisen tärkeimpiä tavoitteita ovat Laineen (2010) mukaan:

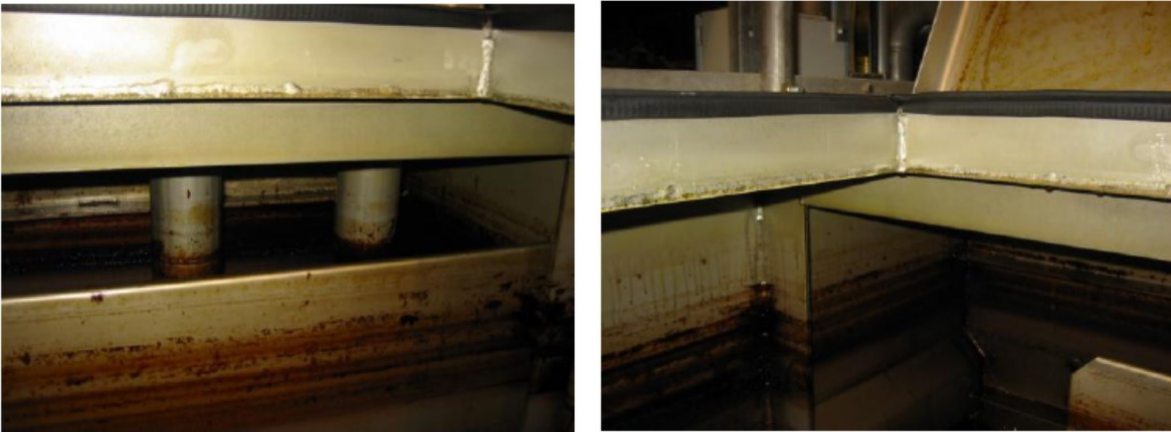
1. Palvelun sovittaminen asiakaskunnan tarpeisiin
2. Palvelun sisällön yksiselitteinen määrittäminen
3. Palvelun sisällön ja asiakashyötyjen konkretisointi yksikäsitteisesti ja ymmärrettävästi
4. Palvelun kannattava hinnoittelu
5. Palvelun laadun ja monistettavuuden parantaminen
6. Palvelun katteen nosto, tuotantokustannusten vähentäminen ja asiakastyytyväisyyden parantaminen
7. Palvelun modularisointi eli eri asiakastarpeisiin sovellettavuus uhraamatta tehokkuutta
8. Palvelun markkinoinnin, myytävyyden sekä ostettavuuden parantaminen

Kunnossapidon tuotteistamisesta on hyötyä sekä asiakkaalle että myyjälle. Asiakkaalle keskeisin hyöty on palvelun sisällön riippumattomuus palvelun suorittajasta. Myyjälle puolestaan keskeisimpänä hyötynä on kustannustehokkuus. Kustannustehokkuuteen vaikuttaa esimerkiksi se, että palvelua myytäessä sitä ei tarvitse suunnitella alusta asti uudelleen. (Laine 2010, 173-174.)

8 Öljyjen ongelmat

8.1 Lakkautuminen

Lakkautuminen johtuu öljyyn liuenneista epäpuhtauksista, jotka voivat olla seurauksia esimerkiksi hapettumisesta ja joista käytetään termiä ”pehmeät epäpuhtaudet” (Öljyn kunnossapito 2018, 71). Lakkautumisessa järjestelmän eri osien pinnoille muodostuu kellertävää tai ruskehtavaa hartesimaista pinnoitetta, joka tukkii välyksiä ja aiheuttaa haittaa osien toiminnalle (Öljyn kunnossapito 2018, 71). Kuviossa 12 näkyy hydraulijärjestelmän säiliön seinämille muodostunutta pinnoitetta.



Kuvio 12. Lakkautumista säiliön seinämällä (Valmetin koulutusmateriaali 2012)

Esiasteena lakkautumiselle on sakan muodostuminen. Sakkautumista aiheuttavat öljyn käyttölämpötilassa liuenneina olevat geeli- ja hartsityyppiset hapettumistuotteet sekä mikroskooppisen pienet, kiinteät sakkautumistuotteet. Näitä partikkeleita ei yleensä pysty havaitsemaan öljystä silmämääräisesti tutkimalla. Tästä syystä alkavaa lakkautumista ei välttämättä havaita. (Öljyn kunnossapito 2018, 71.)

Komponenttien pinnoille syntyvä lakka aiheuttaa kitkan nousua sekä mahdollisia tukkeutumisia esimerkiksi toimilaitteissa. Esimerkiksi laakerin toimintalämpötila voi nousta huomattavastikin lakkautumisen aiheuttaman kitkan kasvun myötä, sekä ohjauksessa voi tulla toimintahäiriöitä tukkeutuneiden tai jumiutuneiden toimilaitteiden myötä. Jäähdyttimissä lakkautuminen aiheuttaa jäähdytystehon laskua lämmönsiirtopintojen likaantumisen myötä. Lakkautuminen voi myös lyhentää suodattimien vaihtoväliä. (Öljyn kunnossapito 2018, 71.)

Juurisyynä öljyn lakkautumisella voidaan pitää öljyn vanhenemista ja öljyssä olevien partikkeleiden hapettumista. Ilmiö ei ole sinänsä uusi, mutta uudenaikaisissa öljyissä vanheneminen on tullut esille uudella tavalla. Moniin nykyisin käytössä olevat öljyihin lisätään lisäaineita, jotka eivät sisällä myrkyjä, karsinogeneja tai raskasmetalleja, eivätkä muodosta palaessaan jätettä. (Öljyn kunnossapito 2018, 72.)

Uudenlaiset öljyt saavat aikaan perusöljyn, joka sisältää aikaisemmin käytettyjä öljyjä vähemmän polaarisia hiilivetyjä. Polaariset aineet liuottavat parhaiten polaarisia aineita. Lakkautumistuotteiden ollessa polaarisia aineita tästä seuraa se, että uudenlaiset öljyt eivät liuota lakkautumistuotteita yhtä hyvin kuin perinteiset öljyt. Tällöin osa lakkamaisista aineista ei liukene, vaan alkavat kertyä järjestelmään. (Öljyn kunnossapito 2018, 72.)

Lakkautuminen voidaan havaita paremmin laboratorio-oloissa kuin prosessista otettavalla on-line-mittauksella. Tähän vaikuttaa isolta osin lämpötila, koska lämpötilan nousu parantaa lakkapartikkelien liukenemistä öljyyn. Näytteen jäähtyessä liukenemisraja ylittyy, jolloin lakkapartikkelit voidaan havaita paremmin. Eräs tapa havaita lakkautumista onkin tarkastella öljyä kahdessa eri lämpötilassa. Mikäli korkeammassa lämpötilassa huomataan suuresti enemmän pieniä hiukkasia, on se todennäköinen merkki lakkautumistuotteista. (Öljyn kunnossapito 2018, 73.)

Lakkautumista voidaan havaita myös MPC-määrittystestillä, joka on yksinkertainen laboratorio-oloissa suoritettava koe. Testissä sekoitetaan vakioitu määrä öljyä ja liuotinta, jonka jälkeen seos vedetään alipaineella tiheän verkon läpi. Tämän jälkeen analysoidaan väriä sekä verrataan sitä uuteen öljyyn. (Öljyn kunnossapito 2018, 49.)

Säännöllinen öljyn kunnonvalvonta on tärkeää lakkautumisen kriittisten vaikutusten ennaltaehkäisemiseksi. Järjestelmän lämpötilaa on myös hyvä tarkkailla, jolloin korkeista lämpötiloista voidaan havaita esimerkiksi likaantunut jäähdytin tai kohonnut laakerikitka. Öljyssä oleva ilma ja vesi edistävät lakkautumista, joten niiden riittävästä poistosta tulee myös huolehtia. (Öljyn kunnossapito 2018, 74.)

