

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

RISTINIVEL NELIVALSSAIMEN VOIMANSIIRROSSA
UNIVERSAL JOINT IN THE TRANSMISSION OF A FOUR-HIGH ROLLING MILL

Lappeenrannassa 2.4.2015

Santtu Koivula

Tarkastaja: dosentti, TkT Harri Eskelinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Santtu Koivula

Ristinivel nelivalssaimen voimansiirrossa

Kandidaatintyö

2015

34 sivua, 11 kuvaa, 6 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti, TkT Harri Eskelinen

Hakusanat: ristinivel, kardaanimivel, kylmävalssaus, nelivalssain, kuparin valssaus

Nelivalssaimia käytetään yleisesti metallinauhojen ja -levyjen kylmämuovaukseen. Valssaimissa ristinivel siirtää vääntömomenttia kahden kulmassa olevan akselin välillä. Tässä tutkimuksessa haettiin ratkaisuja nelivalssaimessa esiintyvään epäsymmetriseen taivutustarpeeseen. Valssattavat kuparinauhat alkavat aaltoilla valssaajan puolelta noin yhden millimetrin paksuudessa. Tutkimuksen tarkastelu rajattiin koskemaan vain voimansiirrossa olevaa ristiniveltä, jonka epäiltiin olevan yksi mahdollinen ongelman aiheuttaja. Tutkimuksessa selvisi, että ristinivel ei aiheuta pystysuuntaisia voimia, jotka vaikuttaisivat suoraan nauhan poikkipintaprofiiliin. Kuitenkin ristinivelen aiheuttamat vaakasuuntaiset voimat voivat vaikuttaa epäsuorasti nauhan poikkipintaprofiiliin. Laatuerojen taloudellinen merkitys havaittiin pieneksi, mutta myöhemmissä prosessivaiheissa kuparinauhan epäsymmetrinen poikkipintaprofiili aiheutti ongelmia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Mechanical Engineering

Santtu Koivula

Universal joint in the transmission of a four-high rolling mill

Bachelor's thesis

2015

34 pages, 11 pictures, 6 tables

Examiner: Docent Harri Eskelinen, D.Sc. (Tech.)

Keywords: universal joint, cardan joint, cold rolling, four-high rolling mill, copper rolling

Four-high rolling mills are commonly used in cold forming of metal strips and sheets. In such configurations, a universal joint transmits torque between two angled shafts. In this study solutions were sought for asymmetric bending demand in a four-high rolling mill. In the rolling process under study, the copper strips begins to wrinkle on one edge at a thickness of about one millimeter. The study was limited to consideration of the transmission's universal joint, which was suspected to be a possible cause of the problem. The results of the study revealed that the universal joint did not generate vertical forces having a direct impact on the cross-section profile of the strip. However, horizontal forces caused by the universal joint may indirectly affect the cross-section profile. The economic importance of the quality deviations is small but the asymmetry in the cross-section of the copper strip can cause problems in subsequent downstream phases of the production process.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	6
1.1	Tutkimuksen tausta	6
1.2	Tavoitteet	10
1.3	Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset	10
1.4	Tutkimusmenetelmät	11
1.5	Rajaukset.....	11
1.6	Tutkimuksen anti	11
2	TUTKIMUSMENETELMÄT	12
2.1	Puolistrukturoitu haastattelu	13
2.2	Painemittaukset	13
2.3	Mekanismin analyysi	14
3	KIRJALLISUUSKATSAUS	15
3.1	Ristintason mekanismin analyysi	15
3.2	Valssauksen laatuun vaikuttavat parametrit	18
3.3	Valssausvirheet	19
3.4	Kuparinauhan laatuolosuhteet.....	19
3.5	Valssauksen kustannustehokkuus	20
3.6	Vaihteisto	21
3.7	Yhteenveto kirjallisuuskatsauksesta	21
4	TULOKSET	22
4.1	Painemittausten tulokset	22
4.2	Kardaanivälityksestä aiheutuvat laakerivoimat	24
4.3	Haastattelututkimuksen tulokset	27
5	POHDINTA	29
5.1	Johtopäätökset.....	29
5.2	Objektiivisuus	31

5.3	Reliabiliteetti ja validiteetti.....	31
5.4	Jatkotutkimusaiheet	31
6	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	35

SYMBOLILUETTELO

A_m	Taivutussylinterin männän pinta-ala [mm ²]
A_v	Taivutussylinterin männänvarren pinta-ala [mm ²]
A_Y	Työvalssin vaihteiston puoleinen laakerivoima [N]
B_Y	Työvalssin valssajaan puoleinen laakerivoima [N]
F	Yhden sylinterin taivutusvoima [N]
F_a	Vinohampaisen lieriöhammaspyörän aksiaalivoima [N]
F_t	Vinohampaisen lieriöhammaspyörän kehävoima [N]
M_{v1}	Käyttävän hammaspyörän vääntömomentti [Nm]
M_{1max}	Ensiöakselin maksimitaivutusmomentti [Nm]
M_{2max}	Toisioakselin maksimitaivutusmomentti [Nm]
p	Taivutussylinterien paine [MPa]
r_m	Taivutussylinterin männän säde [mm]
r_v	Taivutussylinterin männänvarren säde [mm]
r_{w1}	Vierintäsäde [m]
s	Keskihajonta [%]
s_x	Taivutusprosentin keskiarvon keskivirhe [%]
T_1	Vääntömomentti ensimmäisellä pistolla [Nm]
T_6	Vääntömomentti kuudennella pistolla [Nm]
t	Taivutusprosentti [%]
t_6	Taivutusprosentin aritmeettinen keskiarvo kuudennella pistolla [%]
$t_{6,max}$	Taivutusprosentin keskiarvon yläraja kuudennella pistolla [%]
$t_{6,min}$	Taivutusprosentin keskiarvon alaraja kuudennella pistolla [%]
α_2	Toisioakselin kulmakiihtyvyys [rad/s ²]
β	Nivelkulma [°]
β_h	Hammaspyörän hampaiden vinouskulma [°]
φ	Ristinivelen vaihe-ero [°]
ω_1	Ensiöakselin kulmanopeus [rad/s]
ω_2	Toisioakselin kulmanopeus [rad/s]

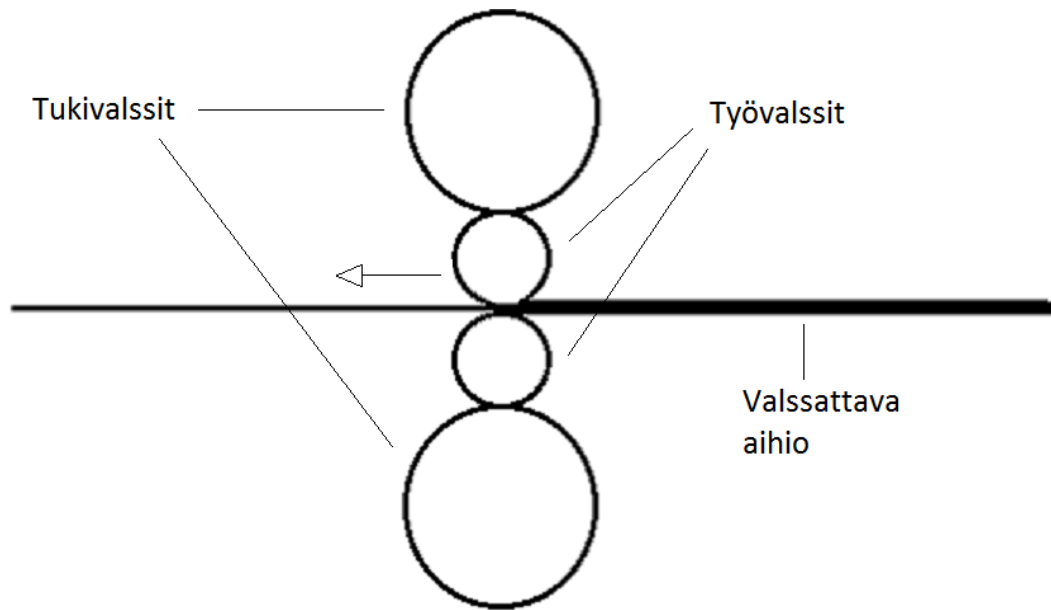
1 JOHDANTO

Tutkimuksen toimeksiantajana on Aurubis Finland Oy. Aurubis-konserni Euroopan on johtava kuparituotteiden toimittaja ja maailman suurin kuparin kierrättäjä (Aurubis). Porissa sijaitseva Aurubis Finland Oy valmistaa erilaisista kupariseoksista levyjä ja nauhoja. Tuotevalikoima sisältää myös Nordic-tuotteet, joita käytetään rakennusten julkisivuissa.

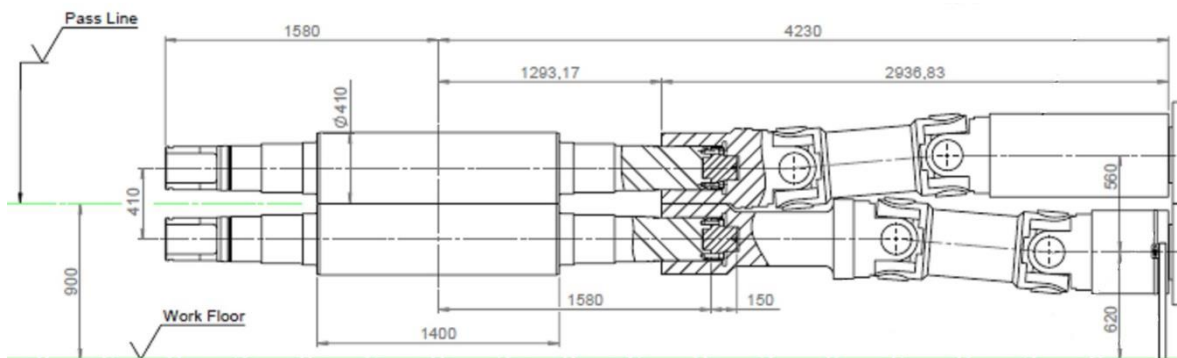
1.1 Tutkimuksen tausta

Tutkimuksessa haetaan ratkaisuja Achenbach-kylmävalssaimessa esiintyvään työvalssien taivutusongelmaan. Kun nauhaa valssataan, noin yhden millimetrin paksuudessa nauhaan alkaa muodostua löysää, eli se alkaa aaltoilla valssajaan puolelta. Tässä työssä tutkitaan, aiheuttaako voimansiirron ristinivel työvalsseihin toispuoleista taivutusta, joka vaikuttaisi kuparinauhan laatuun.

