LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Jaakko Joensuu

KAKSOISKARTIOJAUHIMEN TOIMINNAN PARANTAMINEN HAVUPUUMASSAN JAUHATUKSESSA HIENOPARERIKONEELLA

Työn tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen
Professori Juha Varis

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Jaakko Joensuu

Kaksoiskartiojauhimen toiminnan parantaminen havupuumassan jauhatuksessa hienopaperikoneella

Diplomityö

2017

105 sivua, 55 kuvaa, 7 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Dosentti Harri Eskelinen
Professori Juha Varis

Hakusanat: kaksoiskartiojauhin, havupuumassan jauhatus, matalasakeusjauhatus, jauhatusjärjestelmä, jauhatustapahtuma, jauhinterät, hienopaperikone

Paperin perusraaka-aineena käytettävien havupuukuitujen jauhatus on osa paperikoneen massankäsittelyä ja yksi tärkeimmistä valmistettavan paperin laatuun vaikuttavista paperikoneen osaprosesseista. Havupuumassan jauhatuksessa päätavoitteena on jauhettavien havupuukuitujen kemiallisen ja fysikaalisen rakenteen muuttaminen siten, että havupuukuitujen sidostenmuodostamiskyky parantuu, mikä mahdollistaa riittävän lujuusominaisuudet sisältävän paperin valmistuksen. Jauhatus suoritetaan jauhintyypistä riippumatta mekaanisesti metallisten jauhinterien välissä, joiden ominaisuuksiin vaikuttavat jauhettavan massan laatu, jauhatustapa sekä jauhatusolosuhteet. Perinteisten jauhintyyppien rinnalle on kehitetty toimintaperiaatteeltaan kaksoislevyjauhimen kaltainen kaksoiskartiojauhin, minkä toimintaan ja rakenteeseen tässä tutkimuksessa syvennytään.

Tutkimuksen päätavoitteena oli kaksoiskartiojauhimen toiminnan parantaminen siten, että jauhettava havupuumassa jakaantuu kaksoiskartiojauhimen molemmille jauhatusalueille mahdollisimman tasaisesti. Lisäksi tutkimuksessa tutkittiin jauhinterien vaurioitumiseen johtaneita mahdollisia fyysisiä teräkosketuksia jauhimen pysäytys- ja käynnistysvaiheesta. Tutkimuksen perusteella todettiin, että kaksoiskartiojauhimen käynnistysvaihe on suoritettava erilailla kuin perinteisen kartiojauhimen, jotta mahdollisilta jauhinterien fyysisiltä teräkosketuksilta vältytään. Havupuumassan jakaantuminen tasaisesti molemmille jauhatusalueille on riippuvainen jauhatusalueiden välisten jauhatusolosuhteiden identtisyydestä, johon vaikuttavat useat eri jauhatustekijät. Kaksoiskartiojauhimella suoritetuilla ajokokeilla tutkittiin säädettävissä olevien jauhatustekijöiden vaikutusta kaksoiskartiojauhimen jauhatustapahtuman onnistumiseen. Ajokokeiden tuloksien perusteella muodostettiin kaksoiskartiojauhimelle uusi ajotapa kohdepaperikoneen toimintaympäristössä, jonka avulla saavutettiin parempi virtausjakauma jauhatusalueiden kesken. Myös kaksoiskartiojauhimen käynnistysvaihetta muutettiin siten, että jatkossa kohdepaperikoneella vältytään jauhinterien fyysisiltä teräkosketuksilta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jaakko Joensuu

Improving the performance of a double conical refiner on softwood pulp refining in fine paper machine

Master's Thesis

2017

105 pages, 55 figures, 7 tables and 4 appendix

Examiners: Associate professor Harri Eskelinen
Professor Juha Varis

Keywords: Double conical refiner, softwood pulp refining, low-consistency refining, refining action, refiner fillings, refining system, fine paper machine

Pulp containing softwood fibers is the primary raw material of paper. Pulp refining is a part of the paper machine's pulp treatment operations and one of the most important sub-process of papermaking, which effects are seen on paper grades. The main target of softwood refining is to change the chemical and the physical structure of softwood fibers. As a result, the structure changes develop the bonding abilities of fibers, which improves strength properties of the manufactured paper. Regardless of the refiner type, refining is a mechanical fiber treatment, which is carried out between metallic refining fillings. Every type of refiners contain refiner bars with fillings, which are selected according to the quality of pulp, refining personality and refining circumstances. As an extension of the traditional refiners there has been made a double conical refiner which works like a double disk refiner. This thesis intends to explore working principle and structure of the less common double conical refiner.

The main objective of this thesis was to improve performance of a double conical refiner the way that softwood pulp flow splits between two refining areas as equally as possible. In addition this thesis examines the refiner filling damages caused by bar to bar contacts on refiner shut downs and start-ups. Based on investigations it can be stated that the double conical refiner must be started in a different way than the traditional conical refiner, in order to avoid filling contacts. Equal splitting of the flow between two refining areas depends on the identity of refining circumstances, which are influenced by different refining factors. There has been made multiple refining trials in this thesis that examined correlations between adjustable refining factors and flow slit between refining areas. Based on the trial returns there has been made a new operating mode on double conical refiner of the studied paper machine. New operating mode contains way better flow split between refining areas than the original one. Start-up of a double conical refiner has also been under modification, so that the filling damages during refiner start-up time can be avoided in the future.

ALKUSANAT

Haluan kiittää työn tilaajaa haastavan ja mielenkiintoisen diplomityöaiheen tarjoamisesta sekä koko kohdepaperikoneen työyhteisöä diplomityön suorittamisen mahdollistamisesta normaalien työtehtävieni ohella. Iso kiitos kuuluu myös työn tarkastajille Harri Eskeliselle ja Juha Varikselle. Unohtaa ei voi myöskään automaatiokunnossapidon ex-aluesuunnittelijan kanssa suoritettua yhteistyötä eikä varsinkaan mekaanisen kunnossapidon kapellimestareilta saatua viiltävää henkistä tukea. Lisäksi haluan kiittää lukuisissa tuotannon pysäytyksissä jauhimen parissa työskennelleitä kunnossapidon asentajia ja osaston käyttöinsinöörejä työn toteutuksen vaatimien muutoksien hyväksymisestä sekä kirjallisen työn kommentoinnista ja ohjaamisesta.