8.2 Vaahtoutuminen

Hydraulijärjestelmässä olevan ilman aiheuttamia ongelmia ja ilman erottumista yleisellä tasolla on käsitelty aikaisemmin luvussa 5.2.3. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin öljyn vaahtoutumista ilmiönä telahydrauliikan kannalta. Vaahtoutuminen ja vapaa ilma öljyssä ovat edelleen asiakkaita askarruttava asia (Järvenpää 2022).

Ilmanerotuskyky on perusöljystä itsestään riippuva ominaisuus, kun taas vaahtoutumista pyritään estämään lisäaineilla. Vaahtoamisenestoaineet kuluvat ajan myötä, joten niitä joudutaan välillä

lisäämään. Lisäyksiä tehdessä tulisi pohtia, onko vaahton lisääntyminen seurausta vaahtoamisenestoaineen kulumisesta vai huonosta ilmanerottumisesta. (Öljyn kunnossapito 2018, 83).

Monesti ”ilmaa öljyssä” on ensimmäinen diagnoosi myös vaahtoutumisongelmiin. Kuviossa 13 näkyy öljysäiliön pinnalla oleva vaahtokerros. Verrattaessa kuvion 14 tilanteeseen voidaan havaita, että parannuksilla vaahto on saatu suurimmaksi osaksi häviämään. Molemmissa tilanteissa vapaan ilman määrä on sama. (Valmetin koulutusmateriaali 2012.)



Kuvio 13. Vaahtokerros öljysäiliössä (Valmetin koulutusmateriaali 2012)



Kuvio 14. Vaahtoutumistilanne parannusten jälkeen (Valmetin koulutusmateriaali 2012)

Järvenpään (2022) mukaan telan vaipan sisälle kertyvä öljy on vaipan pyörimisen vuoksi voimakkaassa liikkeessä. Liike saa aikaiseksi öljyn pisaroitumisen ja ilman sekoittumisen öljyyn, joka muodostaa telan sisälle vaahtoa (Järvenpää 2022). Säiliöön palatessa tällainen öljy voinee aiheuttaa myös vaahton muodostumista. Kuviossa 15 voidaan nähdä öljyn liikehdintää vaipan sisällä.



Kuvio 15. Öljyä vaipan sisällä (Valmetin koulutusmateriaali 2012)

9 Toteutus

9.1 Haastattelut

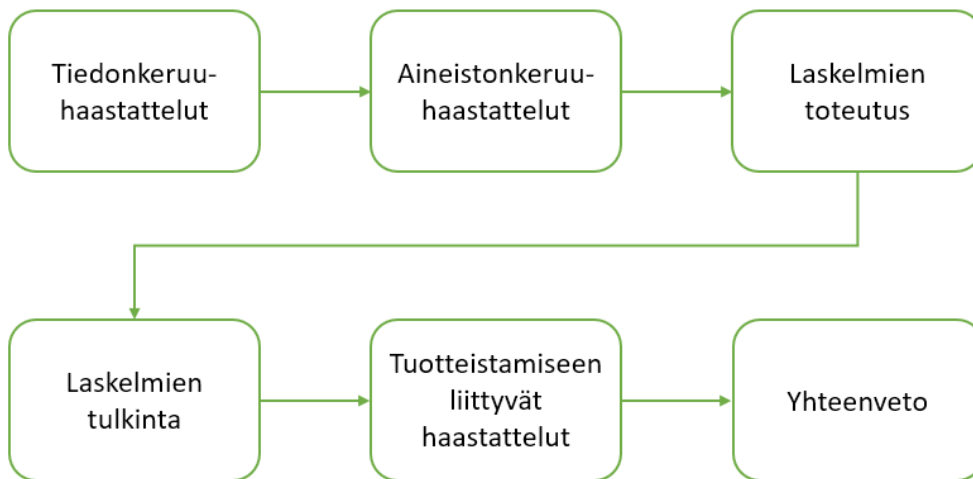
Tutkimuksen aikana suoritettiin useita teemahaastatteluita. Haastateltavina oli toimeksiantajan asiantuntijahenkilöstöä eri aloilta, esimerkiksi hydraulikkasuunnittelusta ja kenttähuollosta. Teemahaastatteluiden tarkoituksena oli kerätä tietoa mahdollisimman monesta eri näkökulmasta liit-tyen viskositeettimuutoksen tuomiin hyötyihin ja haittoihin sekä eri öljylaatujen käyttöön telahyd-rauliikassa. Haastattelut tallennettiin, jotta niihin palaaminen oli mahdollista tulosten analysointivaiheessa. Haastatteluista laadittiin muistiinpanoja haastattelun aikana sekä tallentei-den perusteella täydentävästi jälkeinpäin.

Eryteisesti tutkimuksen alkuvaiheessa haastattelut toimivat myös tiedonkeruuna ja haastatteluista saatua tietoa käytettiin opinnäytetyön tietoperustan laatimiseen. Kirjallisuuslähteitä kaikista opin-näytetyön kannalta oleellisista aiheista ei ollut tarjolla, joten toimeksiantajan henkilöstön jakama tieto oli erittäin tärkeää aiheen ymmärtämiselle. Alkuvaiheen perusasioiden läpikäynnin jälkeen voitiin siirtyä aiheiden syvällisempään käsittelyyn sekä suorittaa varsinaista aineistonkeruuta.

Haastatteluille ei ollut etukäteen laadittuja runkoja lukuun ottamatta ennalta suunniteltuja kysy-myksiä. Usein haastattelussa oli mukana toimeksiantajan materiaalia, jonka pohjalta esitettiin haastateltaville kysymyksiä niiden noustessa esille. Haastattelutilanteet olivat siis melko vapaa-muotoisia, eikä aina alussa voinut tietää mitä asioita loppujen lopuksi kysytään. Aineistoa kerättiin myös esimerkiksi sähköpostitse. Alle on listattu joitain esimerkkejä haastattelutilanteissa esite-tyistä kysymyksistä.

- Mitkä osat telan hydraulikassa kuluttavat eniten energiaa?
- Vaikuttaako öljyn viskositeetti vaadittavaan pumppaustehoon?
- Millaisia vaikutuksia viskositeetilla on telan käyttöön?
- Saadaanko viskositeetin alentamisella samanlaisia hyötyjä kuin puristinosalla?
- Mitkä ovat kalanterin tapauksessa viskositeetin alentamista rajoittavia tekijöitä?
- Millaisia ongelmia asiakkailta tyypillisesti on öljyjen kannalta? Voitaisiinko näihin vastata viskositeetin alentamisella?
- Millaiset kohteet hyötyisivät viskositeetin alentamisesta eniten? Mitä asioita tulee huomi-oida esimerkkitapauksia valittaessa?
- Mitkä asiat vaikuttavat asiakkaiden kiinnostukseen parantaa energiatehokkuutta? Ovatko ne ympäristöasiat, rahalliset säästöt, ajettavuuden parantaminen vai joku muu?

Laadulliselle tutkimukselle tyypilliseen tapaan aineistonkeruuta suoritettiin pitkälti koko tutkimuksen ajan. Myöhemmässä vaiheessa kerätty tieto auttoi analysoimaan aikaisemmin kerättyä, josta seurasi jossain määrin syklinen eteneminen. Kuvio 16 havainnollistaa karkeasti eri aineistonkeruu- vaiheiden suorittamisen järjestystä. Aineistonkeruuhaastatteluja suoritettiin kuitenkin myös laskelmien välissä ja niiden jälkeen.



Kuvio 16. Tutkimuksen vaiheiden järjestys

9.2 Esimerkkikohteiden valikointi

Laskelmien tekemistä varten tutkimuksessa valittiin kaksi oikeaa toimeksiantajan asiakasta toimimaan esimerkkikohteina. Esimerkkikohteet etsittiin toimeksiantajan asiakastietojärjestelmistä tuoduista listoista. Kohteiden valitsemiseen vaikuttavia tekijöitä olivat esimerkiksi ajonopeus, käyttöönottovuosi sekä telan laakeroinnin tyyppi.