Tutkittava valssain on nelivalssain, jossa on kaksi työvalssia ja kaksi tukivalssia. Varsinainen aihion valssaus tapahtuu työvalssien välissä. Aihiota valssataan moneen kertaan edestakaisin. Rakoa pienennetään jokaisella valssauskerralla, eli pistolla. Voimansiirtoakselit liitetään ristinivelien avulla työvalsseihin. Työvalsseja tukevat tukivalssit, jotka ottavat vastaan valssauksesta aiheutuvan kuormituksen ja painavat työvalsseja yhteen. Työvalssien halkaisija on noin puolet tukivalssien halkaisijaa pienempi. Kuvassa 1 on esitetty nelivalssaimen periaate ja kuvassa 2 kardaanivälityksen kytketyminen työvalsseihin. Tutkittavalla valssaimella valssataan nauhaa ja laattaa. (Ihalainen et al., 2005, s. 336–337.)

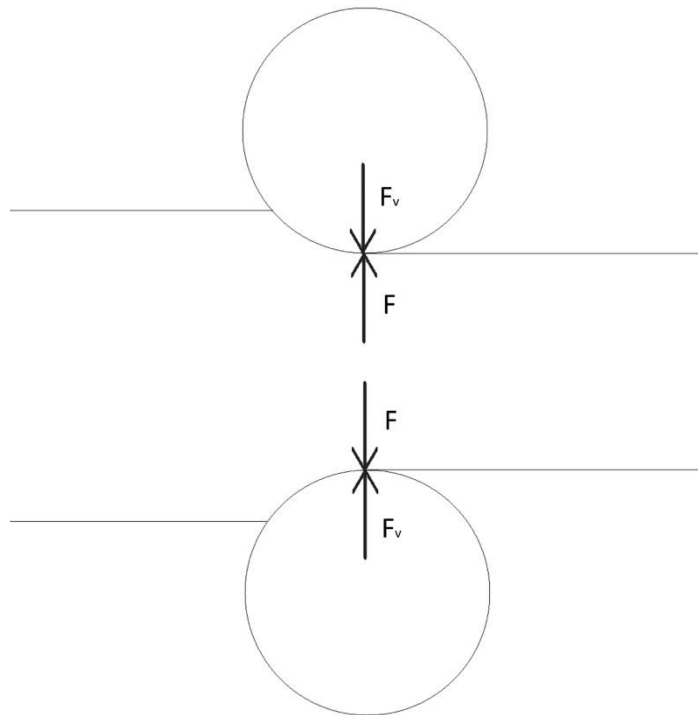


Kuva 1. Nelivalssaimen periaatekuva.



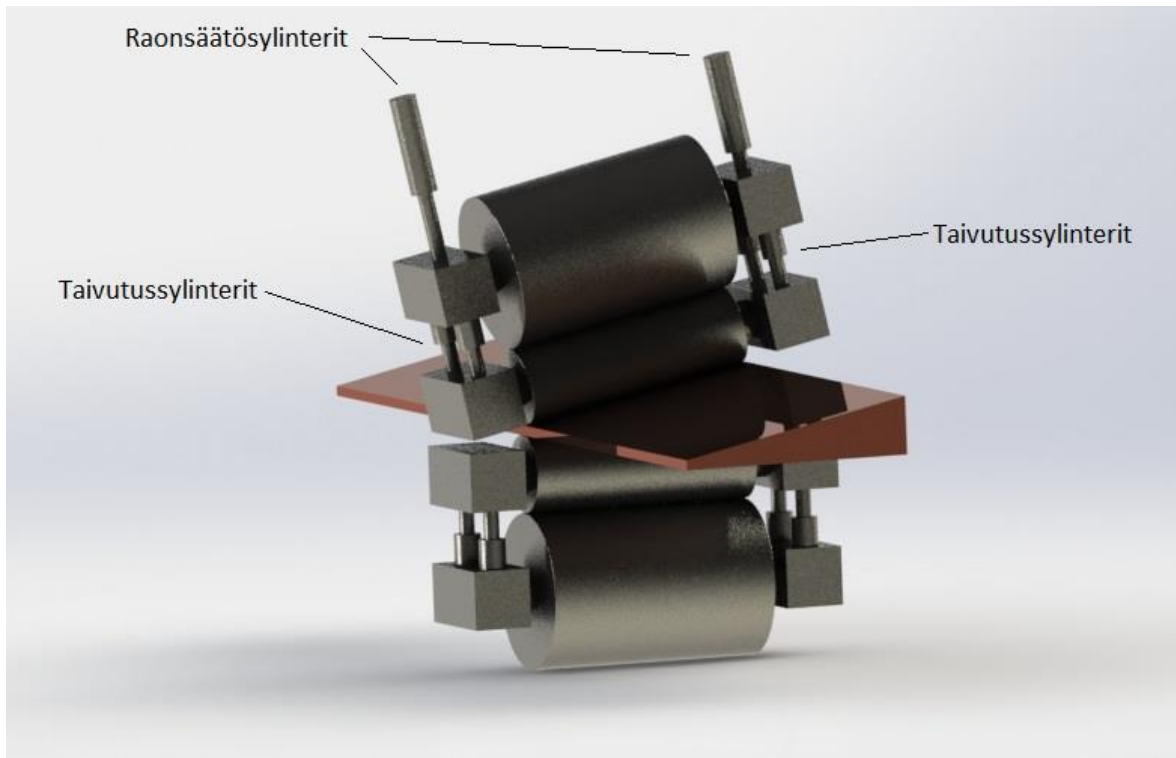
Kuva 2. Työvalssit ja kardaanivälitys (Aurubis Finland Oy).

Valssauksen lopputulokseen vaikuttavia kriittisiä parametreja ovat valssausvoima, työvalssien taivutus ja kallistus sekä aihion muokausprosentti eli reduktio. Valssausvoima tuotetaan siten, että ylätukivalssin laakeripesiin kohdistetaan raonsäätösylintereillä voima, joka välittyy ylätukivalssin kautta ylemmän työvalssiin ja siitä edelleen valssattavaan kappaleeseen. Tutkittavassa valssaimessa valssausvoimat ovat normaalisti noin 5 000–8000 kN. Vapaakappalekuva valssauksesta on esitetty kuvassa 3. Reduktio tarkoittaa, kuinka monta prosenttia aihio ohenee yhdellä pistolla.



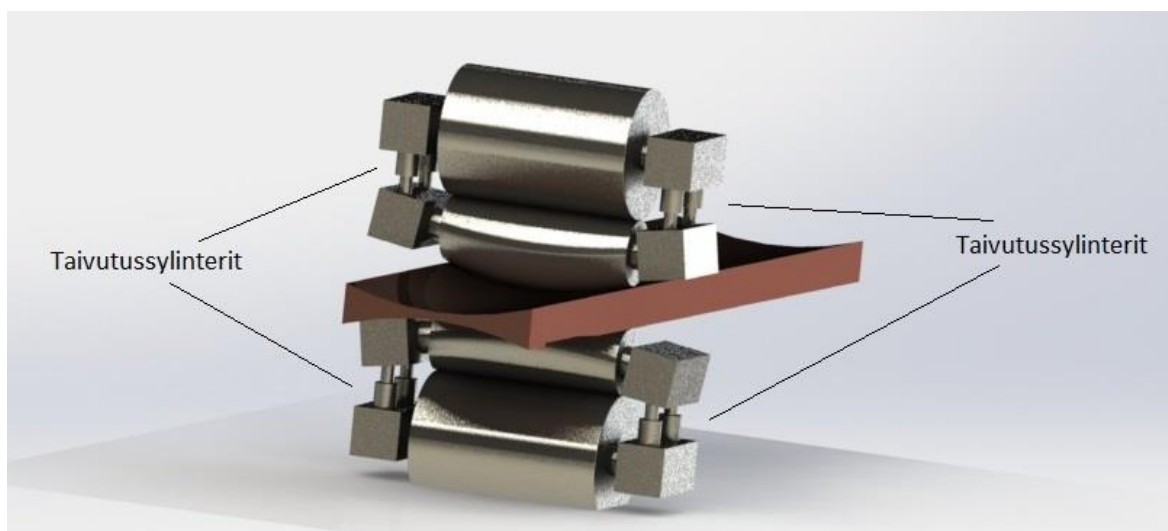
Kuva 3. Vapaakappalekuva valssauksesta. F_v on valssausvoima ja F aihion aiheuttama vastavoima.

Kallistuksen avulla säädetään raon kaltevuutta. Liikuttamalla raonsäätösyntereitä erisuuruinen matka toistensa suhteen saadaan ylätukivalssia ja edelleen ylätyövalssia kallistettua. Kallistuksella voidaan ohjata nauhaa, jos se ei kulje keskellä valssauslinjaa. Kallistuksella voidaan myös siirtää nauhan löysää kohtaa eli säätää poikkipintaprofiilin muotoa. Kallistuksen periaate on esitetty kuvassa 4. Kuten kuvasta havaitaan, valssausrako on toiselta puolelta pienempi. Tämä aiheuttaa nauhaan löysyyttä toiselle puolelle, koska pienempi valssirako aiheuttaa suuremman muokkauksen eli suuremman pituusvenymän.



Kuva 4. Valssien kallistus liioiteltuna.

Taivutuksilla säädellään poikkipintaprofiilin muotoa. Kuvassa 5 on esitetty työvalssien positiivinen taivutus. Se toteutetaan hydraulisylintereillä, jotka kiinnittyvät toisesta päästään työvalssin laakeripesään ja toisesta päästään tukivalssin laakeripesään. Yhteensä taivutussylintereitä on kahdeksan, neljä ylä- ja neljä alatyövalssissa. Kaikille kahdeksalle taivutussylinterille kohdistuu sama paine. Normaalisessa ajossa taivutuksen suhteelliset arvot vaihtelevat nollan ja sadan prosentin välillä. Taivutusten ollessa sata prosenttia, on taivutussylintereille kohdistuva paine maksimissaan. Maksimipaine on rajattu proportionaaliventtiileillä sylinterien keston vuoksi 133,5 bar:iin eli 13,35 MPa:iin. Työvalssit on myös hiottu mykeviksi.



Kuva 5. Valssien taivutus liioiteltuna.

1.2 Tavoitteet

Tämän tutkimuksen ensisijainen tavoite on tutkia, aiheuttaako ristinivel merkittävää kuormitusta työvalssseihin. Lisäksi tavoitteena on selvittää, johtuvatko laatupoikkeamat kuparinauhassa ristinivelen aiheuttamasta taivutuskuormasta. Selvitetään myös, mikä on laatupoikkeamien taloudellinen merkitys yritykselle.