Diplomi-insinööriksi valmistumiseni on ollut kaiken kaikkiaan monen eri vaiheen värittämä ja mukaan mahtuu sekä haastavia, että hyviäkin hetkiä. Kokonaisuudessaan ”via dolorosa” on nyt ohitse, eikä siitä olisi selvitty ilman huikeita opiskelijatovereita ja opiskelijamaailmasta toisaalla olleita ystäviä, kiitos heille. Suuri kiitos kuuluu myös vanhemmilleni, jotka ovat jaksaneet kannustaa ja tukea minua koko opiskeluaikani.

Jaakko Joensuu
Jämsässä 25.4.2017

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ALKUSANAT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO
1 JOHDANTO ... 10
1.1 Työn tavoite, rakenne ja rajaus ... 11
1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset ... 12
2 KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT ... 14
3 HAVUPUUMASSAN JAUHATUS ... 16
3.1 Jauhatusteoriat ... 16
3.1.1 Ominaissärmäkuormateoria ... 18
3.1.2 Ominaispintakuormateoria ... 20
3.2 Jauhatustapahtuma ... 21
3.3 Jauhatuksen vaikutukset kuitujen rakenteeseen ... 24
3.3.1 Kuitujen lyheneminen ... 24
3.3.2 Kuitujen suoristuminen ... 25
3.3.3 Sisäinen fibrillaatio ... 26
3.3.4 Ulkoinen fibrilliaatio ja hienoaineen syntyminen ... 28
3.4 Kuitujen jauhautuneisuuden mittaaminen ... 29
3.4.1 Suotautuvuus ... 30
3.4.2 Kuidun pituus ... 31
3.4.3 Kuidun suoruus ... 32
3.4.4 Fibrilloitumisaste ... 33
3.4.5 Massa-analysaattori ... 34
4 JAUHATUSJÄRJESTELMÄ ... 36
4.1 Jauhintyypit ... 38
4.1.1 Kartiojauhin ... 38
4.1.2 Levyjauhin ... 40
4.1.3 Jauhatuspinta-alat ja virtaukset ... 42

4.2 Jauhinterät yleisesti ... 44
4.2.1 Terägeometriat ... 45
5 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN TOIMINTAPERIAATE JA RAKENNE ... 50
5.1 Pumppaustila ... 52
5.2 Akselipaketti ja laakerointi ... 56
5.3 Mekaaninen tiiviste ... 57
5.4 Jauhinterät ... 60
5.5 Ohjausjärjestelmä ja liikkuva staattori ... 62
5.6 Toimintaperiaatteen ja rakenteen asettamat vaatimukset ... 63
6 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN TOIMINTAYMPÄRISTÖ JA TOIMINNALLISET ONGELMAT ... 67
6.1 Havumassan jauhatusjärjestelmä kohdepaperikoneella ... 67
6.1.1 Prosessiputkisto ... 69
6.1.2 Havupuumassan takaisinkierrätys ... 70
6.2 Toiminnalliset ongelmat kohdepaperikoneella ... 71
6.2.1 Virtauksien epätasainen jakautuminen ... 72
6.2.2 Terien vaurioituminen ... 73
7 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN PYSÄYTYS- JA KÄYNNISTYSVAIHE ... 75
7.1 Pysäytysvaiheen kuvaus ... 76
7.2 Käynnistysvaiheen kuvaus ... 78
7.3 Käynnistysvaiheeseen tehdyt muutokset ... 81
8 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN AJOKOKEET JA TULOKSET ... 84
8.1 Energian ominaiskulutus -koeajo ja tulokset ... 84
8.2 Syöttöpaine -koeajo ja tulokset ... 86
8.3 Kokonaisvirtaus -koeajo ja tulokset ... 88
8.4 Kaksoiskartiojauhimen uusi ajotapa ... 89
8.4.1 Vaikutukset jauhatusjärjestelmän energiankulutukseen ... 93
8.4.2 Vaikutukset kuitujen ominaisuuksiin ... 94
9 YHTEENVETO ... 98
LÄHTEET ... 102
LIITTEET
Liite 1. Jauhimien ensimmäiset kehitysversiot
Liite 2. Teräkuvioinnin leikkauskulman eteneminen

Liite 3. Kaksoiskartiojauhimen sivuprofiilit

Liite 4. Kohdepaperikoneella havaittu jauhinterävaurio

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

C	Massan sakeus [kg/m³]
d	Jauhinterän ulkohalkaisija [mm]
F	Massan virtaus [l/min]
Ft	Mekaanisen tiivisteen aiheuttama voima
Fr	Laakerilohkon aiheuttama voima
Fk	Liukukytkimen aiheuttama voima
k	Jauhinkohtainen vakio
l	Teräsärmien kontaktipituus [km]
l_p	Kuidun etäisimpien pisteiden välinen etäisyys [m]
L	Kuidun muotokäyrän pituus [m]
L_s	Leikkausnopeus [km/s]
L_t	Kuitujen kokonaispituus [m]
M	Massavirtaus [kg/s]
n	Kierrosnopeus [1/s]
N	Kulmien lukumäärä [kpl]
N_i	Jauhatusiskujen määrä [km/kg]
P_e	Puhdas jauhatusteho [kW]
P_n	Häviöteho [kW]
P_t	Kokonaisteho [kW]
Z_r	Roottorin harjojen lukumäärä [kpl]
Z_{st}	Staattorin harjojen lukumäärä [kpl]
α	Kartiokulma [°]

CEL	Leikkaussärmäpituus (Cutting Edge Length) [Km/r]
CI	Kiharuusindeksi (Curl Index)
CSF	Suotautuvuus (Canadian Standard Freeness) [ml]
EOK	Energian ominaiskulutus [kWh/t]
FSB	Kuidun kylläisyys (Fibre Saturation Point) [%]
IL	Jauhatusiskunpituus (Impact Length) [m]
KI	Sykkyräindeksi (Kink Index) [1/m]

OPK	Ominaispintakuorma [J/m²]
OSK	Ominaissärmäkuorma [J/m]
SR	Suotautuvuus (Schopper-Riegler)
WRV	Suotautuvuus (Water Retention Valve)

1 JOHDANTO

Jauhatus on yksi paperinvalmistuksen tärkeimmistä osaprosesseista, sillä jauhatuksella muokataan paperin raaka-aineena käytettävien kuitujen ominaisuuksia, mitkä vaikuttavat valta-osaan valmiin paperin ominaisuuksista. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi paperin erilaiset lujuus- ja painettavuusominaisuudet. Jauhatuksen tavoitteena on muokata raaka-aineena olevia puukuituja fyysisesti siten, että saavutetaan halutut ominaisuudet omaava paperi. Jauhatuksen lisääminen parantaa lujuusominaisuuksia ja vastaavasti heikentää optisia ominaisuuksia, joten jauhatusta muutetaan valmistettavan paperin loppukäyttäjän vaatimusten mukaan ja pyritään aina löytämään mahdollisimman edullinen keskitie kriittisten ominaisuusparien suhteen. (KnowPap 2015.)