Ajonopeuden kannalta pyrittiin valitsemaan kohteita, joiden ajonopeus oli yli 1200 m/min. Viskositeetin alentamisella on nopeilla koneilla suurempi vaikutus energiankulutukseen kuin hitaammilla. Alle 1000 m/min ajonopeudella toimivat koneet rajattiin kokonaan pois, koska niiden tapauksissa viskositeetin alennuksen tuoman energiansäästön oletettiin olevan niin pieni, ettei se kiinnostaisi asiakkaita.

Paperikoneilla käytettyjen öljyjen viskositeettia on madallettu vuosien mittaan. Tämän vuoksi kohteita valitessa rajattiin uusimmat, vuoden 2016 jälkeen käyttöönotetut kohteet pois. Näissä kohteissa on ollut jo käyttöönotosta alkaen ISO VG 68-luokan öljyt käytössä, joten madalluspotentiaalia ei enää ole. Aikaisemmin käyttöönotetuilla koneilla sen sijaan on ollut tyypistä riippuen ISO VG 100-220 -öljyt, useimmiten ISO VG 150. Tällaisilla kohteilla katsottiin olevan potentiaalia madaltaa viskositeettia. Viskositeetin ollessa erittäin voimakkaasti lämpötilasta riippuvainen ominaisuus, jouduttiin myös korkeammilla käyttölämpötiloilla toimivat hardkalanterit rajaamaan pois.

Esimerkkikohteiksi valikoitiin ensisijaisesti kohteita, joiden teloissa oli käytössä perinteinen rullaakerointi. Liukulaakeroiduilla teloilla viskositeettimuutoksen tekeminen on käytännössä haastavampaa, joten niitä ei haluttu ottaa tässä opinnäytetyössä esimerkkitapauksiksi. Muutoksen ei katsottu kuitenkaan olevan liian hankala toteutettavaksi, joten markkinapotentiaalin selvitystä tehtäessä ne laskettiin mukaan. Liukulaakerointia käytetään useimmiten nopeilla koneilla, joten se rajasi muuten potentiaalisia kohteita pois.

Toimeksiantajalla on asennettua laitekantaa ympäri maailmaa. Maantieteellisellä sijainnilla ei katsottu kuitenkaan olevan vaikutusta kohteiden valintaan, vaan valinta tehtiin aiemmin käsiteltyjen teknisten tekijöiden perusteella. Valittujen esimerkkitapausten oli tarkoitus olla kohteita, joihin myös todellisuudessa voitaisiin tarjota opinnäytetyön käsittelemiä palveluita. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään tarkemmin valikoitujen kohteiden tietoja.

9.2.1 Esimerkkikohte A

Tehtaalla on paperilinjassa oleva softkalanteri. Nippejä on kaksi, joissa molemmissa on käytössä Valmetin taipumakompensoidut monivyöhykesäädettävät SymCD-telat. Viskositeetin alentamisen vaatimat rakenteelliset muutokset pitää tehdä kaikille tarkasteltavissa positioissa käytettäville teloille, joten myös varatelojen määrällä on merkitystä. Taulukossa 5 on esitetty myös muuten A tietoa.

Taulukko 5. Esimerkkikohteen A lähtötietoja

Ominaisuus	Arvo
Konsepti	Softkalanteri
Ajonopeus	1500 m/min
Viivakuorma	200 kN/m
Käyttöönottovuosi	1998
Nippiluku	2
Telatyyppi	SymCD
Telojen lukumäärä	4
Joista varateloja	2
Telan laakerointi	Rullalaakeri
Alue	Aasia-Tyynimeri

Laskelmien suorituksen kannalta oleellisia tietoja olivat kalanterin ominaisuuksien lisäksi öljyn ominaisuudet. Laskennassa käytettiin öljyn viskositeettiarvoa sekä öljyn maksimisisäänmeno- ja ulostulolämpötiloja. Taulukossa 6 on listattu öljyn ominaisuudet ennen viskositeettialennusta ja sen jälkeen. Öljyn lämpötilat perustuvat telan pinnoitteen kestävyys. Käyttöönoton jälkeen on havaittu, että pinnoitteet kestävät aluksi ajateltua suurempia lämpötiloja, joten ulostulolämpötilaa on voitu nostaa.

Taulukko 6. Esimerkkikohteen A öljyn arvot

	Alkuperäiset	Muutoksen jälkeen
Viskositeettiluokka	ISO VG 150	ISO VG 68
Öljyn sisäänmenolämpötila (maks.)	40°C	45°C
Öljyn ulostulolämpötila (maks.)	60°C	75°C
Lämpötilaero	20°C	30°C

9.2.2 Esimerkkikohte B

Esimerkkikohteen A tavoin tälläkin tehtaalla on paperilinjassa oleva softkalanteri. Nippejä on myös kaksi, joissa on Valmetin taipumakompensoidut monivyöhykesäädettävät SymCD-telat. Taulukossa 7 on esitetty kohteen B tietoja.

Taulukko 7. Esimerkkikohteen B lähtötietoja

Ominaisuus	Arvo
Konsepti	Softkalanteri
Ajonopeus	1800 m/min
Viivakuorma	200 kN/m
Käyttöönottovuosi	1999
Nippiluku	2
Telatyyppi	SymCD
Telojen lukumäärä	3
Joista varateloja	1
Telan laakerointi	Rullalaakeri
Alue	Kiina

Öljyn lähtötietotaulukkoa (ks. taulukko 8) tarkastelemalla voidaan huomata, että kohteen B öljyn lähtötiedot poikkeavat hieman A:n lähtötiedoista. Öljyn sisään- ja ulostulolämpötilat olivat 5°C korkeammat, mutta ero oli yhtä suuri. Tässäkin kohteessa viskositeettimuutoksen yhteydessä lämpötilat voitaisiin nostaa korkeammaksi.

Taulukko 8. Esimerkkikohteen B öljyn arvot

	Alkuperäiset	Muutoksen jälkeen
Viskositeettiluokka	ISO VG 150	ISO VG 68
Öljyn sisäänmenolämpötila (maks.)	45°C	45°C
Öljyn ulostulolämpötila (maks.)	65°C	75°C
Lämpötilaero	20°C	30°C

9.3 Laskelmat

Kohteiden valitsemisen jälkeen siirryttiin toteuttamaan laskelmat. Laskelmat tehtiin toimeksiantajan kehittämällä Microsoft Excel-pohjaisella laskentaohjelmalla, jota käytetään telojen hydraulikkaan ja lujuuksiin liittyviä arvoja. Lujuustarkastelu jätettiin pois, koska se ei liittynyt tutkimuksessa selvitettäviin asioihin. Toimeksiantajan työntekijä perehdytti ohjelman käyttöön, sekä varmisti että

laskelmat tehdään oikein. Laskelmiin tarvittavat telakohtaiset mitat kerättiin toimeksiantajan asiakastietojärjestelmästä ja alkuperäiset suunnittelutiedot kerättiin Rautpohjan toimipisteen arkistoista. Laskelmiin vaadittavia lähtötietoja olivat esimerkiksi:

- Konsepti
- Viiran leveys
- Telan halkaisija
- Kuormituselementtien määrä
- Vastavyöhykkeiden määrä
- Viskositeetti
- Kapillaariputkien pituus ja halkaisija
- Öljyn suunnittelusisäänmeno- ja -ulostulolämpötilat.

Kustakin kohteesta suoritettiin laskelmat ensin alkuperäisistä suunnittelu- ja käyttöönottodokumenteista saaduilla lähtötiedoilla (ks. liitteet 2 ja 4), jonka jälkeen parametreja muutettiin vastaamaan viskositeettimuutoksen jälkeisiä arvoja (ks. liitteet 3 ja 5). Uusilla arvoilla laskettuja tuloksia verrattiin alkuperäisillä laskettuihin ja niiden perusteella tehtiin johtopäätökset energiansäästöjen suuruudesta ja virtauksien muutoksista. Laskelmat lähetettiin sitten tarkastettavaksi hydrauliiikkasuunnittelijalle, joka arvioi järjestelmän nykyisen kapasiteetin riittävyyden esimerkiksi pumppaus-tehon osalta.