1.3 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Ongelmana kylmävalssaimella on epäsymmetrinen taivutus, joka esiintyy työvalsseissa. Yleensä kuudennella pistolla alkaa valssattavaan nauhaan muodostua löysää valssaajan puolelle. Tässä työssä tutkitaan, voiko toispuoleinen taivutus aiheutua voimansiirron ristinivelvälityksestä.

Tämän tutkimuksen pääongelmana on selvittää, aiheuttaako ristinivel taivutusta työvalssseihin. Taivutuskuorma voi siirtyä työvalssien kautta rakenneosien kuormitustekijäksi. Mahdolliset tästä aiheutuvat toispuoleiset voimajakaumat voivat vaikuttaa valssattavan kuparinauhan laatuun. Laatupoikkeamat on otettava huomioon valssaimen kustannustehokkuutta tarkasteltaessa.

Tutkimuksen pääkysymys on: *”Aiheuttaako ristinivel taivutuskuormaa työvalssseihin?”*. Pohditaan myös *”Miten mahdollinen taivutuskuorma vaikuttaa kuparinauhan laatuun?”* ja *”Millä taivutuskuorman arvolla on merkittävä vaikutus valssaustulokseen?”*. Taloudellista

näkökulmaa tarkastellaan tutkimuskysymyksellä: ”*Mikä on laatupoikkeamien merkitys kustannustehokkuutta tarkasteltaessa?*”. Lisäksi tutkitaan ”*Miten taivutuskuorma vaikuttaa rakenneosien kestoikään?*”.

1.4 Tutkimusmetodit

Tutkimuksessa hyödynnetään triangulaatiota. Lähdekirjallisuuden avulla tehdään ristinielen mekanismin analyysi, jonka tuloksena arvioidaan millaista rasiitusta ristinielistä voi aiheutua työvalssisiin. Puolistrukturoidulla haastattelulla kerätään työntekijöiden kokemuksia ristinielen vaikutuksesta valssauksen laatueroihin ja selvitetään niiden taloudellista merkitystä yritykselle. Painemittausten perusteella lasketaan, miten suuria taivutusvoimia valssauksessa esiintyy. Mittausten ja laskelmien avulla pystytään arvioimaan voimansiirrosta aiheutuvan kuorman merkitystä valssauksen laatuun. Yhdistämällä mekanismin analyysi, taivutusvoimien laskelmat ja haastattelujen tulokset arvioidaan, johtuuko taivutusongelma ristinielystä.

1.5 Rajaukset

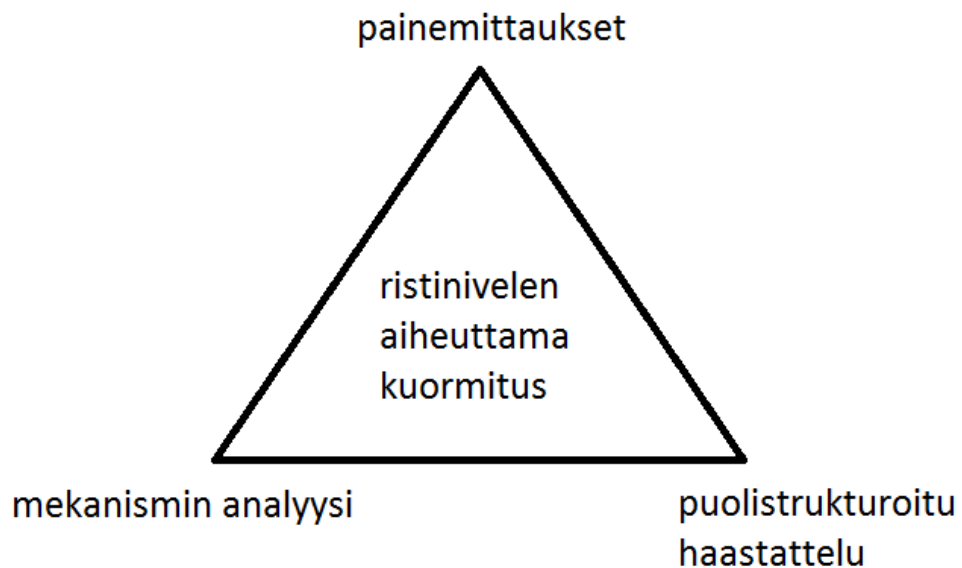
Tutkimus rajataan koskemaan vain Achenbach-valssainta. Voimansiirron komponenteista tarkastellaan nykyisestä konstruktiosta vain ristinieliä. Muokausprosentille asetetaan rajaksi 30 ± 5 %.

1.6 Tutkimuksen anti

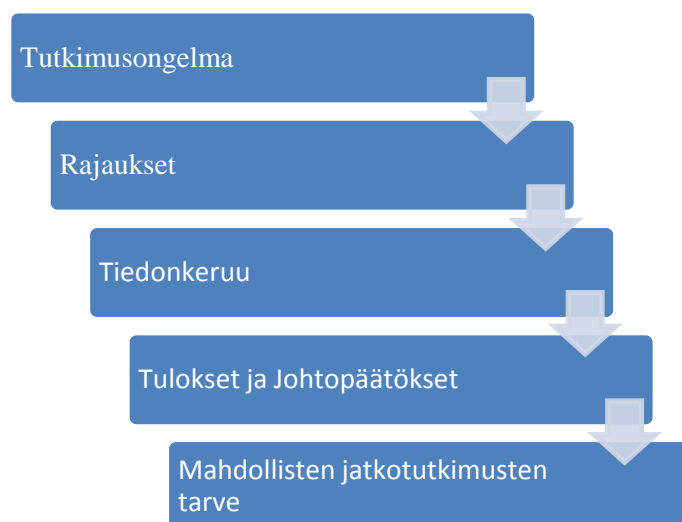
Tämän kandidaatintyö tuottaa uutta tietoa Achenbach-valssaimen voimansiirron ristinielen aiheuttaman taivutuskuorman ja valssatun kuparinauhan laadun välisestä riippuvuudesta. Työssä tarkastellaan myös toispuoleisesta taivutuksesta johtuvien laatuerojen taloudellista merkitystä.

2 TUTKIMUSMETODIT

Tutkimuksessa käytettävät metodit ovat lähdekirjallisuuden avulla tehtävä mekanismin analyysi, painemittaukset ja puolistrukturoitu haastattelu. Tämä tutkimus on pääosin kvalitatiivinen, vaikka taivutusvoimien mittaukset ja laskenta suoritetaan kvantitatiivisin periaattein. Kuvassa 6 on esitetty käytettävä metodinen triangulaatio ja kuvassa 7 tutkimuksen periaatteellinen rakenne.



Kuva 6. Metodinen triangulaatio.



Kuva 7. Tutkimuksen periaatteellinen rakenne.

2.1 Puolistrukturoitu haastattelu

Haastattelulla reflektoidaan hiljaista tietoa ristinivelen vaikutuksesta kuparinauhan laatupoikkeamiin ja selvitetään, miten usein laatupoikkeamia tapahtuu. Haastatteluun valitaan teknologiajohtaja ja valssaaja, jolla on vähintään kymmenen vuotta kokemusta tutkittavalla valssaimella. Valssaajaa haastateltiin (Levo, 2015) perjantaina 2.3.2015 kello 12.00 Aurubis Finland Oy:n valssaamossa tutkittavan valssaimen taukotilassa ja teknologiajohtajaa (Peltonen, 2015) samana päivänä kello 13.00 hänen työhuoneessaan.

Valitsemalla haastateltavat eri asemista saadaan yleiskuva tilanteesta toimihenkilöltä sekä yksityiskohtaista tietoa valssauksesta työntekijältä. Siten haastatteluista voidaan vetää johtopäätöksiä, eikä olla vain yhden työntekijän mielipiteiden varassa. Haastattelun tulokset dokumentoidaan ja teknologiajohtaja tarkastaa dokumentoidut ja kommentoidut haastattelut luotettavuuden takaamiseksi.

Haastattelu toteutetaan puolistrukturoituna. Puolistrukturoitu haastattelu eli teemahaastattelu sopii tutkimusmenetelmäksi, kun ei etukäteen tiedetä millaisia vastauksia saadaan ja haastattelu perustuu haastateltavan henkilön omaan kokemukseen. Haastatteluun määritetään etukäteen teemat, joista keskustellaan. Haastattelun suuntaa voidaan muuttaa saatujen vastausten perusteella. Haastattelun teemoiksi asetetaan:

- Kuinka monta laatupoikkeamaa tulee vuorokaudessa/viikossa?
- Kuinka suuri osa näistä laatupoikkeamista menee romuksi?
- Onko laatupoikkeamia esiintynyt ennen kardanivälitystä?
- Mistä laatupoikkeamat mahdollisesti johtuvat?
- Rakenneosien kestävyys.

2.2 Painemittaukset

Painemittaukset perustuvat siihen, että taulukoidaan kymmenen pisto-ohjelman taivutusprosentit kuudennella pistolla. Vertailun vuoksi lasketaan taivutusvoimat sadan prosentin taivutuksilla siltä varalta, että epäsymmetrinen taivutus vaikuttaa jo aikaisemmilla pistoilla valssattavan kuparinauhan laatuun, mutta alkaa näkyä löysänä vasta kuudennella pistolla materiaalin ollessa ohuempaa.