Tässä tutkimuksessa tutkitaan erään hienopaperia valmistavan paperikoneen havusellunjauhatusta keskittyen vuonna 2013 investoidun kaksoiskartiojauhimen toimintaan. Kaksoiskartiojauhin muodostaa yhdessä kahden kartiojauhimen kanssa havusellun jauhinlinjan, minkä avulla kemiallinen havusellu eli havupuumassa jauhetaan paperikoneella käytettävään muotoon. Jauhatusta ohjataan jauhetun massan ja paperikoneelta valmistuvan paperin laatutekijöiden perusteella, jotka riippuvat kulloinkin tuotannossa olevan paperin laatuvaatimuksista. Tutkimuksen viitekehyksenä on havusellun jauhatuksen tarkasteleminen prosessiteknillisestä näkökulmasta. Kuvassa 1 on esitetty kaksoiskartiojauhin, joka on vastaava kuin kyseiseen jauhinlinjaan investoitu jauhin.

Kuva 1. Japanilaisen jauhinvalmistajan kaksoiskartiojauhin (Nurminen 2016a).

Kaksoiskartiojauhin muistuttaa toimintaperiaatteeltaan enemmän kaksoislevyjauhinta kun tavallista kartiojauhinta. Rakenteellisesti siinä on tavallisesta kartiojauhimesta poiketen kaksi rinnakkain toimivaa jauhatusaluetta, kuten kaksoislevyjauhimessa, mikä mahdollistaa energiatehokkaamman jauhatuksen kuin yhden jauhatusalueen omaava jauhin. Kyseisellä paperikoneella on kuitenkin havaittu, että kaksoiskartiojauhimen tarjoama jauhatuskapasiteetti ei ole kokonaisuudessaan hyödynnetty vaan massavirtauksien perusteella jauhin kohdistaa jauhatusenergiansa kuituihin pääosin vain toisen jauhatusalueen välityksellä. Lisäksi on havaittu jauhinterien toispuoleista vaurioitumista ja epäilty prosessista löytyneiden metallihiukkasten olevan peräisin kaksoiskartiojauhimen teristä. Jauhatuksen laatutekijöissä ei ole kuitenkaan havaittu merkittäviä ongelmia.

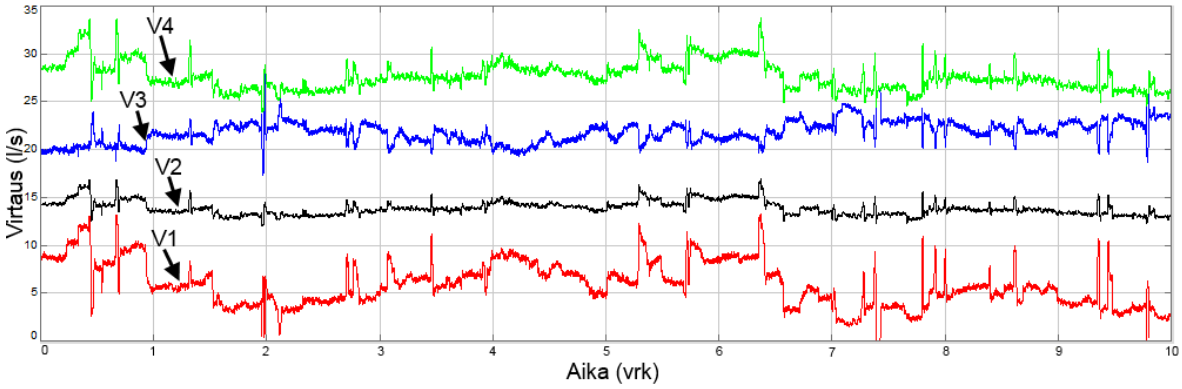
1.1 Työn tavoite, rakenne ja rajaus

Tutkimuksessa tutkitaan kaksoiskartiojauhimen toimintaa ja kartoitetaan ajotapoja, joilla jauhimen jauhatuskapasiteetti pystytään hyödyntämään paremmin. Päätavoitteena on jauhimen toiminnan parantaminen siten, että jauhettava havupuumassa jakaantuu mahdollisimman tasaisesti molemmille jauhatusalueille ja jauhatusenergia kohdistuu kuituihin tasaisesti, jauhatuslaadun eli valmistettavan paperin laadun kärsimättä. Lisäksi tavoitteena on löytää ratkaisu jauhimen terien toispuoleiseen vaurioitumiseen ja näin pidentää terien vaihtoväliä sekä ehkäistä terien äkillisiä rikkoutumisia ja niistä aiheutuvia kunnossapitokustannuksia tuotannon menetyksineen. Tarkoituksena on myös pyrkiä optimoimaan havun jauhatusjärjestelmän toimintaa ja tuottaa uutta tietoa kaksoiskartiojauhimen toimintaa koskien.

Tutkimuksen kirjallinen osuus koostuu jauhatuksen perusteoriasta sekä kaksoiskartiojauhimen rakenteesta ja toimintaperiaatteesta. Lisäksi kirjallisessa osuudessa käsitellään kohdepaperikoneen havupuumassan jauhatusjärjestelmää sekä kaksoiskartiojauhimen toiminnassa havaittuja ongelmia. Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa suoritetaan koeajoja kaksoiskartiojauhimen erilaisilla kuormitusarvoilla ja -parametreilla. Lisäksi kaksoiskartiojauhimeen rakennetaan mittaus, jolla voidaan seurata jauhimen mahdollisia teräkosketuksia ja jota voidaan käyttää virtausmittauksien tukena jauhatustapahtuman seurannassa. Jauhatuksen koeajot suoritetaan normaalin tuotannon aikana ja tuloksia analysoidaan kaupallisen prosessinanalysointijärjestelmä Savcor Wedge:n avulla.

1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Tutkimuksen aloitushetkellä kohdepaperikoneen havusellun jauhatusjärjestelmään investoitu kaksoiskartiojauhin ei toteuta jauhatusta odotetusti. Kaksoiskartiojauhimen toiminta on epätasaista, mikä havaitaan jauhimen yli virtaavan massan heittelynä ja etenkin jauhimen jauhatusaluekohtaisten syöttövirtauksien epätasaisena jakautumisena. Epätasainen virtausjakauma on esitetty kuvassa 2, jossa on prosessinanalysointijärjestelmästä poimittu kuvaaja kaksoiskartiojauhimen virtauksista kymmenen vuorokauden tuotantojaksolta. Vihreä käyrä (V4) kuvaa kokonaisvirtausta jauhimen läpi ja musta (V2) kokonaisvirtauksen puolikasta eli tavoiteltua osavirtausta. Sininen ja punainen (V3 ja V1) käyrä kuvaavat jauhimen kahdelle jauhatusalueelle jakaantuvia kokonaisvirtauksen osavirtauksia. Mittaukset on otettu minuutin välein ja yksikkö on litraa sekunnissa (l/s).