Alkuperäisillä arvoilla laskettuja arvoja ei pidetty täysin totuudenmukaisina, koska ohjelmaan ei ollut eritelty jokaista viskositeettiluokkaa erikseen, vaan esimerkiksi ISO VG 150-laskelmissa laskenta perustui ISO VG 100-arvoihin. Toimeksiantajan suunnittelijan aikaisempiin laskelmiin perustuen voitiin todeta, että viskositeettia alennettaessa säästöt menevät tarkastelualueella lineaarisesti. ISO VG 150-luokasta siirryttäessä ISO VG 100-luokkaan saadaan siis melko tarkasti sama säästö kuin ISO VG 100-luokasta luokkaan ISO VG 68 siirryttäessä. Näin ollen opinnäytetyössä ISO VG 150 luokasta ISO VG 68-luokkaan siirtyminen on huomioitu kaksinkertaistamalla laskentaohjelmista saadut tulokset.

Laskentaohjelmasta saatujen tulosten perusteella laskettiin telakohtaiset energiansäästöjen suuruudet sekä virtausten muutokset ja arvioitiin niiden vaikutukset järjestelmän toimintaan. Telan sisäisen tehonkulutuksen osalta säästölle voitiin laskea myös rahallinen määrä. Säästön laskemi-

seen käytettiin arvioita keskimääräisistä käyttötunneista vuoden aikana ja arviota alueellisesta teollisuussähkön hinnasta. Vuoden käyttötunneiksi arvioitiin 8000 h ja sähkön hinnaksi 0,10 €/kWh. Kokonaissästöt saatiin kertomalla laskentaohjelman tuloksiin perustuvat telakohtaiset säästöt nippien lukumäärällä (ks. kaava 18).

$$\text{Kokonaissästö} = \Delta P * \text{käyttötunnit} * \text{sähkön hinta} * \text{nippien lukum.} \quad (18)$$

missä ΔP = telan sisäisen tehonkulutuksen muutos siirryttäessä ISO VG 150 -> 68

Takaisinmaksuajan laskenta perustui toimeksiantajan arvioon palvelun kustannuksista sekä kohteessa olevien huollettavien telojen lukumäärään. Arvioitu kustannus asiakkaalle olisi noin 5000 € telaa kohden. Hinta sisältää suunnittelun, vaihdettavat osat sekä työn. Viskositeettimuutos suoritettaisiin aina lisäpalveluna telahuollon yhteydessä, mutta viskositeettimuutoksen takaisinmaksuajan laskemisessa päätettiin jättää telahuollon hinta pois. Tällöin takaisinmaksuaika kuvaa paremmin viskositeettimuutoksen asiakkaalle tuomaa säästöä. Takaisinmaksuaika laskettiin kaavan 19 mukaisesti.

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{\frac{\text{Kustannus}}{\text{tela}} * \text{huollettavien telojen lukum.}}{\text{Kokonaissästö}} \quad (19)$$

9.3.1 Esimerkkikohte A

Taulukon 6 mukaisesti kohteelle A suunniteltu viskositeetin alennus olisi kaksi porrasta, eli luokasta ISO VG 150 luokkaan 68. Telojen pinnoitteiden vuoksi laadittujen suosituslämpötilojen muutoksen vuoksi myös öljyn sisäänmeno- ja ulostulolämpötiloja voitaisiin nostaa. Sisäänmenolämpötila voitaisiin nostaa arvosta 40°C arvoon 45°C. Ulostulolämpötila voitaisiin nostaa arvosta 60°C arvoon 75°C.

Taulukossa 9 on esitetty laskentaohjelman tuottamat tulokset ISO VG 100- sekä ISO VG 68-öljyillä. ISO VG 100-laskennassa käytettiin telatiedoista kerättyjä suutinten mittoja. ISO VG 68-laskennassa käytettiin puolestaan huoltotoimenpiteen yhteydessä vaihdettavien suutinten mittoja. Suutinten vaihdolla pyritään pitämään virtaukset sellaisina, että nykyinen pumppauskapasiteetti riittäisi. Virtausten muutoksia käsitellään luvussa 10.

Taulukko 9. Esimerkkikohteen A laskennan tulokset

Viskositeetti luokka	ISO VG 100		ISO VG 68		ISO VG 100 -> 68		ISO VG 150 -> 68	
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.
Viivakuorma								
Hydr. jäähdytystehon tarve (kW)	XX	XX	XX	XX	-6 %	-5 %	-13 %	-11 %
Kuormitus + vastavyöhykkeet (l/min)	XX	XX	XX	XX	131 %	131 %	261 %	261 %
Suihkuputket (l/min)	XX	XX	XX	XX	-77 %	-80 %	-154 %	-160 %
Kokonaisvirtaus (l/min)	XX	XX	XX	XX	-1 %	-8 %	-1 %	-16 %
Telan sisäinen tehonkulutus (kW)	XX		XX		-5 %		-10 %	

Taulukosta 9 nähdään, että telan sisäinen tehonkulutus pieneni yhden viskositeettiportaasta alaspäin siirryttäessä noin 5 %, joka tarkoittaa 12 kW säästöä. Kahdella portaalla tämä tarkoittaa noin 10 %, joka on noin 24 kW. Kalanternin ollessa kaksinippinen, saadaan kaavan 18 mukaisesti kokonaissäästöksi:

$$24 \text{ kW} * 8000 \text{ h} * 0,10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 2 = \mathbf{38\ 400 \text{ €}}$$

Kalanterilla on kerralla käytössä kaksi telaa, jonka lisäksi on kaksi varatela. Myös varateloille tulee tehdä viskositeetin alentamisen vaatimat toimenpiteet. Näin takaisinmaksuajaksi kohteelle A saadaan laskettua kaavan 19 mukaisesti:

$$\frac{5000 \text{ €} * 4}{38\ 400 \text{ €}} = 0,52 \approx \frac{1}{2} \text{ vuotta}$$

9.3.2 Esimerkkikohte B

Esimerkkikohteelle B suunniteltiin viskositeetin alentamista kohteen A tavoin kahdella portaalla. Öljyn alkuperäinen suunniteltu sisäänmenolämpötila oli taulukon 8 mukaisesti 45 °C ja ulostulolämpötila 65 °C. Tässäkin kohteessa olisi mahdollista nostaa ulostulolämpötilaa 75 °C asti aiheuttamatta pinnoitteille haittaa.

Taulukossa 10 on esitetty laskentaohjelman tuottamat tulokset ISO VG 100- sekä ISO VG 68-öljyllä. Esimerkkikohteen A laskennan tavoin myös B:ssä käytettiin telatiedoista kerättyjä suutinten

mittoja, jotka vaihdettiin ISO VG 68-arvoilla laskettaessa muutosta vastaaviin. Virtausten muutoksia käsitellään luvussa 10.