Taivutuksia säädellään paineensäätöventtiilin avulla. Taivutusten ollessa 100 prosenttia, hydrauliiikkajärjestelmässä on 133,5 bar:in paine. Yhden sylinterin taivutusvoima F kullakin pistolla lasketaan seuraavasti:

$$F = t * p * (A_m - A_v), \quad (1)$$

missä t on taivutusprosentti [%], p on paine [MPa], A_m on männän pinta-ala [mm²] ja A_v männänvarren pinta-ala [mm²]. Mittaustulokset taulukoidaan laskemista varten. Laskelmissa käytetään mittaustulosten aritmeettista keskiarvoa kuudennella pistolla sekä taivutuksen maksimiarvoa. Mittauksen luotettavuustarkastelussa otetaan huomioon keskiarvon keskivirhe. (Peltonen, 2015)

2.3 Mekanismin analyysi

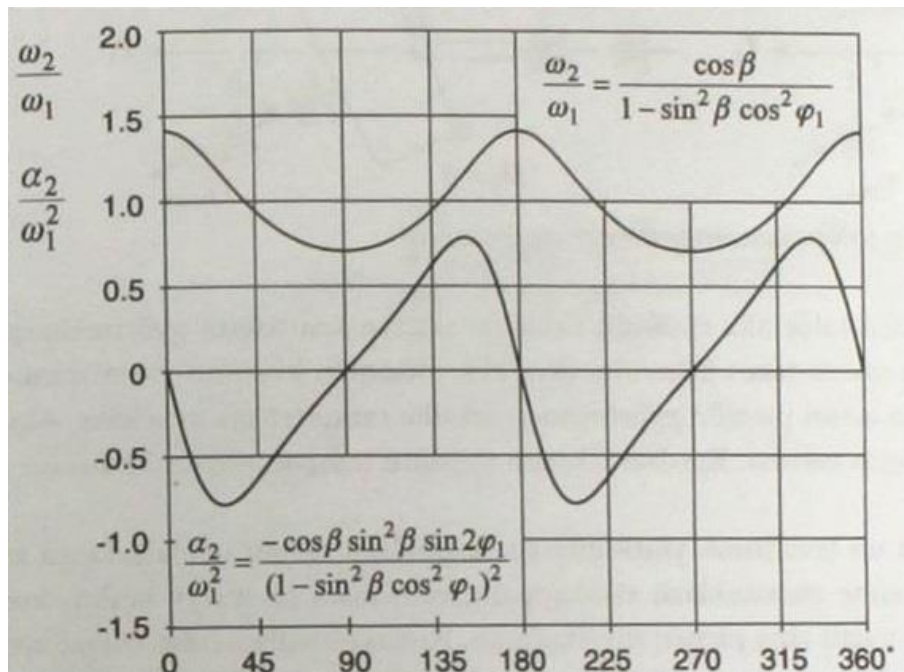
Lähdekirjallisuuden avulla etsitään ristinivelen toiminnalliset reunaehdot mitoitusyhtälöineen, jotta voidaan laskea siitä aiheutuvat voimat. Etsitään myös ristinivelen liikeratojen ääriarvot, jotta voidaan verrata niitä tutkittavan mekanismin ääriarvoihin.

3 KIRJALLISUUSKATSAUS

Konstruktiota tarkastellaan kolmessa osassa; vaihteisto, kardaaniakseli ja valssaustapahtuma. Näin tarkastelu kattaa sekä itse ristinivelet, että mahdollisesti siihen vaikuttavat komponentit ja ilmiöt ensiö- ja toisioakselilla. Lisäksi tutkitaan valssauksen kustannustehokkuutta ja selvitetään kuparinauhan laatustandardit.

3.1 Ristiniveleen mekanismin analyysi

Ristinivelet, eli kardaani-nivelet, käytetään akseliliitoksissa, kun akselien välillä on kulmaero. Akselien välinen kulma voi olla 15–35 astetta pienillä nopeuksilla. Poikkeustapauksissa jopa 45 asteen kulmat ovat mahdollisia. Valssaimissa akselien välinen kulma on kuitenkin syytä olla alle kuusi astetta. Ristinivel ei ole vakionopeusnivel. Kulman suurentuessa käytettävän akselin kulmanopeusvaihtelu muuttuu suuremmaksi. Kuvassa 8 on esitetty ristiniveleen kulmanopeuden ja -kiihtyvyyden vaihtelu 45 asteen nivelkulmalla vaihe-eron φ funktiona. (Björk et al., 2014, s. 230.)



Kuva 8. Kulmanopeuden ω ja kulmakiihtyvyyden α vaihtelu ristiniveleessä 45 asteen nivelkulmalla. Suhdeluku ω_2/ω_1 kuvaa ensiö- ja toisioakselin kulmanopeuksien suhdetta ja suhdeluku α_2/ω_1^2 kuvaa kulmakiihtyvyyksien suhdetta. Suurimmat suhde-erot ovat käyrien raja-arvojen kohdalla. (Björk et al., 2014, s. 231.)

Kuten kuvasta 8 havaitaan, pyörimisnopeussuhde vaihtelee, joten myös toisioakselin vääntömomentti vaihtelee. Vääntömomentin vaihtelu ja ensiö- sekä toisioakseliin kohdistuvat tykyttävät taivutusmomentit aiheuttavat väsyttävää kuormitusta laakereihin ja voivat toimia värähtelyn herätteenä. (Björk et al., 2014, s. 231–232.)

Ristinivelen tehtävä on siirtää vääntömomenttia kulmassa olevien akseleiden välillä. Samalla nivel aiheuttaa myös vaihtelevan taivutusmomentin käyttävään ja käytettävään akseliin. Ensiöakselin haarukan ollessa samassa tasossa akseleiden kanssa muodostuu käytettävän puolen akseliin maksimitaivutusmomentti M_{2max} , joka lasketaan seuraavasti (Björk et al., 2014, s. 231):

$$M_{2max} = T_1 \sin\beta, \quad (2)$$

missä T_1 on vääntömomentti [Nm] ja β on nivelkulma [$^\circ$]. Kun akseli pyörähtää 90 astetta, eli käytettävän puolen haarukka on akselien muodostamassa tasossa, muodostuu ensiöakseliin maksimitaivutusmomentti M_{1max} (Björk et al., 2014, s. 231):

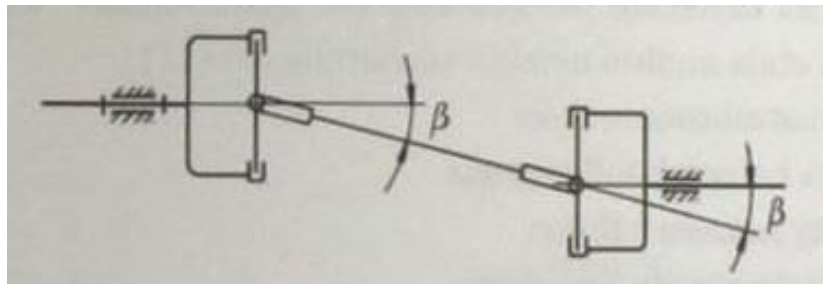
$$M_{1max} = T_1 \tan\beta \quad (3)$$

Tällöin toisioakseliin ei tule taivutusmomenttia. Kaavasta havaitaan, että vain vääntömomentti ja nivelkulma vaikuttavat taivutusmomentin maksimiin. Taivutusmomentti vaihtelee nollan ja maksimin välillä akselin pyöriessä 180 astetta.

Kardaaniakselin pyörimisnopeuden tulee olla riittävän kaukana ominaisvärähtelytaajuudesta, jotta se ei ala resonoida. Kardaaniakselin tasapainotus tulee suorittaa häiriöttömän käynnin varmistamiseksi. Tasapainotusvaatimus ei kuitenkaan koske pienimmille pyörimisnopeuksille tarkoitettuja akseleita. (Björk et al., 2014, s. 232.) Standardin mukaan nivelakselin tasapainotustarkkuus tulee olla yleensä G 16 (ISO 1940-1, 2003, s. 11).

Valssauksessa ei voida sallia käytettävän akselin kulmanopeuden vaihtelua. Tämä voidaan ehkäistä käyttämällä kahta ristiniveltä oikein kytkettynä. Oikeassa kytkennässä nivelkulmien tulee olla yhtä suuret ja nivelten vaihe-ero tulee olla 90 astetta, eli väliakselin

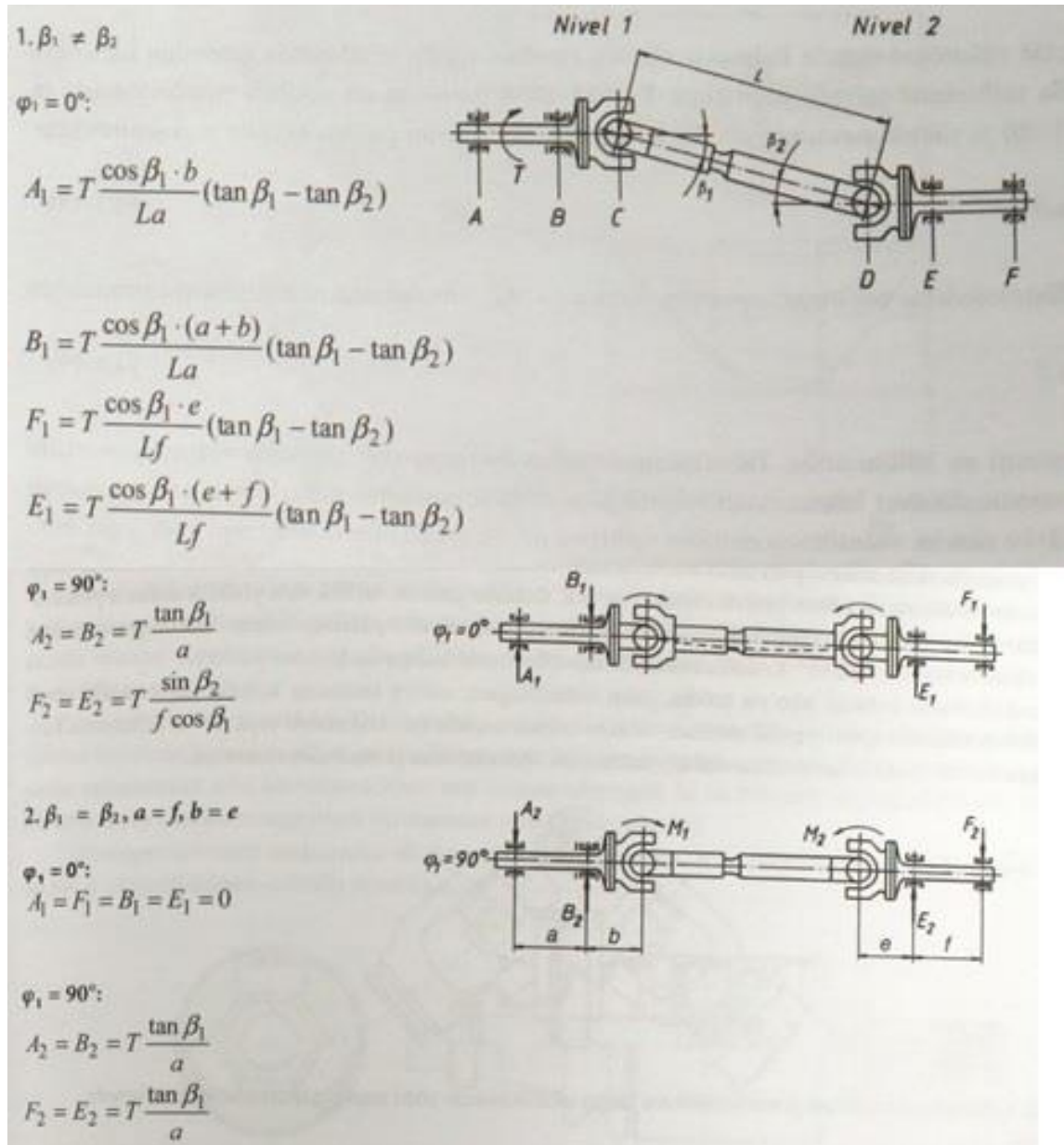
haarukoiden tulee osoittaa samaan suuntaan. Näin saadaan käytettävän akselin kulmanopeus tasaiseksi, mutta väliakselissa on kulmanopeusvaihteluita, jotka voivat aiheuttaa vääntöväärähtelyjä. Väärässä kytkennässä kulmanopeuden vaihtelu nousee kaksinkertaiseksi. Jos akselit eivät sijaitse samalla tasolla, on väliakselin haarukoita kierrettävä tasaisen nopeuden saavuttamiseksi. Oikea liitoskonstruktio on esitetty kuvassa 9. (Björk et al., 2014, s. 231.)