Kuva 2. Kaksoiskartiojauhimen massavirtaukset kymmenen vuorokauden tuotantojaksolta, jossa huomioitavaa on osavirtauksia kuvaavien käyrien (V3 ja V1) poikkeama tavoitellun osavirtauksen käyrästä (V2).

Kuvaajasta havaitaan, että osavirtaukset poikkeavat merkittävästi kokonaisvirtauksen puolikkaasta ja toiseen jauhatusalueeseen virtaa huomattavasti enemmän jauhettavaa massaa kuin toiseen eli jauhin kohdistaa jauhatusenergian kuituihin epätasaisesti jauhatusalueiden välillä koko ajojakson ajan. Joissain tilanteissa toisen jauhatusalueen virtaus putoaa jopa nollaan, mikä tarkoittaa, että kaikki jauhettava massa käsitellään hetkellisesti vain yhdellä jauhatusalueella.

Epätasaisen virtausjakauman lisäksi kaksoiskartiojauhinta avattaessa ja teriä vaihdettaessa on huomattu toistuvasti toisen jauhatusalueen terien olevan vaurioituneet ja kuluneet, vaikka fyysistä teräkosketusta ei pitäisi itse jauhatustapahtumassa tapahtua. Teriä vaurioittavien

fyysisten teräkosketusten yhteydessä teristä mahdollisesti irtoavat metallihiukkaset aiheuttavat tuotantoprosessiin joutuessaan suoria tuotannon menetyksiä ja tuotannon pysäyttäviä kunnossapitotöitä.

Diplomityön tutkimuskysymykset ovat:

- Mitkä jauhatustekijät vaikuttavat kaksoiskartiojauhimen jauhatustapahtuman onnistumiseen?
- Miten jauhimen pysäytys- ja käynnistysvaiheita voidaan muuttaa, jotta mahdollisilta fyysisten teräkosketuksen aiheuttamilta terävaurioilta vältytään?

2 KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä tutkimuksessa päätutkimusmenetelmänä käytetään kaksoiskartiojauhimen jauhatustapahtuman onnistumisen mittaamista, mikä tarkoittaa jauhettavan massan virtauksen jakaantumisen mittaamista. Virtaava massa jakaantuu kaksoiskartiojauhimen kahden jauhatusalueen kesken osavirtauksiin, joita mitataan pitkällä aikavälillä (5kk). Tutkimuksessa tutkitaan kirjallisuuden avulla määritettyjen (Aikawa Fiber Technologies 2007, s. 58; KnowPap 2015; Koskenhely 2007, s. 128) jauhatuksen laatuun vaikuttavien ja kohdepaperikoneella tuotannon aikana säädettävissä olevien jauhatustekijöiden lineaarista korrelaatiota kaksoiskartiojauhimen osavirtauksien jakaantumisen eli jauhatustapahtuman onnistumisen välillä. Tutkittavia jauhatuksen laatuun vaikuttavia ja säädettävissä olevia jauhatustekijöitä ovat jauhimen energian ominaiskulutus (EOK) sekä massan syöttöpaine ja jauhimen läpi virtaavan massan määrä. Jauhatusalueelle tulevan massan osavirtauksen ja jauhatustekijöiden välille lasketaan korrelaatiokertoimet, joiden avulla tuotetaan korrelaatioiden selitysasteet, joita käytetään löydettyjen syy-seuraussuhteiden tulkinnan apuna. Mittaustuloksien avulla jauhimelle etsitään paras mahdollinen ajotapa kyseisessä toimintaympäristössä siten, että jauhetun massan laatutekijät (kuidun pituus, kuidun suoruus ja fibrillaatioaste) ja valmistettavan paperin laatu pysyvät vähintäänkin nykyisellä tasolla. Tutkimuksen aikana jauhatustekijöistä ja massan laatutekijöistä kerätään jatkuvaa mittaustietoa prosessinanalysointijärjestelmään (Savcor Wedge 8.0) kymmenestä jauhimessa sekä sen toimintaympäristössä sijaitsevista mittausantureista.

Jauhimella suoritetaan koeajot normaalin tuotannon aikana siten, että yhtä tutkittavaa jauhatustekijää muutetaan kerrallaan ja pidetään jauhatusjärjestelmän muut tekijät vakiona. Jokaisen muutettavan jauhatustekijän vaikutuksista kerätään mittaustiedot prosessinhallintajärjestelmään, jonka avulla tulokset analysoidaan ja korrelaatiokertoimet lasketaan. Mittausjakson pituus on kullakin koeajolla muutoksen kokonaispituus, alkaen muutoksen alkupisteestä ja loppuen muutoksen loppupisteeseen. Koeajoissa mittaustiheys on 1/10s ja mittauksissa huomioidaan kaikki ajokokeiden aikana järjestelmään tallentuvat mittauspisteet, joita on koeajosta riippuen 60–600. Koeajojen jälkeen kaksoiskartiojauhimen ajotapaa parannetaan säätämällä jauhatustekijöitä koeajojen tuloksien perusteella. Tutkittuja jauhatustekijöitä säädetään prosessin vaatimien raja-

arvojen sisällä säätötarkkuudella 1 kWh/t (EOK), 1 kPa (syöttöpaine) ja 1 l/s (virtaus). Säätöjen jälkeen mitataan uuden ajotavan vaikutukset jauhatusjärjestelmän energiankulutukseen sekä sen jälkeen jauhetun massan laatutekijöihin.