Taulukko 10. Esimerkkikohteen B laskennan tulokset

Viskositeettiluokka	ISO VG 100		ISO VG 68		ISO VG 100 -> 68		ISO VG 150 -> 68	
	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.
Viivakuorma								
Hydr. jäähdytystehon tarve (kW)	XX	XX	XX	XX	-6 %	-5 %	-12 %	-10 %
Kuormitus + vastavyöhykkeet (l/min)	XX	XX	XX	XX	66 %	66 %	133 %	133 %
Suihkuputket (l/min)	XX	XX	XX	XX	-71 %	-76 %	-143 %	-152 %
Kokonaisvirtaus (l/min)	XX	XX	XX	XX	-15 %	-22 %	-30 %	-44 %
Telan sisäinen tehonkulutus (kW)	XX		XX		-5 %		-10 %	

Taulukosta 10 nähdään, että tässäkin tapauksessa telan sisäinen tehonkulutus laski viskositeettiportaasta laskun myötä noin 5 %, eli 11 kW. Kahden viskositeettiportaasta tapauksessa muutos on noin 10 %, eli 22 kW. Kalanterin ollessa kaksinippinen, saadaan kokonaissästöksi:

$$22 \text{ kW} * 8000 \text{ h} * 0,10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 2 = 35\,200 \text{ €}$$

Kalanterilla on kerralla käytössä kohteen A tavoin kaksi telaa, mutta varateloja on vain yksi. Tästä seuraa yhden telan hinnan verran alhaisempi investointihinta. Takaisinmaksuajaksi kohteelle B saadaan:

$$\frac{5000 \text{ €} * 3}{35\,200 \text{ €}} = 0,42 < \frac{1}{2} \text{ vuotta}$$

9.4 Markkinapotentiaalin ja muiden asiakashyötyjen kartoittaminen

Opinnäytetyön tarkoituksena oli myös kartoittaa kalanterin teloille tehtävän viskositeettimuutoksen markkinapotentiaalia. Tämä suoritettiin käytännössä analysoimalla toimeksiantajan asiakastietojärjestelmästä löytyviä tietoja. Tiedot vietiin Microsoft Exceliin, jossa niitä oli helpompi suodattaa ja visualisoida.

Esimerkkikohteiden valintaan verrattuna markkinapotentiaalin kartoittamisen kriteerit eivät olleet yhtä tiukat. Esimerkiksi ajonopeuden osalta tarkasteluun sisällytettiin kaikki yli 1000 m/min nopeudella toimivat koneet. Suunnitteluvuoden osalta tarkasteluun sisällytettiin kaikki ennen vuotta 2016 suunnitellut koneet, koska uudemmat ovat jo valmiiksi suunniteltu ISO VG 68-öljyille. Tarkasteluun sisällytettiin vyöhykesäädettävien telojen lisäksi myös uivat telat.

Asiakastietojärjestelmästä Exceliin tuodut tiedot järjesteltiin myyntialueittain. Kullekin myyntialueelle tehtiin myös tarkempi järjestely, jossa eriteltiin kunkin myyntialueen telakanta telatyypeittäin. Tiedot visualisoitiin kaavioilla, joita voidaan käyttää esimerkiksi markkinointimateriaalissa. Potentiaalisten asiakkaiden määrän kartoittamisen lisäksi tutkittiin, voidaanko viskositeetin alentamisella saavuttaa energiansäästön lisäksi muita asiakashyötyjä. Asiakashyötyjä etsiessä tarkasteltiin esimerkiksi viskositeetin alentamisen mahdollista vaikutusta lakkautumisongelmiin (ks. luku 8.1).

10 Tulokset

Laskentaohjelman tulosten perusteella todettiin, että viskositeettia alentamalla saadaan aikaiseksi energiansäästöä kalanterin telahydrauliikassa. Energiansäästöä saadaan telan sisäisen tehonkulutuksen eli pyörittämiseen vaadittavan energian vähenemisestä, joka vähentää pyörittämiseen käytettävän sähkömoottorin tehontarvetta. Matalamman viskositeetin omaava hydraulineeste aiheuttaa vähemmän kitkaa vaipan ja öljyfilmin välille, jolloin sähkömoottorin tehonkulutus pienenee.

Viskositeetin alentamisella saadaan myös pienennettyä nipin hydraulista jäähdytystehontarvetta sekä tehostettua öljyn jäähdytykseen käytettävän lämmönvaihtimen toimintaa. Matalamman viskositeetin omaava öljy sitoo ja luovuttaa tehokkaammin lämpöenergiaa verrattuna korkeamman viskositeetin öljyyn. Nostamalla öljyn sallittuja sisäänmeno- ja ulostulolämpötiloja saadaan pienennettyä öljyn jäähdyttämiseen käytettäviä suihkuputkivirtauksia, jolloin jäähdyttimen läpi kulkeva virtaus saadaan myös pienemmäksi. Lämmönvaihtimen tehontarpeen laskiessa tarvitaan vähemmän jäähdytysvettä, joka parantaa tehtaan resurssitehokkuutta.

Energiansäästön lisäksi viskositeettimuutoksella todettiin olevan mahdollisesti myös muita asiakashyötyjä. Viskositeetin alentaminen parantaa ilmanerottumista (ks. luku 5.2.3). Tehokkaamman

ilmanerottumisen myötä öljyn hapettumista aiheuttava happi pääsee paremmin poistumaan öljystä. Hapettumisen väheneminen voisi vaikuttaa ennaltaehkäisevästi esimerkiksi lakan muodostumiseen järjestelmässä. Hapettumisen ollessa yksi merkittävästi hydrauliöljyn kuntoon vaikuttava tekijä, voi siihen ehkäisevästi vaikuttaminen pidentää öljyn elinikää.

Tarkastelemalla taulukoita 9 ja 10 voidaan havaita, että viskositeetin alentaminen nostaisi kuormituksen ja vastavyöhykkeiden virtauksia. Yhden viskositeettiportaan alentaminen nostaisi kohteella A vyöhykevirtauksia yli kaksinkertaisiksi. Suihkuputkivirtaukset putoaisivat kuitenkin kohteen A osalta maksimiviivakuormalla ajettaessa noin viidennekseen, jolloin kokonaisvirtaus pienenesi noin 8 %. Vertaamalla laskelmien tuloksia kohteessa oleviin pumppuihin todettiin niiden olevan kuormituksen osalta riittävät ISO VG 68-viskositeettiin siirtymisen myötä muuttuville virtauksille. Suihkuputkipumppujen kapasiteetti katsottiin myös riittäväksi ja säätö voitaisiin toteuttaa ohjelmallisesti. Suihkuputkien virtausten merkittävän pienenemisen myötä suihkuputkipumppu olisi mahdollista vaihtaa pienempituottoiseen. Tämä yksinkertaistaisi järjestelmää sekä voisi tuoda pumppauksen vaatiman tehon vähenemisen myötä energiansäästöä.

Kohteen B osalta tulokset ovat samansuuntaisia kuin A:lla. Vyöhykevirtaukset kasvaisivat noin 66 %, joka on kuitenkin kohteen A vyöhykevirtausten yli kaksinkertaistumiseen verrattuna maltillinen nousu. Suihkuputkivirtaukset putoaisivat maksimiviivakuormalla noin neljännekseen, jonka ansiosta kokonaisvirtaus pienenesi noin 22 %. Kohteen B olemassa olevien pumppujen todettiin olevan sellaisenaan riittävät ISO VG 68-viskositeettiin siirtymisen myötä muuttuville virtauksille. Suihkuputkipumpun säätö pienentyneille virtauksille voitaisiin toteuttaa ohjelmallisesti.

Kahden viskositeettiportaan alentamisen vaikutusten voidaan toimeksiantajan aikaisempaan näyttöön perustuen olettaa olevan noin kaksinkertaiset verrattuna yhden portaan alentamiseen. Laskentaohjelman ISO VG 150-tietojen puutteen vuoksi näitä ei voitu suoraan laskea, vaan kahden portaan vaikutusta jouduttiin arvioimaan yhden portaan laskennan tuottaman arvojen avulla. Virtausten osalta todellisten muutosten arvioiminen on haastavampaa, mutta telan sisäisen tehonkulutuksen muutoksia voidaan pitää luotettavina esimerkiksi takaisinmaksuajan laskemisen suhteen.

Takaisinmaksuaikojen laskeminen käsiteltiin luvuissa 9.3.1 ja 9.3.2. Tuloksiksi saatiin kohteelle A noin puoli vuotta sekä kohteelle B noin 5 kuukautta. Verrattuna esimerkiksi telojen huoltoväliin,

joka on keskimäärin 2–5 vuotta, on takaisinmaksuaika varsin lyhyt. Toisin kuin telahuollot, viskositeetti muutos tarvitsisi tehdä vain kerran, jonka jälkeen se tuottaisi asiakkaalle säästöjä. Viskositeetti muutoksen myötä asiakkaan ei tarvitsisi vaihtaa koko öljymäärää, vaan viskositeetin alentaminen voitaisiin suorittaa ohentamalla käytössä olevia öljyjä. Tämä tosin edellyttää, että öljyillä on vielä elinikä jäljellä.