Kuva 9. Kaksinivelinen kardaaniakseli, joka siirtää pyörimisnopeuden tasaisena. Nivelkulma β on molemmissa nivelissä sama sekä väliakselin haarukat ovat samassa tasossa. (Björk et al., 2014, s. 231.)

Vaikka pyörimisnopeus saadaan siirrettyä tasaisena kaksinivelisellä konstruktiolla, aiheutuu ensiö- ja toisioakseliin kuitenkin hyödyttömiä taivutusmomentteja. Jotta taivutusmomentit pysyisivät mahdollisimman pieninä, on akselit laakeroitava mahdollisimman läheltä niveliä. (Wuolijoki, 1972, s. 320) Kaksinivelisen konstruktion laakerivoimien laskentakaavat nivelkulmien, etäisyyksien ja väliakselin pituuden funktiona on esitetty taulukossa 1. Laskentakaavat ovat olemassa vain tilanteille, jossa joko nivelkulmat ovat erisuuret, tai nivelkulmat ovat samansuuruiset, jolloin laakerien etäisyys nivelestä täytyy olla sama ensiö- ja toisioakselilla. Huomioitavaa on, että laakerivoimat syntyvät vaakatasoon, jos ensiö- ja toisioakseli ovat pystysuunnassa eri korkeudella.

Taulukko 1. Kaksinivelisen kardaniakselin laakerivoimat (Björk et al., 2014, s. 232).



3.2 Valssauksen laatuun vaikuttavat parametrit

Takamin et al. mukaan työvalssien taivutus on kriittisin parametri hyvän laadun aikaansaamisessa. Muita laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat eksentrisyys, nauhajännitys ja raon ohjaus. Reduktion suuruus oli tutkimuksessa viimeisillä pistoilla 22,5 prosenttia ja muilla pistoilla noin 30 prosenttia, eli samankaltaiset verrattuna tutkittavaan valssaimeen. Koska valssauskokeet oli tehty kovalla teräksellä, valssausnopeudet ja -voimat olivat suurempia. (Takami et al., 2011, s. 557, 565.)

3.3 Valssausvirheet

Valetun aihion viat voidaan jakaa seuraavasti: sisäiset viat, pintasäröt, pintaviat ja muotoviat. Sisäisiin vikoihin kuuluu esimerkiksi haurautta aiheuttavat epäpuhtaudet ja erilaiset säröt. Muotovikoja ovat muun muassa kuperaus, koveruus ja pituussuuntainen painauma. (Ginzburg & Ballas, 2000, s. 354–358.) Pintasäröt ja pintaviat eivät ole kriittisiä virheitä aihiossa, koska jyrksinnässä poistuu pintaviat sekä kuumavalssauksen aiheuttama valssihilse. Sisäiset viat ja muotoviat voivat olla edelleen aihiossa sen tullessa kylmävalssaukseen. Kylmävalssauksen jälkeen muotovioista tasomaisuus ja paksuustoleranssit määrittävät onko tuote hyväksyttävä.

Tarttumajäljet ovat yleisiä pintavikoja kylmävalssauksessa. Optimaalinen mykevyys nauhassa tarttumajälkien välttämiseksi on 40-60 μm . Jos mykevyys on alle 40 μm , tarttumajälkiä tulee tyypillisesti reunoihin johtuen kovasta paineesta valssauksessa. Mykevyyden ollessa liian iso muodostuu usein keskelle nauhaa kapeita ja voimakkaita jälkiä. Jos nauhan poikki-pintaprofiili on epäsymmetrinen eli kiilamainen, tarttumajälkiä syntyy tyypillisesti nauhan paksuimmalle alueelle. Optimaalisen nauhan mykevyyden lisäksi myötörajan alapuolella pidettävä valssausvoima ehkäisee tarttumajälkien muodostumista. (Wendt, Frech & Leifgen, 2007, s. 127–129.)

3.4 Kuparinauhan laatutoleranssit

Tutkittavalla valssaimella valssataan yleiseen käyttöön tulevia kuparituotteita, eli levyjä, nauhoja ja pyörylöitä, joille on oma standardi. Standardissa on kuparituotteille paksuustoleranssit, jotka on esitetty taulukossa 2. Taulukoissa esitetyt mitat ovat millimetreinä. Toleranssien avulla voidaan arvioida, aiheutuuko epäsymmetrisen taivutustarpeen johdosta standardin paksuustoleranssien ylittävä virhe.

Taulukko 2. Kylmävalssattujen tuotteiden paksuustoleranssit (EN 1652, 1997, s. 46).

Nimellispaksuus		Paksuustoleranssit nimellislevyysillä ¹⁾			
yli	enintään	enintään 350	yli 350 ja enintään 700	yli 700 ja enintään 1 000	yli 1 000 ja enintään 1 250
0,1 ²⁾	0,2	±0,018	–	–	–
0,2	0,3	±0,022	±0,03	±0,04	–
0,3	0,4	±0,025	±0,04	±0,05	±0,07
0,4	0,5	±0,030	±0,05	±0,06	±0,08
0,5	0,8	±0,040	±0,06	±0,07	±0,09
0,8	1,2	±0,050	±0,07	±0,09	±0,10
1,2	1,8	±0,060	±0,08	±0,10	±0,11
1,8	2,5	±0,070	±0,09	±0,11	±0,13
2,5	3,2	±0,080	±0,10	±0,13	±0,17
3,2	4,0	±0,10	±0,12	±0,15	±0,20
4,0	5,0	±0,12	±0,14	±0,17	±0,23
5,0	6,0	±0,14	±0,16	±0,20	±0,26
6,0	7,0	±0,16	±0,19	±0,23	±0,29
7,0	8,0	±0,18	±0,22	±0,26	±0,32
8,0	9,0	±0,20	±0,25	±0,29	±0,35
9,0	10,0	±0,22	±0,28	±0,32	±0,38

¹⁾ Seoksilla CuAl8Fe3 (CW303G), CuNi10Fe1Mn (CW352H), CuNi30Mn1Fe (CW354H) ja CuZn20Al2As (CW702R) paksuustoleranssit kerrotaan kertoimella 1,25 ja pyöristetään lähimpään 0,01 mm:iin.

²⁾ Sisältää paksuuden 0,1 mm.

HUOM. Paksuudet yli 10 mm sisältyvät standardiin EN 1653.

3.5 Valssauksen kustannustehokkuus

Raakakuparin hinta on 18.2.2015 5 712 USD/t (Taloussanomat, 2015a). Euron ja dollarin valuuttakurssi samana päivänä on 1,1346 (Taloussanomat, 2015b). Kuparin hinta euroina, eli dollarihinta jaettuna valuuttakurssilla, on pyöristettynä 5 034 euroa tonnia kohti eli 5,03 euroa per kilo. Valssaimella voidaan valssata tunnissa noin 10 000 – 30 000 kiloa kuparinauhaa. Kuparin kilohinta kerrottuna valssaimen kapasiteetillä kuvaa valssaimen läpi tunnissa kulkevan materiaalin arvon, joka on 50 300 – 150 900 euroa. Kuparin muokkauksesta maksettava muokkauslisä vaihtelee noin kymmenestä prosentista viiteenkymmeneen prosenttiin kuparin kilohinnasta. Valssaamossa kuparin hinta-arviointiin vaikuttaa sen tuotantovaihe.

Valssaimissa on suuret tuhansien kilowattien sähkömoottorit, joten energiakustannukset ovat suuret. Lisäksi kustannuksia tulee kunnossapidosta, valssausemulsiosta ja puhtaanapidosta. Tarkasteltaessa virheellisten tuotteiden taloudellista vaikutusta, kannattaa

arvioinnissa huomioida vain menetetty työaika sekä romuksi/uudelleensulatukseen menevän materiaalin arvo.

3.6 Vaihteisto

Tutkittavan valssaimen vaihteistossa on käytetty vinohampaisia lieriöhammaspyöriä. Vinohampaisten hammaspyörien etuna on tasainen käynti ilman välyksiä ja suurempi tehonsiirtokyky suorahampaiseen hammaspyörään verrattuna. Vinouskulma on yleensä 8-15 astetta. Vinosta hammastuksesta johtuen hammaspyöräparista aiheutuu suuria aksiaalivoimia, jotka voivat siirtyä ristinivelen yli ja aiheuttaa valssaukseen häiriöitä. Laakereiden kestoikä jää pieneksi, koska suuret radiaali- ja aksiaalivoimat aiheuttavat laakereihin suunnanvaihtoista johtuvaa väsyttävää kuormitusta. Vinohampaisen lieriöhammaspyörän kehävoima F_t lasketaan seuraavasti:

$$F_t = M_{vI}/r_{wI}, \quad (4)$$

missä M_{vI} on käyttävän hammaspyörän vääntömomentti [Nm] ja r_{wI} vierintäsäde [m]. Kehävoiman avulla voidaan laskea aksiaalivoima F_a :

$$F_a = F_t \tan\beta_h, \quad (5)$$

missä β_h on hampaiden vinouskulma [°] (Björk et al., 2014, s. 340, 343).