Jauhimen terien mahdollisia fyysisiä teräkosketuksia tutkitaan mittaamalla jauhimen roottorin asematiedon ja teräasematiedon keskinäistä sijaintia jauhimen pysäytys- ja käynnistysvaiheen aikana. Fyysisen teräkosketuksen katsotaan olevan mahdollinen, jos asematietojen keskinäinen sijainti on alle 0,50 mm ja jauhin ei ole massakuormalla. Mittaustiedot kerätään prosessianalysointijärjestelmään ja terien mahdolliset fyysiset teräkosketukset tunnistetaan järjestelmästä saatavien kuvaajien avulla. Teräkosketusten osoittaminen on kuitenkin mittausteknisesti osittain tulkinnanvaraista, sillä vain jauhimen vanhoista teristä on valokuvia, joista fyysinen teräkosketus on kiistatta osoitettavissa. Lisäksi asematietojen nollapisteet on asetettu jauhimen ollessa pysähdyksissä, jolloin asematiedot eivät huomioi jauhimen pyörimisliikettä eivätkä jauhinkonstruktion välyksiä. Asematietojen mittaustarkkuus on 0,01 mm ja mittaustiheys 1/10s. Mahdollisten teräkosketusten tunnistamisen jälkeen jauhimen pysäytys- ja käynnistysvaiheita muutetaan, jotta kohdepaperikoneella vältyttäisiin tulevaisuudessa fyysisistä teräkosketuksista johtuvilta terien rikkoutumisilta ja tuotannon menetyksiltä. Muutoksien tulokset voidaan kuitenkin kiistatta osoittaa vasta tutkimuksen päätyttyä seuraavan terien vaihdon yhteydessä (kohdepaperikoneella terien vaihtoväli n. 12kk).

3 HAVUPUUMASSAN JAUHATUS

Lähtökohtana paperin valmistukselle on perusraaka-aineena käytettävien puukuitujen kyky muodostaa pintajännitysvoimien ja vetysidoksien avulla luja kuituverkosto. Puukuidut erotetaan puusta joko kemiallisesti sellun keitolla tai mekaanisesti hiertämällä ja hiomalla. Toisistaan erotetut puukuidut ovat kuitenkin sellaisinaan jäykkiä ja sileäpintaisia, joten niiden sidostenmuodostamiskyky on heikko eivätkä ne sovellu ilman käsittelyä paperin valmistukseen. Kuitujen sitoutumisominaisuuksia parannetaan mekaanisella käsittelyllä, jota kutsutaan jauhatukseksi. Jauhatuksessa kuitujen kemiallista ja fysikaalista rakennetta pyritään muuttamaan kohdistamalla leikkaavia ja puristavia voimia vesilietteessä oleviin kuituihin rasittamalla niitä mekaanisesti metallisten jauhinterien välissä. Tämän seurauksena kuidut notkistuvat, niiden sisäiset sidokset aukeavat ja niiden sitoutumispinta-ala kasvaa eli kuidut turpoavat. Jauhatustulos on riippuvainen jauhatuksen määrästä ja suoritustavasta. (KnowPap 2015; Ryti 1970, s. 40–42.)

Jauhatus jaetaan kahteen päävaiheeseen, joita ovat kuidun valinta ja itse rasittaminen. Valinnalla tarkoitetaan kuitujen liikettä terien urista terien rasittaville osille ja itse rasittamisella kuituja muokkaavaa tapahtumaa. Kuitujen on ajauduttava terien urista teräsärmien ja otsapintojen väliin, jossa kuituihin kohdistetaan leikkaavia ja puristavia voimia eli aikaan saadaan kuidun rakenteeseen muutoksia. Kokonaisuudessaan jauhatustapahtuma on monimutkainen ja sen onnistuminen on riippuvainen muun muassa jauhinterien dimensioista, niiden välisestä terävälistä, jauhimen pyörimisnopeudesta ja jauhatustavasta. Kuitujen ominaisuuksia ennen ja jälkeen jauhatustapahtuman pystytään mittamaan, mutta itse jauhatustapahtuman hallinta on haastavaa, sillä kuitujen käyttäytymistä terien vaikutusalueella on voitu vain mallintaa. (Koskenhely 2007, s. 94–95.) Tässä osiossa käsitellään tunnetuimmat jauhatusteoriat, yksittäisen jauhatustapahtuman periaate, jauhatuksen päävaikutukset kuitujen ominaisuuksiin ja jauhautuneisuuden mittaaminen.

3.1 Jauhatusteoriat

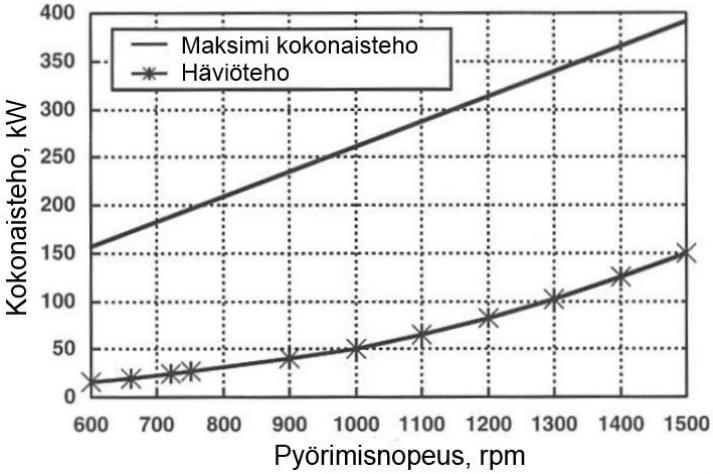
Jauhatustapahtuman onnistumista säädetään muuttamalla jauhimen terien välistä teräväliä, mikä vaikuttaa jauhimen käyttämän energian määrään. Terävälissä oleva jauhettava massa

vastaanottaa terien välittämän jauhatusenergian ja estää samalla terien väliset fyysiset kosketukset. Jauhatusta lisättäessä eli jauhimen kuormitusta nostettaessa teräväliä pienennetään, kun vastaavasti kuormitusta laskettaessa jauhimen teräväliä kasvatetaan. Jauhatuksen onnistumisen ohjaaminen ei kuitenkaan ole niin yksinkertaista, vaan haasteena on jauhatustapahtuman heterogeenisyys. Heterogeenisyydellä tarkoitetaan epätasaisuutta massan sisältämien kuitujen jauhautuneisuudessa, sillä yksittäinen kuitu voi edetä jauhimen läpi rasittumalla useita kertoja, kerran tai vastaavasti rasittumatta ollenkaan. Heterogeenisyydestä johtuen jauhatuksen kuormituksen muutoksella ei pystytä reagoimaan jauhatustulokseen välittömän nopeasti ja tarkasti. Lisäksi haasteellisuutta lisää jauhimen terävälin ei lineaarinen vaikutus jauhatusenergiaan. Ongelmallisuudesta huolimatta jauhatuksen onnistumisen ohjaamiseen on kehitetty jauhatusteorioita ja menetelmiä, joilla jauhatuksen laatu pyritään pitämään hyväksyttävällä alueella. (Koskenhely 2007, s. 114–115.)