Markkinapotentiaalin tarkastelun konkreettisenä tuloksena laadittiin Excel-työkirja, johon listattiin viskositeetti muutokselle sopiva telakanta ja sen jakautuminen alueittain. Listaa tarkastelemalla todettiin, että viskositeetti muutokselle potentiaalisia kohteita on maailmalla paljon. Tämä puoltaa sitä, että kalanterin telojen viskositeetti muutoksen jatkokehittäminen tuotteena on kannattavaa.

Kokoavasti voidaan todeta viskositeetin alentamisen tuovan molemmissa esimerkkikohteissa huomattavaa energiansäästöä lyhyellä takaisinmaksuajalla. ISO VG 68-viskositeettiin siirtyminen vaatii molemmissa kohteissa kuristussuutinten (ks. kuvio 6) vaihtamisen sekä erittäin todennäköisesti vaihteelle tehtävän lisävoiteluporauksen, mutta suuria muutoksia hydraulijärjestelmään ei ole pakollista tehdä pumppauskapasiteetin ollessa riittävä. Vaadittavat toimenpiteet tulee kuitenkin arvioida aina tapauskohtaisesti. Suihkuputkipumppujen säätö uusille, pienemmille virtauksille voidaan toteuttaa molemmissa kohteissa ohjelmallisesti. Matalampi viskositeetti parantaa ilmanerottumista, joka voi edistää järjestelmän puhtauden ylläpitämistä. Taulukossa 11 on koottu viskositeetti muutokseen liittyviä tietoja kohteittain.

Taulukko 11. Viskositeettimuutoksen yhteenveto

	Kohde A	Kohde B
Energiansäästö	Sisäinen tehonkulutus noin 10 % ja hydr. Jäähd. tehontarve noin 11 %	Sisäinen tehonkulutus noin 10 € ja hydr. Jäähd. Tehontarve noin 10 %
Virtausten muutokset	Vyöhykevirtaukset kasvavat, suihkuputkivirtaukset pienenevät, kokonaisvirtaus pienenee	Vyöhykevirtaukset kasvavat, suihkuputkivirtaukset pienenevät, kokonaisvirtaus pienenee
Vaadittavat muutokset	Kapillaarisuuttimet	Kapillaarisuuttimet
Mahdolliset muutokset	Vaihteen voiteluporaukset, suihkuputkipumpun vaihto pienempituottoiseen	Vaihteen voiteluporaukset
Muut hyödyt	Parantunut ilmanerotus, tehostunut jäähdytys	Parantunut ilmanerotus, tehostunut jäähdytys
Vuosittainen säästö	38 400 €	35 320 €
Takaisinmaksuaika	Noin puoli vuotta	Noin 5 kuukautta

11 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, voidaanko kalanterin telahydrauliikassa saavuttaa energiansäästöä alentamalla hydraulioöljyn viskositeettia ja kiinnittämällä huomiota öljyn puhtauteen ja laatuun. Toimeksiantajan kiinnostus tutkimuksen teettämiseen perustui aikaisempaan näyttöön viskositeetin alentamisen hyödyistä puristinosan telahydrauliikassa. Energiansäästö oli opinnäytetyön pääasiallinen tarkastelun kohde, mutta sen ohella kartoitettiin muita asiakashyötyjä sekä luotiin pohjaa viskositeettimuutoksen tuotteistamiselle. Tuotteistamisen kannalta tavoitteena oli tutkia esimerkiksi potentiaalisten asiakkaiden määrää sekä sijoittumista maailmalla.

Tutkimuksen tuloksena saatiin konkreettista näyttöä viskositeetin alentamisen myönteisestä vaikutuksesta energiankulutukseen. Opinnäytetyössä koottiin yhteen laskentaohjelmien tuloksia ja

niiden tulkintoja, asiakashyötyjä sekä markkinapotentiaalia. Merkittäväksi asiakashyödyksi todettiin ilmanerottumisen parantuminen matalamman viskositeetin myötä, jolla voisi hapettumiseneston kautta olla öljyn käyttöikää pidentävä vaikutus. Paperiteollisuudessa käytettävät öljytilavuudet ovat suuria verrattuna tavalliseen teollisuushydrauliikkaan, joten myös öljynvaihdon yhteydessä hävitettävät öljymäärät ovat suuria. Jos öljyn vaihtoväliä voitaisiin pidentää, voisi se tuoda tehtaan elinkaaren aikana merkittäviä säästöjä käytetyn hydrauliöljyn määrässä. Opinnäytetyöraportin lisäksi toimeksiantajalle laadittiin markkinointimateriaaliksi soveltuva esitys kalanterin viskositeetti-muutoksista sekä listaus telakannasta, jolle viskositeettimuutos voitaisiin mahdollisesti toteuttaa.

Opinnäytetyössä onnistuttiin vastaamaan tutkimuskysymykseen. Energiansäästömahdollisuuden olemassaolo pystyttiin todentamaan laskennallisesti ja sen todettiin olevan merkittävä. Alustavasti vastaus tutkimuskysymykseen saatiin jo asiantuntijahaastatteluista, mutta tarkempi vastaus vaati laskelmien tekoa. Tutkimuksen aikana esimerkiksi haastattelutilanteissa tuli lukuisia tarkastelemisen arvoisia näkökulmia esiin, mutta näitä jouduttiin työn laajuuden vuoksi jättämään pois. Toimeksiantajalla oli kiinnostusta uusien öljylaatujen käytön tutkimiseen paperikoneella, mutta tämäkin jäi laajuuden säilyttämisen vuoksi hyvin pintapuoliselle tasolle, eikä sitä juurikaan sisällytetty opinnäytetyöhön. Tietoperustaan laadittiin kuitenkin luku, jossa käsiteltiin uusien öljyjen tuomia haasteita (ks. luku 8).

Monet opinnäytetyön käsittelemät aihealueet olivat tekijälle prosessin alkuvaiheessa melko vieraita, minkä vuoksi alkuun pääseminen vaati jonkin verran itseopiskelua sekä ohjaamista. Toimeksiantajan työntekijät olivat tässä suurena apuna. Aikaisemman tietoperustan suppeuden vuoksi alkuvaiheen haastattelutilanteet olivat strukturoimattomia, jonka vuoksi aineistonkeruu oli paikoin melko tehotonta. Haastatteluissa esitettävät kysymykset nousivat pitkälti keskusteluiden edetessä, ennakkoon suunniteltuja kysymyksiä oli melko vähän. Opinnäytetyöprosessin edetessä, tiedon karttuessa sekä aiheen rajauksen tarkentuessa oikeanlaisten kysymysten esittäminen kuitenkin helpottui ja aineiston tulkitseminen sekä kriittinen arviointi kehittyi. Tietoperustan laatimisen aikana ymmärrys monista työn aihealueista laajeni merkittävästi.

Oppiminen ei rajoittunut pelkästään opinnäytetyön tekijään. Koko opinnäytetyöprosessin aikana onnistuttiin jakamaan tietoa tutkimukseen osallistuneiden tahojen välillä. Haastattelutilanteissa

sekä palavereissa heräsi keskustelua, jossa siirtyi tietoa esimerkiksi suunnittelun ja tuotepäällikön välillä. Tällainen osaamisen jakaminen on olennaista esimerkiksi tuotekehityksen kannalta.