3.7 Yhteenveto kirjallisuuskatsauksesta

Kirjallisuuskatsauksessa etsittiin aiheuttajia epäsymmetrisen taivutuksen aiheuttamiin laatupoikkeamiin. Mahdollisia syitä löytyi kaksi; ristinivelen aiheuttamat laakerivoimat työvalssien laakereihin ja vinohampaisten hammaspyörien aiheuttama aksiaalikuormitus, joka voi siirtyä ristinivelen yli ja vaikuttaa valssaustapahtumaan. Lisäksi huomattiin, että työvalssien taivutus on kriittinen valssatun tuotteen laatua tarkasteltaessa. On siis syytä vertailla ristinivelestä aiheutuvia voimia taivutusvoimiin. Valssauksen kustannustehokkuutta tarkastellessa huomattiin, että tunnin aikana läpimenevän materiaalin arvo on jopa yli satatuhatta euroa.

4 TULOKSET

Tuloksissa esitetään taivutussylierien painemittausten tulokset, sekä lasketaan taivutussylierien voimat maksimitaivutuksella ja kuudennella pistolla. Lisäksi lasketaan karaanivälityksestä työvalsseihin aiheutuvat laakerikuormat. Lopussa dokumentoidaan puolistrukturoidun asiantuntijahaastattelun tulokset.

4.1 Painemittausten tulokset

Taulukossa 3 on taivutusprosentit ja ulostulopaksuudet kymmenellä eri pisto-ohjelmalla. Taivutusprosentti kertoo, kuinka monta prosenttia taivutussylierien paine on maksimista, eli 13,35 MPa:sta.

Taulukko 3. Taivutusprosentit ja ulostulopaksuudet kuudennella pistolla kymmenellä eri pisto-ohjelmalla.

Valssausohjelma	Ulostulopaksuus 6. pistolla [mm]	Taivutusprosentti t_i 6. pistolla [%]
Matta 0,7/1030	1,030	55
0,58/1030	0,880	40
0,6/1030	0,920	50
Matta 0,59/1030	0,910	45
0,62/1060	0,930	40
0,62/1145	0,950	25
0,64/1150	0,970	25
0,75/1030	1,070	40
0,8/1030	1,200	45
0,64/1030	0,980	40

Lasketaan taulukon 3 arvoilla taivutusprosentin aritmeettinen keskiarvo kuudennella pistolla, sekä taivutusprosentin keskihajonta keskiarvon keskivirheen laskemiseksi. Taivutusvoimien laskennassa käytetään taivutusprosentin aritmeettista keskiarvoa.

Aritmeettinen keskiarvo lasketaan seuraavasti:

$$t_6 = \frac{\sum t_i}{n}, \quad (6)$$

missä t_i on taivutusprosentti kuudennella pistolla eri ohjelmilla ja n on mitattujen pisto-ohjelmien lukumäärä. Lasketaan taivutusprosentin aritmeettinen keskiarvo t_6 kuudennella pistolla:

$$t_6 = \frac{55+40+50+45+40+25+25+40+45+40}{10} = 40,5 \%$$

Keskihajonta s lasketaan seuraavasti:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (t_i - t_6)^2}{n}}, \quad (7)$$

missä t_i on taivutusprosentti kuudennella pistolla kullakin ohjelmalla. Lasketaan taivutusprosentin keskihajonta:

$$s = \sqrt{\frac{2*(25-40,5)^2 + 4*(40-40,5)^2 + 2*(45-40,5)^2 + (50-40,5)^2 + (55-40,5)^2}{10}} \approx 9,069 \%$$

Keskiarvon keskivirhe s_x lasketaan seuraavasti:

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

missä s on taivutusprosentin keskihajonta. Lasketaan taivutusprosentin keskiarvon keskivirhe s_x :

$$s_x = \frac{9,069}{\sqrt{10}} \approx 2,868 \%$$

Keskiarvon yläraja:

$$t_{6,max} = 40,5 \% + 2,868 \% = 43,368 \%$$

Keskiarvon alaraja:

$$t_{6,min} = 40,5 \% - 2,868 \% = 37,632 \%$$

Taulukossa 4 lasketaan taivutussylinterien männän ja männänvarren pinta-alat, joita tarvitaan taivutusvoimien laskennassa. Taulukossa 5 lasketaan taivutusvoimat, jotka kohdistuvat työvalssien päihin. Molempien työvalssien päässä on kaksi taivutussylinteriä, joten lasketaan kahden sylinterin yhteenlaskettu voima.

Taulukko 4. Taivutussylinterien männän ja männänvarren pinta-alat.

Osa	Säde	Pinta-alan kaava	Pinta-ala
Mäntä	$r_m=50$ mm	$A_m=\pi*r_m^2$	$A_m=\pi*50\text{mm}^2\approx 7854,0$ mm ²
Männänvarsi	$r_v=25$ mm	$A_v=\pi*r_v^2$	$A_v=\pi*25\text{mm}^2\approx 1963,5$ mm ²

Taulukko 5. Taivutusvoimat.

	Laskukaava	Yhden sylinterin voima	Kahden sylinterin voima
Taivutusvoiman maksimi	$F=p*(A_m-A_v)$	$F=13,35\text{N/mm}^2*(7854,0\text{mm}^2-1963,5\text{mm}^2)\approx 78\ 638,2$ N	78 638,2 N *2 =152 276,4 N
Taivutusvoima kuudennella pistolla	$F=\frac{t_6}{100}*p*(A_m-A_v)$	$F=\frac{40,5}{100}*13,35\text{N/mm}^2*(7854,0\text{mm}^2-1963,5\text{mm}^2)\approx 31\ 848,5$ N	31 848,5 N *2 =63 697 N
Taivutusvoima kuudennella pistolla, yläraja	$F=\frac{t_{6,max}}{100}*p*(A_m-A_v)$	$F=\frac{43,368}{100}*13,35\text{N/mm}^2*(7854,0\text{mm}^2-1963,5\text{mm}^2)\approx 34\ 103,8$ N	34 103,8 N *2 =68 207,6 N
Taivutusvoima kuudennella pistolla, alaraja	$F=\frac{t_{6,min}}{100}*p*(A_m-A_v)$	$F=\frac{37,632}{100}*13,35\text{N/mm}^2*(7854,0\text{mm}^2-1963,5\text{mm}^2)\approx 29\ 593,1$ N	29 593,1 N *2 =59 186,2 N

4.2 Kardanivälityksestä aiheutuvat laakerivoimat

Kardanivälityksestä aiheutuu ensiö- ja toisioakselin laakereille radiaalivoimia. Ensiö- ja toisioakselit ovat lähes suorassa linjassa, joten nivelkulmat ovat samat molemmilla

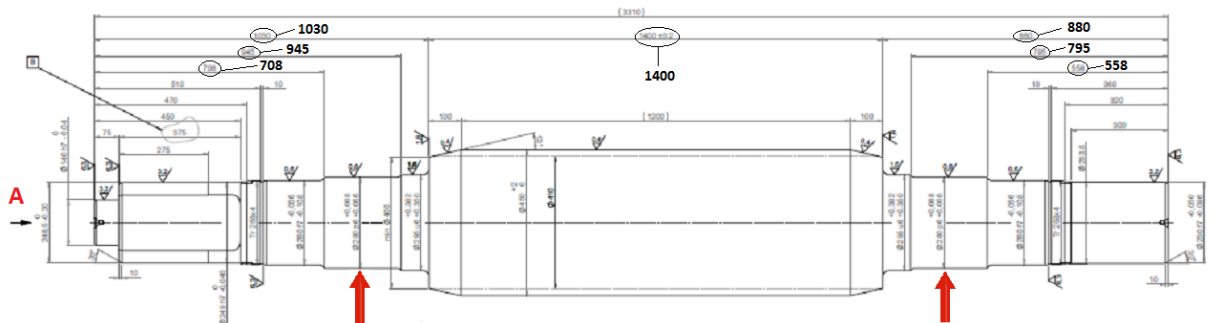
nivelillä. Laakerivälit ovat kuitenkin eripituiset ensiö- ja toisioakselilla, joten laskentaan ei voida käyttää suoraan kaksiniveliselle kardaanivälitykselle tarkoitettua kaavaa taulukosta 1.

Laskentaa varten tarvitaan vääntömomentti sekä nivelkulma. Valssiraosta mitattu kokonaismomentti seitsemän piston ohjelmalla oli ensimmäisellä pistolla 172, 65 kNm ja kuudennella pistolla 81,22 kNm. Kun kokonaismomentti jaetaan puoliksi kahdelle akselille, saadaan ensimmäisen piston valssaussmomentiksi $T_1=86, 33$ kNm ja kuudennen piston momentiksi $T_6=40,61$ kNm. Nivelkulma saatiin valssaimen piirustuksista. Nivelkulma β työvalssien ollessa kiinni toisissaan on 4,83 astetta. Taulukossa 6 on esitetty kardaanivälityksen aiheuttama taivutusmomentti työvalssin päähän.

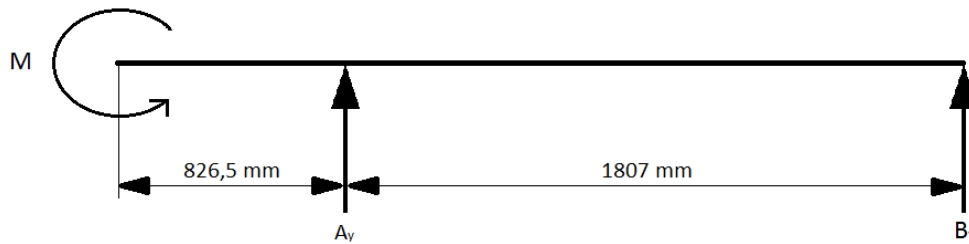
Taulukko 6. Kardaanivälityksen aiheuttamat taivutusmomentit työvalsseilla.

	Kaava	Tulos
1. pisto	$M_{1max}=T_1*\sin\beta$	$M_{1max}=86\ 330\text{Nm}*\sin(4,83^\circ)\approx 7\ 268,95\text{Nm}$
6. pisto	$M_{6max}=T_6*\sin\beta$	$M_{6max}=40\ 610\text{Nm}*\sin(4,83^\circ)\approx 3\ 419,35\text{Nm}$

Kun taivutusmomentti työvalssin päässä tiedetään, voidaan Newtonin ensimmäisen lain avulla laskea laakereiden tukivoimat. Laakereiden tukivoimat ovat vaakatasossa eli valssaussuunnassa. Kuvassa 10 esitetään työvalssien valmistuspiirustus, johon on merkitty laakeroinnin keskikohdat ja vaihteiston pääty, johon momentti kohdistuu, kirjaimella A. Kuvassa 11 on vapaakappalekuva työvalssista.



Kuva 10. Työvalssin valmistuspiirustus (mukaillen: Aurubis Finland Oy).