Yhteisenä tekijänä jauhatusteorioilla on jauhatustehon jakaminen puhtaaseen jauhatustehoon eli kuituja rasittavaan tehoon ja jauhimen häviötehoon eli tyhjäkäyntitehoon. Jauhimen häviöteho voidaan mitata pyörittämällä jauhinta vesikuormalla terien ollessa lähes kiinni toisissaan tai sitä voidaan arvioida laskennallisen kaavan avulla. Häviöteho P_n [kW] kasvaa exponentiaalisesti jauhimen kierrosnopeuden n [1/s] ja pyörivän jauhinterän ulkohalkaisijan [mm] mukaan seuraavan jauhinkohtaisen vakion k huomioivan kaavan mukaan (Lumiainen 2000, s. 91; KnowPap 2015):

$$P_n = k \times n^{2,8} \times d^{4,5} \tag{1}$$

Jauhimen häviöteho tiedettäessä puhdas jauhatusteho P_e [kW] saadaan vähentämällä häviöteho jauhimen käyttämästä kokonaistehosta P_t[kW] (Lumiainen 2000, s. 91). Kuvassa 3 on havainnollistettu erään kartiojauhimen häviötehon riippuvuus pyörimisnopeudesta.



Kuva 3. Erään kartiojauhimen häviötehon riippuvuus pyörimisnopeudesta (muok. Lumiainen 2000, s. 92).

Häviötehon käyrää seuraamalla nähdään, että esimerkiksi 1000 rpm kierrosnopeudella jauhimen häviöteho on 50 kW. Tämä tarkoittaa, että käytettäessä 250 kW sähkömoottoria kyseisessä jauhimessa kyseisellä kierrosnopeudella puhtaan jauhatustehon maksimi arvo on 200 kW (Lumiainen 2000, s.92). Puhdas jauhatusteho P_e [kW] saadaan kokonaistehon P_t[kW] ja häviötehon P_n [kW] erotuksena seuraavasti (Koskenhely 2007a, s. 117):

$$P_e = P_t - P_n \tag{2}$$

Jauhatuksen onnistumisen edellytyksenä on pidetty jauhimen terien välissä tapahtuvaa kuitujen katkeilua, mitä painotettaessa käytetään alhaista massan sakeutta (2–3 %) ja kapeita teriä. Jauhatusvaikutus ei kuitenkaan koostu yksinomaan kuidun ja terän välisestä kosketuksesta, sillä jauhatusvaikutuksia on saatu aikaan esimerkiksi ultraäänikäsittelyllä ja myllyillä, joilla ei suoranaisesti katkota kuituja. Tämän perusteella voidaan sanoa, että kuituja rasittavat voimat siirtyvät myös kuitujen keskinäisten kosketusten seurauksena sekä kuituja ympäröivän veden välityksellä. (Ebeling 1983, s. 78.)

3.1.1 Ominaissärmäkuormateoria

Yksi tehdasolosuhteissa tunnetuimmista ja käytetyimmistä jauhatusteorioista on ominaissärmäkuormateoria, joka sisältää menetelmät, joilla voidaan kontrolloida kuinka paljon kuituja rasitetaan ja kuinka kovaa rasitus on. Jauhatuksen intensiteetti eli ominaissärmäkuorma OSK määrittää kuituihin kohdistuneiden jauhatusiskujen

intensiivisyyttä yksikössä [J/m] ja energian ominaiskulutus EOK kuituihin kohdistuneen jauhatuksen määrää yksikössä [kWh/t]. (Lumiainen 2000, s. 92; Koskenhely 2007, s. 115.)

OSK ja siihen vaikuttava terien leikkausnopeus L_s sekä EOK voidaan laskea seuraavien yhtälöiden avulla (Koskenhely 2007, s. 115–116):

$$OSK = \frac{P_e}{L_s} \tag{3}$$

$$L_s = Z_r \times Z_{st} \times l \times n \tag{4}$$

$$EOK = \frac{P_e}{F \times C} \tag{5}$$

,joissa OSK on ominaissärmäkuorma [J/m], P_e on puhdas jauhatusteho [kW], L_s on jauhimen terien leikkausnopeus [km/s], Z_r on roottorin harjojen lukumäärä, Z_{st} on staattorin harjojen lukumäärä, l on teräsärmien kontaktipituus [km], n on kierrosnopeus [1/s], EOK on energian ominaiskulutus [kWh/t], F on massan virtaus [l/min] ja C on massan sakeus [kg/m³].

Kuten yhtälöistä 3 ja 4 nähdään, jauhimen terien geometria määrittelee, kuinka korkea jauhimen kuormitettavuustaso on haluttua jauhatusintensiteettiä tavoiteltaessa. Tehdasolosuhteissa terien pyörimisnopeuden ollessa yleensä vakio saman jauhatusintensiteetin toteuttamiseksi teriä, joiden teräharjat ovat kapeita ja niitä on tiheästi, voidaan kuormittaa isommalla kuormitusalueella kuin teriä, joissa teräharjat ovat leveitä ja niitä on harvasti. (Koskenhely 2007, s. 115–116.)

EOK on usein käytössä jauhimen ohjauksessa, sillä se huomioi massan virtauksen ja sakeuden, kuten yhtälössä 5 on esitetty. Jauhimen kuormitusta eli sen jauhatustehoa säädetään yhtälössä 5 jakajana olevien massan virtauksen ja sakeuden mukaan, jolloin käytetään nimitystä EOK-säätö (energian ominaiskulutuksen mukainen säätö). Vaadittu jauhatustuotanto riippuu paperikoneen paperin tuotannosta, mikä vaikuttaa suoraan tarvittavan jauhetun massan määrään eli massan virtaukseen. EOK-säätö pyrkii pitämään kuituihin kohdistetun jauhatuksen määrän vakiona, jolloin se reagoi virtauksien vaihteluihin

seuraavasti: virtauksen vähentyessä jauhatusteho laskee eli teräväli aukeaa ja vastaavasti virtauksen kasvaessa jauhatusteho lisääntyy eli teräväli pienenee. Jauhimien pyörimisnopeuden säädön puuttuessa EOK-säädöstä seuraavat jauhatustehon muutokset vaikuttavat suoraan myös jauhatusintensiteettiin. Tämän seurauksena jauhatustuotannon muuttuessa säädetään myös haluttua EOK-tasoa, jotta jauhatusintensiteetin vaihtelut pysyvät mahdollisimman pienenä. (Koskenhely 2007, s. 117.)