Haastattelut ja aineistonkeruu toteutettiin valtaosin etäyhteyksin sekä sähköisten tietojärjestelmien avulla. Kommunikoinnin helpottamiseksi ja tietojärjestelmiin pääsemiseksi vaadittiin tietokone sekä käyttäjätunnukset, jotka toimeksiantaja antoi heti opinnäytetyöprosessin alkuvaiheessa. Osa tarvittavista ohjelmistoista ja tietojärjestelmistä vaativat erityisiä käyttöoikeuksia, joiden hakeminen aiheutti toisinaan pieniä viiveitä etenemisessä. Nämä eivät kuitenkaan aiheuttaneet suuria ongelmia. Tällaisiin ennalta varautuminen on erityisesti laadullisessa tutkimuksessa haastavaa, koska ennalta ei voi täysin tietää, mitä kaikkea tutkimuksessa tulee tarvitsemaan.

Laskelmien tekemistä rajoitti se, että laskentaohjelma ei eritellyt ISO VG 100-luokkaa korkeamman viskositeetin öljyjen arvoja erikseen. Valikoiduissa esimerkkikohteissa oli kuitenkin molemmissa käytössä ISO VG 150-luokan öljyt, joten vaikka laskentaohjelmaan syötettiin muut alkuperäiset parametrit, ei laskelmien tuloksia sellaisenaan voitu pitää täysin totuudenmukaisina. Laskelmat perustuivat siis käytännössä yhden viskositeettiportaan laskuun, vaikka kohteisiin suunniteltiin kahden portaan alennusta. Toimeksiantajalla oli kuitenkin paljon aikaisempaa kokemusta viskositeettimuutosten laskemisesta puristinosan telahydrauliikalle, joten kalanterin voitiin olettaa noudattavan samoja periaatteita. Aikaisemman näytön perusteella esimerkiksi telan sisäisen tehonkulutuksen muutos on tarkastelualueella lineaarinen, eli yhden portaan tuoman muutoksen avulla voitiin päätellä myös kahden portaan muutos tarpeeksi luotettavasti.

Laskentaohjelman tuloksia analysoidessa todettiin muutosten olevan aikaisempaan näyttöön verrattuna pienehköt. Laskelmien mukaan yhden portaan lasku toi molemmissa kohteissa noin 5 % säästön telan sisäisessä tehonkulutuksessa, joka on hieman odotettua vähemmän. Laskentaohjelman katsottiin laskevan tulokset ”varovaisesti”, jolloin asiakkaille ei tulisi tarjottua ainakaan todellisuutta parempia tuloksia. Todellisten säästöjen ollessa mahdollisesti laskelmia suuremmat, on asiakas todennäköisemmin tyytyväinen investointiinsa. Jos taas arviot olisivat markkinoinnissa laskettu liian optimistisesti, voisi tästä seurata asiakastyytymättömyyttä.

Tutkimuksessa toteutettiin laskelmat kahdelle kohteelle, joista molemmat olivat Valmetin SymCD-teloilla varustettuja softkalantereita. Näin ollen otanta oli melko suppea ja valitut kohteet olivat

hyvin samankaltaisia. Valittujen kohteiden perusteella voidaan kuitenkin yleistää tuloksia koskemaan muitakin softkalantereita, joilla on käytössä SymCD-teloja. Hardkalantereiden katsottiin olevan viskositeetin alentamiselle soveltumattomia johtuen käyttölämpötiloista. Viime vuosien aikana kalanteroinnissa on ollut trendinä softkalantereiden muuttaminen hardkalantereiksi, joka voi vaikuttaa viskositeettimuutosten markkinapotentiaaliin.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää perustana kalanterin teloille tehtävän viskositeetti muutoksen tuotekehitykselle ja markkinointimateriaaleille. Tuloksista ei ole toistaiseksi kokemuksia, koska kalanterin osalta käyttöönoton jälkeen tehtäviä viskositeetinalennuksia ei ole vielä toteutettu. Viime vuosina käyttöönotetuissa kohteissa suunnittelu on kuitenkin tehty jo valmiiksi ISO VG 68-öljyille, joten voitaisiin olettaa, että viskositeetin alennus ei tuota vanhemmissakaan kohteissa ongelmia.

Tutkimuksena aikana nousi esille lukuisia mahdollisia jatkokehittämisen kohteita. Esimerkiksi uivien telojen viskositeettimuutoksien kannattavuudesta oli toimeksiantajalla näyttöä, mutta tämän tuotteistamisessa on vielä kehittämistä. Muita esille nousseita asioita olivat uudenlaisten öljyjen käyttäminen paperikoneilla ja niillä mahdollisesti saatavat hyödyt. Viime vuosina yleistyneillä elintarvikehyväksytyillä öljyillä on havaittu olevan elintarvikehyväksytyn vaateen täyttämisen lisäksi muita asiakashyötyjä, joten tällaisten öljyjen käytön kannattavuutta muillakin kuin elintarvikepakkausmateriaaleja valmistavilla kohteilla olisi hyvä tutkia.

Painetta erilaisten öljyjen käyttöön voi tulevaisuudessa tulla ympäristösyistä. Ympäristön suojelemisen kannalta esimerkiksi biohajoavien öljyjen käyttöä paperiteollisuudessa olisi hyvä tutkia. Biohajoavia öljyjä on toistaiseksi käytetty lähinnä liikkuvassa kalustossa, jossa öljyn päätyminen ympäristöön on paperitehdasolosuhteisiin verrattuna huomattavasti suurempi riski. Öljyn ympäristövaikutuksia olisi kuitenkin hyvä tarkastella koko öljyn elinkaaren ajalta, joten biohajoavien öljyjen valmistamisen aiheuttamaa ympäristökuormitusta voisi verrata nykyisin paperitehtailla yleisesti käytettyihin öljyihin.

Ulko- ja turvallisuuspolitiikka sekä valtiollinen huoltovarmuus voivat olla tulevaisuudessa yhä suurempi tekijä hydraulioöljymarkkinoilla. Öljyn ja polttoaineiden hintojen nousu sekä saatavuuden entistä epävarmempi tilanne voi vaikuttaa siihen, millaisia öljyjä tehtaot saavat tai haluavat ottaa

käyttöön. Esimerkiksi Venäjän pitkään jatkunut Ukrainaan kohdistunut sotilaallinen toiminta, joka kärjistyi helmikuussa 2022 alkaneeseen hyökkäykseen on aiheuttanut merkittäviä muutoksia eurooppalaisessa ja kansainvälisessä kaupankäynnissä. Venäjä on suuri kaasun ja öljyn tuottaja, joten pakotteet ja muu hyökkäystä vastustava toiminta on jättänyt peruuttamattoman jäljen öljymarkkinoille.

Viskositeettimuutosta voidaan pitää yhtenä tehtaiden energiatehokkuutta parantavana tekijänä. Paperiteollisuuden käyttäessä paljon energiaa ja resursseja, voi prosentuaalisesti pienetkin säästöt tuoda merkittäviä tuloksia. Toivottavaa olisi, että mahdollisimman monet tehtaot lähtisivät parantamaan omaa energia- ja resurssitehokkuuttaan kestävämmän teollisuuden ja tulevaisuuden puolesta.

Lähteet

Alasuutari, P. 1999. Laadullinen tutkimus. 3. uud. p. Tampere: Vastapaino.

Awad, M. 2011. Fouling of Heat Transfer Surfaces. Julkaisussa Heat Transfer – Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems. Toim. A. Belmiloudi. Lontoo: Intech. Viitattu 1.4.2022. Tietokannasta IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/13202>.

Boles, M. & Çengel, Y. 2015. Thermodynamics – An Engineering Approach. 8. p. New York: McGraw Education.

Energiatehokas lämmönsiirto. 2016. Motiva. Esitys lämmönvaihtimien energiatehokkuudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Viitattu 1.4.2022. https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/energiatehokas_lammonsiirto.10766.shtml.

Feldmann, R. 2013. Calendering. Julkaisussa Handbook of Paper and Board. 2. uud. p. Toim. H. Holik. Weinheim: John Wiley & Sons, Incorporated, 1085–1105. Viitattu 16.2.2022. Tietokannasta ProQuest Ebook Central Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätunnuksilla. janet.finna.fi.

Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. N.d. Ympäristöministeriön vastuualueita käsittelevä sivu. Viitattu 26.1.2022. <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>.

Huhtinen, M., Kettunen A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. 4. p. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Opetushallitus.

Hägglom-Ahnger, U. & Komulainen, P. 2003. Kemiaallinen metsäteollisuus II: Paperin ja kartongin valmistus. 5. p. Helsinki: Opetushallitus.

Jaakkola, M. 2022. Kalanterihuoltojen tuotepäällikkö. Field Service-osasto, Valmet Technologies Oyj Järvenpää. Haastattelu 3.2.2022.

Jälkikäsittely - tiivistelmä. N.d. KnowPap - Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Viitattu 27.1.2022. Tietokannasta KnowPap Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätunnuksilla. janet.finna.fi.

Järvenpää, S. 2022. Hydraulikkasuunnittelija. Automaatio-osasto, Valmet Technologies Oyj Rautpohja. Haastattelu 31.1.2022.

Järviö, J. & Lehti, T. 2017. Kunnossapito – tuotanto-omaisuuden hoitaminen. 6. täyd. p. Helsinki: Promaint.

Kalanterin profiilinsäätölaitteet. N.d. KnowPap - Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Viitattu 29.3.2022. Tietokannasta KnowPap Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätunnuksilla. janet.finna.fi.

Kalanteroinnin prosessimuuttajat. N.d. KnowPap - Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Viitattu 14.2.2022. Tietokannasta KnowPap Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätunnuksilla. janet.finna.fi.

Kananen, J. 2017. Laadullinen tutkimus pro graduna ja opinnäytetyönä. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. 2013. Hydraulitekniikka. Hydrauliiikan oppikirja. Helsinki: Sanoma Pro.

Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. 2007. Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu. Tribologian oppikirja. Helsinki: Otatieto.

Kuula, A. 2011. Tutkimusetiikka: Aineistojen hankinta, käyttö ja säilytys. Tampere: Vastapaino. Viitattu 31.3.2022. Tietokannasta Ellibslibrary Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätunnuksilla. janet.finna.fi.

Laine, S. 2010. Tehokas kunnossapito – tuottavuutta käynnissäpidolla. Helsinki: KP-Media.

Liiketoiminnat. N.d. Valmetin liiketoimintalinjoja sekä maantieteellisiä alueita käsittelevä sivu Valmetin kotisivuilta. Viitattu 26.1.2022. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/>.

Palvelut. N.d. Palvelut-liiketoimintalinjan kuvaus. Viitattu 26.1.2022. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/palvelut/>.

Pitkänippikalanterointi. N.d. KnowPap - Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Viitattu 16.2.2022. Tietokannasta KnowPap Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätunnuksilla. janet.finna.fi.

PSK 6201:2022. Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. Ryhmä 62: Kunnossapidon käsitteet ja laitoksen kuntokartoitus. Helsinki: PSK Standardisointi. Vahvistettu 17.1.2022. Viitattu 21.3.2022. janet.finna.fi, PSK-standardien käyttöliittymä.

PSK 6701:2006. Hydraulinesteen valinta ja hankinta. Ryhmä 67. Teollisuushydraulijärjestelmän suunnittelu ja hankinta. Helsinki: PSK Standardisointi. Vahvistettu 31.8.2006. Viitattu 23.3.2022. janet.finna.fi, PSK-standardien käyttöliittymä.

SFS-EN 13306:2017. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia. Helsinki: Suomen standardisointiliitto SFS. Vahvistettu 8.12.2017. Viitattu 21.3.2022. janet.finna.fi, SFS Online.

Superkalanterointi. N.d. KnowPap - Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisympäristö. Viitattu 3.2.2022. Tietokannasta KnowPap Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätunnuksilla. janet.finna.fi.

Tang, H. 2021. Engineering research. New Jersey: John Wiley & Sons.

Telatyypit ja rakenteet. N.d. N.d. KnowPap - Paperitekniikan ja tehtaan automaation oppimisym-
päristö. Viitattu 21.3.2022. Tietokannasta KnowPap Jyväskylän ammattikorkeakoulun käyttäjätun-
nuksilla. janet.finna.fi.

Teollisuusvoitelu. 2006. Kunnossapitoyhdistys ry. Teollisuusvoitelun oppikirja. 4. täyd. p. Helsinki:
KP-Media.

Valmet lyhyesti. N.d. Lyhyt kuvaus Valmetin suomenkielisiltä kotisivuilta. Viitattu 26.1.2022.
<https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>.

Valmetin koulutusmateriaali. 2012. Valmet Technologies Oyj. Paperikoneen hydrauliiikan sisäinen
koulutusmateriaali.

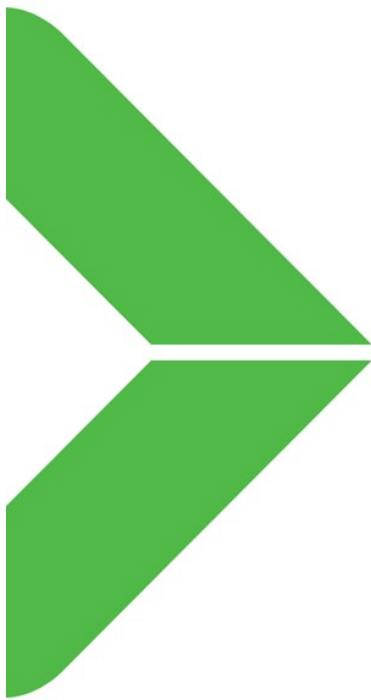
Valmetin koulutusmateriaali. 2021. Valmet Technologies Oyj. Taipumakompensoitujen telojen
huoltotarjonnan esittely.

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. 21. p. Jyväskylä: Genesis-kirjat.

Öljyn kunnossapito. 2018. Promaint ry. Öljyn kunnossapidon oppikirja. Helsinki: Promaint.

Liitteet

Liite 1. Viskositeettimuutoksen markkinointimateriaali



Hydraulic oil viscosity change

For Deflection Compensated Calender rolls

Valmet 

Benefits

Viscosity change: ISO VG 150 to 68



Reduces friction between roll shell and the oil film

10 % reduction in internal power consumption means 10 % less costs



Increases oil's thermal conductivity

Less cooling energy needed to cool the oil means less cooling water



Enhances oil's deaeration properties

Air bubbles come out of the oil more easily



Significantly reduces shower pipe flows

Results in reduction of total flow therefore need for pumping

Implementation

- Mechanical modifications for viscosity change are made during roll overhaul
 - No need for unnecessary shutdown
- Changes:
 - Capillary tubes to ensure that the current hydraulic unit will suffice
 - Gear drilling for lubrication
 - Lip seal change
 - Oil inlet and outlet temperature lift to optimize roll cooling
- No need to change the entire oil volume if there is still lifespan left
 - Existing oil can be thinned



Valmet 

Examples

Machine run time 8000 h/a
Price of electricity 0,10 €/kWh

Case A: Soft calender, SymCD, 1500 m/min
Viscosity change results in about 24 kW reduction in internal power consumption (per nip)
Yearly savings would be around 38 400 €
Payback time is about six months
About 16 % reduction in total oil flow to roll

Case B: Soft calender, SymCD, 1800 m/min
Viscosity change results in about 22 kW reduction in internal power consumption (per nip)
Yearly savings around 35 200 €
Payback time is about 5 months
About 44 % reduction in total oil flow to roll

Valmet 

Liite 2. Laskentaohjelman kohteen A raportti ISO VG 150 (Salassa pidettävä)

Liite 3. Laskentaohjelman kohteen A raportti ISO VG 68 (Salassa pidettävä)

Liite 4. Laskentaohjelman kohteen B raportti ISO VG 150 (Salassa pidettävä)

Liite 5. Laskentaohjelman kohteen B raportti ISO VG 68 (Salassa pidettävä)