Kuva 11. Ylätyövalssin vapaakappalekuva. M on ristinivelen aiheuttama momentti [Nm] ja A_Y sekä B_Y laakereiden tukivoimat [N].

Kuvassa 11 esitetty vapaakappalekuva on ylätyövalssille. Alatyövalssilla laakerin ja ristinivelen välinen etäisyys on pidempi, mutta kuten laskennasta huomataan, ei tällä ole vaikutusta ristinivelmekanismiin aiheuttamaan laakerikuormitukseen. Lasketaan laakerivoimat Newtonin ensimmäisen lain mukaan:

$$\sum F_Y = 0, \quad (9)$$

missä F_Y kuvaa y-akselin suuntaisia voimia.

$$+\uparrow \sum F_Y = 0 \rightarrow A_Y + B_Y = 0 \rightarrow A_Y = -B_Y$$

Myös kappaleeseen vaikuttavien momenttien summa on nolla:

$$\sum M_A = 0, \quad (10)$$

missä M_A kuvaa kappaleeseen vaikuttavia momentteja pisteen A suhteen.

$$\sum M_A = M + B_Y * 1,807 \text{ m} \rightarrow B_Y = \frac{-M}{1,807 \text{ m}}$$

Laakerivoimat B_Y ja A_Y ensimmäisellä pistolla:

$$B_Y = \frac{-M_{1max}}{1,807 \text{ m}} = \frac{-7\,268,95 \text{ Nm}}{1,807 \text{ m}} \approx -4\,022,7 \text{ N}$$

$$A_Y = -(-4\,022,7 \text{ N}) = 4\,022,7 \text{ N}$$

Laakerivoimat B_Y ja A_Y kuudennella pistolla:

$$B_Y = \frac{-M_{6max}}{1,807m} = \frac{-3\,419,35Nm}{1,807m} \approx -1\,892,3\text{ N}$$

$$A_Y = -(-1\,892,3\text{ N}) = 1\,892,3\text{ N}$$

4.3 Haastattelututkimuksen tulokset

Haastattelun tulokset on jaettu viiteen eri kategoriaan teemojen mukaan. Haastattelu eteni hyvin pitkälti haastateltavien ehdoilla ja teemoja tuli käsiteltyä monipuolisesti haastateltavien tietämyksen puitteissa.

Ensimmäisenä ja toisena teemana oli tutkittavan ongelman aiheuttamien laatupoikkeamien lukumäärä ja kuinka suuri osa laatupoikkeamista menee uudelleensulatukseen. Valssajaan mukaan jokaisessa rullassa alkaa esiintyä noin yhden millimetrin paksuudessa aaltoilua valssajaan puolella. Rullia kuitenkin menee harvoin uudelleensulatukseen, mutta isompana ongelmana on rullan epäsymmetrisen poikkipintaprofiilin aiheuttamat hankaluudet seuraavilla koneilla, koska nauhat eivät kulje keskellä linjastoja.

Teknologiajohtaja ehdotti uudelleensulatukseen menevien rullien määrän varmistamista käymällä läpi vuoden 2014 laaturomutukseen johtaneet muotovirheet. Tutkittavalla valssaimella koko vuoden aikana rullia ja laattoja oli merkitty romuksi yhteensä 28 rullaa. Epäsymmetrisen taivutustarve esiintyy vain yli 980 millimetriä leveillä nauhoilla ja alle yhden millimetrin paksuuksissa. Vain kaksi leveätä ja ohutta rullaa täytti tunnusmerkit. Molemmat olivat loppumitaltaan 0,14 mm ja 1130 mm leveitä. Molemmat rullat oli kylmävalssattu jo kertaalleen aiemmin, joten nauhat olivat alle millimetrin paksuudessa jo valssille tullessaan. Yhteensä nämä kaksi rullaa painoivat 10 150 kg.

Kolmantena ja neljäntenä teemana olivat vanhan nivelkonstruktion laatupoikkeamat sekä rakenneosien kestävyys. Valssajaan mukaan vanhalla nivelkonstruktioilla ei esiintynyt samanlaisia laatupoikkeamia kuin kardaanivälityksellä. Valssaja kertoi, että laakereita ei ole vaihdettu kardaanivälityksen asennuksen jälkeen, mutta valssaussuuntaa vaihdettaessa kuuluu kolinaa ja valssaja epäili, että työvalssien laakereissa on hieman välystä. Teknologiajohtaja sanoi, että hänen korviinsa ei ole kantautunut ongelmia rakenneosien kestävyiden kanssa.

Viimeisenä keskusteltiin laatupoikkeamien mahdollisesta syystä. Valssaajalta tuli paljon ehdotuksia mahdollisesta ongelman aiheuttajasta. Vanhassa konstruktiossa oli keventäjät, jotka kannattelivat osaa akselien massasta. Kardaaniakseleilla ei ole keventäjiä, joten niiden massa kohdistuu alatyövalssiin ja sitä kautta taivutus- ja raonsäätösylintereille. Kardaanivälityksen toisioakselit eivät ole samanpituiset, joten valssaaja arveli, että tämä saattaa muodostaa erisuuriset voimat työvalssien laakereille. Valssiraon mukaan liikkuvassa ylätyövalssissa aksiaaliliike toteutetaan väljällä liitoksella ja voiteluaineella ja valssaajan mielestä tämä ei riitä. Työvalsseja vaihdettaessa näkee, kuinka voiteluaine on palanut kiinni liitoksen kohdalta.

Valssaajan mukaan nauha ei kulje keskellä linjastoa, vaan hakeutuu parittomilla pistoilla ja parillisilla pistoilla eri puolille. Valssaajan kertoi, että käyttömukavuus on huonontunut, koska nauhan profiilia joutuu jatkuvasti tarkkailemaan ja säätämään käsin taivutuksilla ja kallistuksella. Lisäksi valssaaja sanoi, että hyvä laatu olisi kilpailukyvyn kannalta oleellista, ei niinkään kilomäärät.

Valssaajan kanssa keskusteltaessa esiin nousi myös mielenkiintoinen seikka. Kun vaihteiston puolelta kytkettiin yksi taivutussylinteri ylhäältä ja alhaalta pois, laatupoikkeamat hävisivät.

5 POHDINTA

Pohdinnassa analysoidaan tuloksia ja tehdään johtopäätöksiä. Lisäksi tarkastellaan tutkimuksen luotettavuutta, eli objektiivisuutta, reliabiliteettia ja validiteettia. Lopuksi käydään läpi tutkimuksen aikana heränneitä ajatuksia mahdollisista jatkotutkimusaiheista.

5.1 Johtopäätökset

Tutkimuksen pääkysymys oli: *”Aiheuttaako ristinivel taivutuskuormaa työvalsseihin?”*. Kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin, että ristinivel aiheuttaa taivutuskuormaa työvalsseihin. Työvalssin päähän kohdistuva taivutusmomentti aiheuttaa laakereihin kohdistuvia voimia, jotka ovat vaakatasossa.

Tutkimuskysymyksissä pohdittiin myös: *”Miten mahdollinen taivutuskuorma vaikuttaa kuparinauhan laatuun?”* ja *”Mikä on taivutuskuorman lukuarvo, jolla on merkittävä vaikutus valssaustulokseen?”*. Tarkastellaan aluksi laakerivoimien suuntia. Ristinivelen aiheuttamien laakerivoimien suunta on vaakatasossa, joten ne eivät kohdistu kuormitusta taivutussyhintereihin tai valssattavaan aihioon, eivätkä siten vaikuta suoraan valssattavan aihion poikkipinta-alaan.

Taivutusvoiman maksimi on 152 276,4 N ja laakerivoima ensimmäisellä pistolla 4 022, 7 N. Laakerivoima on alle kolme prosenttia taivutusvoimasta. Vastaavasti kuudennella pistolla taivutusvoima on 63 697 N ja laakerivoima 1 892, 3 N, eli laakerivoima on noin kolme prosenttia taivutusvoimasta. Pitää muistaa, että tässä tarkasteltiin vain työvalssin toista päätä. Kun otetaan huomioon, että työvalssin toisessa päässä vaikuttaa myös laakerivoima vastakkaiseen suuntaan, kertaantuu ristinivelen aiheuttamien laakerivoimien vaikutus. Taivutusvoimissa hyvinkin pienet erot vaikuttavat nauhan laatuun, joten voidaan olettaa, että ristinivelestä aiheutuvat kuormat, vaikkakin ovat vaakasuuntaisia, voivat vaikuttaa jollain tavalla valssatun tuotteen laatuun, mutta ei suoraan sen poikkipintaprofiiliin.

Jos valssirako olisi koko ajan pienempi esimerkiksi valssaajan puolelta, nauha ajautuisi sekä parittomilla että parillisilla pistoilla vaihteiston puolelle. Näin ei kuitenkaan ole.

Haastattelussa selvisi, että nauha ajautuu eri puolille linjastoa parillisilla ja parittomilla pistoilla. Ristinivelen aiheuttamat vaakasuuntaiset laakerivoimat vaihtavat suuntaansa valssaussuuntaa vaihdettaessa, joten tämä voisi selittää, miksi nauha ajautuu eri puolille linjastoa. Valssaaja myös kertoi haastattelussa, että valssaimesta kuuluu kolinaa suuntaa vaihtaessa. Tämä voisi johtua laakerivällyksestä, joten ristinivelen aiheuttamien voimien vaihtaessa suuntaa, työvalssien asento muuttuu hieman. Jos nauhan suuntausta pyritään korjaamaan kallistamalla valsseja, aiheutuu nauhan poikki-pintaprofiiliin virhe. Tämä virhe voi kertaantua ja alkaa näkymään vasta nauhan tullessa ohuemmaksi noin yhden millimetrin paksuudessa.

Haastattelussa kävi ilmi, että epäsymmetrinen taivutustarve ja laatu-poikkeamat häviävät, jos vaihteiston puolelta kytketään yksi sylinteri ylhäältä ja yksi alhaalta pois käytöstä. Kun taivutussylintereitä kytketään pois päältä vaihteiston päädyistä, aiheuttaa se suuremman voiman kohti valssirakoa. Tällöin valssirako pienenee vaihteiston päädyistä ja suurenee valssaajan puolelta.

Neljäntenä tutkimuskysymyksenä oli: *”Miten taivutuskouroma vaikuttaa rakenneosien kestoikään?”*. Haastattelussa selvitettiin, että rakenneosien kestävyudessa ei ole ollut ongelmia, mutta valssaaja epäili työvalssin laakereissa olevan hieman vällystä.