Jauhatusintensiteetin avulla tiedetään, kuinka paljon jauhatusenergiaa kohdistetaan kuituihin terien harjametriä kohden. Sen avulla ei kuitenkaan tiedetä, kuinka kuidut vastaanottavat jauhatusenergian eikä se huomioi muita jauhatustulokseen vaikuttavia tekijöitä, joita ovat esimerkiksi jauhimen terävälin suuruus, terien kunto, terien urien ja teräharjanteiden leveys sekä jauhatussakeus. Intensiteetti on kuitenkin helppokäyttöinen menetelmä kuituihin kohdistettavan kuormituksen ja rasituksen kontrollointiin, minkä seurauksena se on tehdasolosuhteissa yhdessä energian ominaiskulutuksen kanssa laajasti käytössä. (Koskenhely 2007, s. 117; Lumiainen 2000, s. 93.)

3.1.2 Ominaispintakuormateoria

Ominaispintakuormateoria on teoria, joka perustuu ominaissärmäteoriaan, mutta se huomioi myös jauhiminen terien teräharjanteiden leveyden vaikutuksen jauhatustulokseen. Teoria perustuu ominaispintakuorman OPK:n laskentaan, joka kertoo jauhatustavan yksikössä [J/m²]. OPK on jalostettu aiemmin esitellystä OSK:sta, johon on sisällytetty jauhatusiskunpituus. Teorian mukaan kuituihin kohdistuvan jauhatuksen määrä koostuu jauhatusiskujen kappalemäärästä ja kovuudesta sekä jauhatusiskujen pituudesta. Tämä tarkoittaa, että ominaispintakuormateoriassa jauhatuksen energian ominaiskulutuksen EOK:n (jauhatuksen määrä) laskennassa huomioidaan myös jauhatuksen intensiivisyys, toisin kuin ominaissärmäteoriassa EOK ja jauhatusintensiteetti lasketaan toisistaan erillään, yhdistävän tekijän ollessa puhdas jauhatusteho. (Lumiainen 2000, s. 94.)

Ominaispintakuormateorian mukainen EOK ja jauhatusiskujen kappalemäärä N_i sekä OSK voidaan laskea seuraavien yhtälöiden avulla:

$$EOK = N_i \times OPK \times IL \qquad (6)$$

$$N_i = \frac{L_S}{M} \tag{7}$$

$$OPK = \frac{OSK}{IL} \tag{8}$$

,joissa EOK on energian ominaiskulutus [kWh/t], N_i on jauhatusiskujen määrä [km/kg], OPK on ominaispintakuorma [J/m²], IL on jauhatusiskunpituus [m], L_s on jauhimen terien leikkausnopeus [km/s], M on massavirtaus [kg/s] ja OSK on ominaissärmäkuorma [J/m]. (Lumiainen 2000, s. 94.)

Kuten yhtälöstä 8 havaitaan, ominaispintakuorma on aiemmin käsitellyn ominaissärmäkuorman (jauhatusintensiteetti) ja jauhatusiskun pituuden osamäärä. Ominaispintakuorma kertoo kuituihin välittyvän jauhatusenergian teräpinta-alaa kohti, kun ominaissärmäkuorma vastaavasti huomioi vain jauhinterien särmien kontaktipituuden. Yhtälössä 7 esitetty jauhatusiskujen määrä, määräytyy jauhinterien leikkausnopeuden ja jauhimen läpi virtaavien kuitujen massavirtauksen osamääränä eli määrittelee kuinka monta jauhatusiskua on suhteessa jauhettavan massan määrään. Jauhatusiskujen määrä ei arvioi, kuinka monta kuitua on vastaanottanut iskun. (Lumiainen 2000, s. 94.)

Ominaispintakuormateoria toimii hyvin jauhatuksen onnistumisen ohjaamisessa, kun käytetään jauhinteriä, jotka omaavat jauhettavan kuidun pituutta kapeammat teräharjanteet. Vastaavasti ominaissärmäkuormateoria on vahvempi karkeampia sekä jauhettavan kuidun pituutta leveämmät teräharjanteet omaavia jauhinteriä käytettäessä. Molemmilla teorioilla on heikkoutensa ja puutteensa, mutta tarjoavat hyvät lähtökohdat jauhatuksen ohjaamiselle. (Koskenhely 2007, s. 121; Lumiainen 2000, s. 95.)

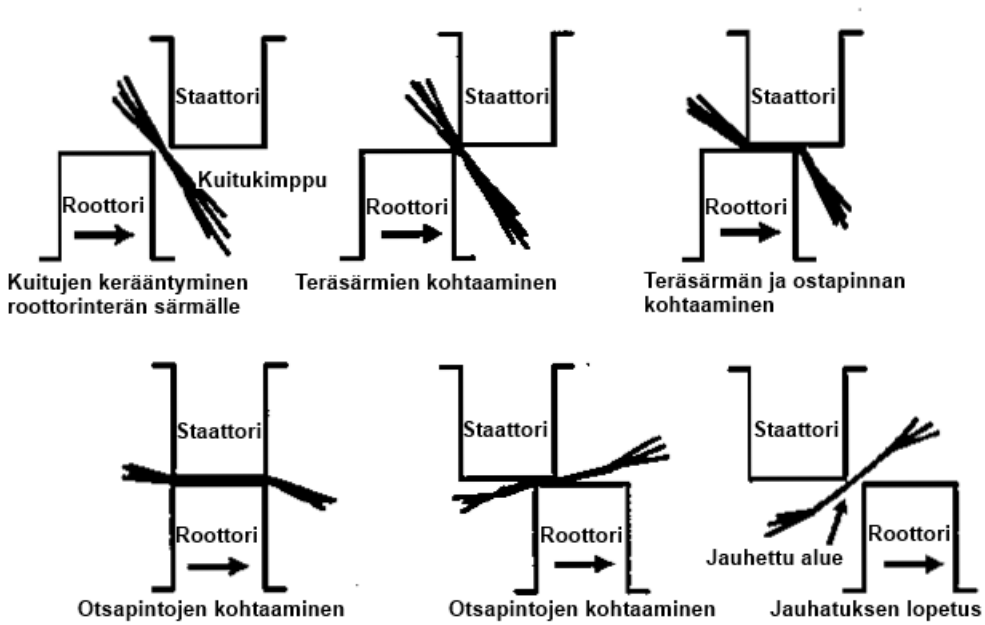
3.2 Jauhatustapahtuma

Jauhatus tapahtuu jauhimen kiinteän terän eli staattorin ja liikkuvan terän eli roottorin välissä, mikä on keskimäärin 0,1 mm suuruinen ja vastaa 2–5 jauhamattoman kuidun paksuutta tai 10–20 jauhetun kuidun paksuutta. Tuore havumassa käsitellään ensin massankäsittelysysteemissä, jonka avulla massasta tehdään mahdollisimman tasalaatuista ja halutun sakeuden omaavaa vesilietettä. Massankäsittelysysteemistä massa, jonka tyypillinen sakeus on 3–5 %, pumpataan jauhimen teräväliin, jossa itse jauhatustapahtuma suoritetaan.