Taloudellista näkökulmaa tutkimuksessa tarkasteltiin tutkimuskysymyksellä: *”Mikä on laatu-poikkeamien merkitys kustannustehokkuutta tarkasteltaessa?”*. Haastattelun sekä laaturomutuksen perusteella voidaan arvioida, että uudelleensulatukseen menevien rullien arvo on lähinnä muodollinen. Vuodelta 2014 tutkittavan ongelman aiheuttamien laaturomutusten määrä oli 10 150 kg ja kuparin pörssihinta 18.2.2015 5,03 €/kg. Vuoden aikana uudelleensulatukseen menevän materiaalin hinta oli 51 054,50 € eli tästä maksettava muokkauslisä olisi ollut noin viiden tuhannen ja kahdenkymmenen tuhannen euron välillä. Todellinen hinta riippuu kuparin laadusta sekä miten pitkälle tuote on jalostettu. Uudelleensulatukseen menevä materiaalin arvo on kuitenkin niin pieni verrattuna valssaimen tuntikapasiteettiin, että todellisella hinnalla ei ole suurta merkitystä.

Suurin ongelma laatu-poikkeamissa on hankaluudet seuraavissa prosessivaiheissa. Epäsymmetrinen poikki-pintaprofiili vaikeuttaa nauhan ohjaamista keskellä linjastoa. Tätä

kautta voi syntyä myös romua, vaikka romun syntypaikka ei periaatteessa ole Achenbach-valssain.

5.2 Objektiivisuus

Objektiivisuus on varmistettu muun muassa tutkimusmetodiikan tarkalla kuvauksella, jotta tutkimus on mahdollista toistaa. Haastatteluosiossa tutkija oli lähinnä kuuntelijan roolissa, joten tutkija ei ohjailut haastateltuja omien mielipiteidensä mukaan, vaan esitti teemoja, joista halusi haastateltavien kertovan. Tutkimuksen kvantitatiivinen osa, eli painemittaukset, on objektiivinen.

5.3 Reliabiliteetti ja validiteetti

Reliabiliteetti eli mittausten tarkkuus voidaan arvioida vain kvantitatiivisessa tutkimuksessa. Tämän tutkimuksen kvantitatiivisessa osassa reliabiliteettitarkastelu toteutettiin ottamalla laskennassa huomioon keskiarvon keskivirhe. Ristinivelmekanismin aiheuttamien voimien laskentaan oli useita erilaisia vaihtoehtoja, joten tämä saattaa aiheuttaa epätarkkuutta tuloksiin. Tutkimuksen validiteetti varmistettiin asettamalla tutkimuskysymykset työn alussa työnteettäjän kanssa ja tarkastamalla lopuksi, että kaikkia tutkimuskysymyksiä oli tutkittu ja niihin oli saatu vastaus.

5.4 Jatkotutkimusaiheet

Yksi jatkotutkimusaihe voisi olla vaihteiston vinohampaisten hammaspyörien aiheuttaman aksiaalivoiman vaikutukset valssaustapahtumaan. Siirtyessään kardaanivälityksen yli aksiaalivoimat voivat aiheuttaa työvalsseihin voimia, jotka vaikuttavat valssattavan nauhan poikkipintaprofiiliin.

Toinen aihe voisi olla työvalssien taivutuksen kompensoinnin tutkiminen ja suunnittelu. Koska epäsymmetrinen taivutustarve häviää, jos vaihteiston puolelta kytketään yksi sylinteri ylhäältä ja alhaalta pois käytöstä, voisi taivutusjärjestelmän suunnitella uudestaan. Tällä hetkellä kaikille kahdeksalle taivutussyylinterille menee sama paine, mutta järjestelmän voisi suunnitella siten, että vaihteiston puolen taivutussyylinterien voima on puolet tai jonkin verran pienempi. Tämä tulisi kuitenkin sulauttaa nykyiseen järjestelmään siten, että taivutukset ovat edelleen säädettävissä yhdestä napista, jotta valssaajan työkuorma pysyy kohtuullisena.

Kolmas tutkimusaihe voisi olla kardaniakseleiden massan vaikutus valssaustapahtumaan ja mahdollisten keventäjien suunnittelu. Vanhassa konstruktiossa keventäjän ottivat osan akseleiden massasta vastaan. Kardanivälityksellä alatyövalssille kohdistuva massa kohdistuu tukivalssin päälle ja ylätyövalssille kohdistuva massa kohdistuu valssattavaan nauhaan.

Neljäs aihe voisi olla aksiaaliliikkeen sallimiseen suunnitellun konstruktion tutkiminen. Koska voiteluaine palaa hyvinkin nopeasti työvalssin ja voimansiirtoakselin liitoksesta, voisi tutkia aksiaaliliikkeen aiheuttamia kitkavoimia ja niiden vaikutusta valssaustapahtumaan.

Kuten useista jatkotutkimusehdotuksista voi huomata, tässä tutkimuksessa selvitettiin vain pieni osa valssauksen laatuun vaikuttavista tekijöistä. Kaikkien laatuun vaikuttavien tekijöiden tutkiminen olisi huomattavasti kandidaatintyötä suurempi kokonaisuus.

6 YHTEENVETO

Tutkimuksen toimeksiantajana toimi Aurubis Finland Oy. Tässä tutkimuksessa haettiin ratkaisuja Porin kylmävalssaamon Achenbach-valssaimessa esiintyvään epäsymmetriseen taivutustarpeeseen. Valssattavat nauhat alkavat aaltoilla valssaajan puolelta noin yhden millimetrin paksuudessa. Tutkimuksen tarkastelu rajattiin koskemaan voimansiirron ristiniveltä, jonka epäiltiin olevan yksi mahdollinen ongelman aiheuttaja.

Tutkimuskysymyksiä asetettiin viisi. Pääkysymyksenä oli: *”Aiheuttaako ristinivel taivutuskuormaa työvalsseihin?”*. Pohdittiin myös *”Miten mahdollinen taivutuskuorma vaikuttaa kuparinauhan laatuun?”* ja *”Mikä on taivutuskuorman lukuarvo, jolla on merkittävä vaikutus valssaustulokseen?”*. Taloudellista näkökulmaa tarkasteltiin tutkimuskysymyksellä: *”Mikä on laatupoikkeamien merkitys kustannustehokkuutta tarkasteltaessa?”*. Lisäksi tutkittiin *”Miten taivutuskuorma vaikuttaa rakenneosien kestoikään?”*.

Triangulaation avulla varmistettiin tutkimuksen luotettavuus. Käytettävät menetelmät olivat kirjallisuustutkimus, painemittaukset ja puolistrukturoitu haastattelu. Kirjallisuustutkimuksen avulla haettiin ristinivelelle mitoitusyhtälöt ja toiminnalliset reunaehdot. Painemittaukset olivat tutkimuksen kvantitatiivinen osa. Asiantuntijahaastattelun avulla arvioitiin taloudellisia vaikutuksia ja tarkempia yksityiskohtia laatupoikkeamista.

Kirjallisuustutkimuksessa huomattiin, että voimansiirron ristinivel ei aiheuta työvalsseihin pystysuuntaisia voimia, jotka vaikuttaisivat suoraan valssirakoon ja tätä kautta valssattavan nauhan poikki-pintaprofiiliin. Sen sijaan ristinivelestä aiheutuvat vaakasuuntaiset voimat voivat vaikuttaa nauhan kulkeutumiseen linjaston reunalle. Jos nauhaa yritetään ohjata keskemälle kallistuksilla, vaikuttaa tämä poikki-pintaprofiiliin virheellisesti. Virheellinen poikki-pintaprofiili voi kertaantua ja alkaa näkymään vasta noin yhden millimetrin paksuudessa, jolloin nauha alkaa aaltoilla.

Laatupoikkeamien taloudellinen merkitys oli pieni. Suurin ongelma laatupoikkeamissa oli hankaluudet prosessin seuraavissa vaiheissa, koska epäsymmetrinen poikkipintaprofiili ohjaa nauhaa linjaston reunaan. Rakenneosien kestoiässä ei havaittu ongelmia, mutta työvalssien laakereissa epäiltiin olevan väljyyttä.

LÄHTEET

Aurubis Finland Oy. Pori. Kylmävalssaamon arkisto. Aineisto 1960-luvulta alkaen.

Aurubis. Overview [Aurubiksen www-sivuilla]. [Viitattu 2.4.2015]. Saatavissa: <https://www.aurubis.com/site/en/en/shared/corp/about-aurubis/overview>

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J. & Salonen, P. 2014. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 517 s.

EN 1652. 1997. Copper and copper alloys – Plate, sheet, strip and circles for general purposes. Bryssel: European Committee For Standardization. 53 s.

Ginzburg, V. B. & Ballas, R. 2000. Flat rolling fundamentals. New York: CRC Press. 843 s.

Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 2005. Valmistustekniikka. 11. painos. Helsinki: Hakapaino Oy. 490 s.

ISO 1940-1. 2003. Mechanical vibration — Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state — Part 1: Specification and verification of balance tolerances. Geneve: International Organization for Standardization. 28 s.

Peltonen, R. 2015. Teknologiajohtaja, Aurubis Finland Oy. Pori, Aurubis Finland Oy:n kylmävalssaamo. Haastattelu 2.3.2015. Haastattelijana Santtu Koivula.

Levo, J. 2015. Valssaaja, Aurubis Finland Oy. Pori, Aurubis Finland Oy:n kylmävalssaamo. Haastattelu 2.3.2015. Haastattelijana Santtu Koivula.

Takami, K. M., Mahmoudi, J., Dahlquist, E. & Lindenmo, M. 2011. Multivariable data analysis of a cold rolling control system to minimise defects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, Iss. 5-8. S. 553-565.

Taloussanomat. 2015a. Raaka-aineet [Taloussanomat [www-sivuilla](http://porssi.taloussanomat.fi)]. [Viitattu 18.2.2015].
Saatavissa: <http://porssi.taloussanomat.fi/commodities/>

Taloussanomat. 2015b. Valuutat [Taloussanomat [www-sivuilla](http://porssi.taloussanomat.fi)]. [Viitattu 18.2.2015].
Saatavissa: <http://porssi.taloussanomat.fi/currencies/>

Wendt, P., Frech, W. & Leifgen, U. 2007. Cold rolling defect, “stickers” and countermeasures. *Heat Processing*, 2007: 2. S. 127–129.

Wuolijoki, J. 1972. *Koneenelinoppi*. 1 osa. Perusteet-Liitoselimet, Akselit-Laakerit. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava. 403 s.