Yksittäinen jauhatustapahtuma voidaan jakaa viiteen vaiheeseen, jotka on havainnollistettu myös kuvassa 4:

1) Kuitujen kerääntyminen roottorinterän särmälle,
2) Teräsärmien kohtaaminen,
3) Teräsärmän ja otsapinnan kohtaaminen,
4) Otsapintojen kohtaaminen,
5) Jauhatuksen lopetus.

(Lumiainen 2000, s. 87–88; Sepsilva Ltd Oy 1997, s. 24.)

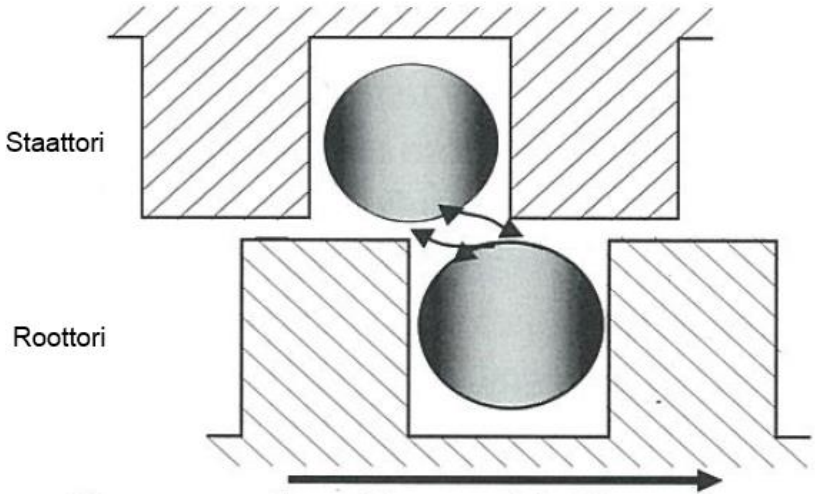


Kuva 4. Kuidun eteneminen jauhimen terävälissä, alkaen kuvan vasemmasta yläkulmasta (muok. Koskenhely 2007, s. 121).

Ensimmäisessä vaiheessa havumassan kuidut kerääntyvät kuitukimppuina teräsärmien väliin, jonka jälkeen roottorin edetessä saavutetaan seuraava vaihe, jossa sekä roottorin että staattorin särmät ovat vastakkain. Tässä vaiheessa kuitukimput vastaanottavat kovan iskun ja paineen, minkä seurauksena suurin osa kuitukimppuihin sitoutuneesta vedestä poistuu yhdessä kuitukimppuihin sitoutumattomien lyhempien kuitujen kanssa terissä oleviin uriin. Seuraavassa vaiheessa kuitukimput alkavat puristumaan otsapintojen väliin samalla kun teräsärmät liukuvat niiden pintaa pitkin. Tämä vaihe on jauhatuksen kuormittavin hetki, sillä teräsärmien lisäksi kuitukimppujen sisältämät kuidut muokkaavat toisiaan puristumisesta syntyvän kitkan seurauksena. Vaihe päättyy, kun roottorin rasittava teräsärmä kohtaa

staattorin seuraavan särmän ja terien otsapinnat ovat täysin vastakkain, kuitukimppujen ollessa niiden välissä puristuksissa. Roottorin edetessä kohti seuraavaa staattorin teräsärmää muokkaantunut kuitukimppu vapautuu puristuksesta ja yksittäinen jauhatustapahtuma päättyy. (Lumiainen 2000, s. 87–88.)

Jauhatuksen aikana terien uriin syntyy roottorin pyörimisliikkeen seurauksena pyörrevirtauksia, mitkä aiheuttavat kuitujen iskeytymistä teräsärmiin kerääntymisvaiheessa. Tämä ilmiö määrää pitkälti jauhatuksen onnistumisen, sillä ilman pyörrevirtoja kuidut eivät keräänny teräsärmille, vaan läpäisevät jauhimen terien uria pitkin jauhamattomana. Pyörrevirtojen syntyminen on riippuvainen terävälistä sekä terien dimensioista. Mikäli urat ovat liian kapeat suhteessa jauhettavan kuidun pituuteen, kuidut eivät kykene pyörähtämään virtauksien mukana, eivätkä tällöin ajaudu teräsärmille. Pyörrevirtojen syntyminen on esitetty kuvassa 5. (Batchelor, Lundin & Fardim 2003, s. 35; Lumiainen 2000, s. 88.)



Kuva 5. Jauhimen terien väliin muodostuvat pyörrevirrat, joita kuvataan teräurissa olevilla nuolilla, alalaidassa olevan nuolen kertoessa roottorin liikesuunnan (Lumiainen 2000, s. 88).

Pyörrevirtojen ohella jauhatustulokseen vaikuttaa suuresti kuitujen käyttäytyminen kuitukimpuissa jauhatustapahtuman aikana. Havumassan ollessa pitkäkuituista, sen kuidut iskeytyvät helposti teräsärmiin ja muodostavat vahvoja kuitukimppuja, jotka selviytyvät jauhatustapahtumasta pää-osin rikkoutumatta. (Lumiainen 2000, s. 88.) Jauhatustapahtuman aikana kuituihin kohdistuu erilaisia puristus- ja leikkausvoimia, jotka rasittavat kuituja. Rasituksien seurauksena kuitujen rakenne muokkaantuu eli haluttu jauhatustulos saavutetaan. (Kereks & Senger 2006, s. 3−4.)

3.3 Jauhatuksen vaikutukset kuitujen rakenteeseen

Kuitujen ominaisuudet ovat avain-asemassa valmistettavan paperin ominaisuuksien määrittämisessä. Kuitujen rakenteen muutos voi vaikuttaa joihinkin ominaisuuksiin parantavasti, mutta toisaalta heikentää muita ominaisuuksia. Jauhatuksen päätarkoitus on kuitujen sidostenmuodostamiskyvyn parantaminen, minkä avulla pyritään mahdollistamaan lujan ja sileän, hyvät painatusominaisuudet omaavan paperin valmistaminen. Jauhatuksella pyritään saavuttamaan riittävät muutokset tuoremassan kuitujen rakenteeseen, jotta paperin halutut ominaisuudet täyttyvät. Jauhatuksen vaikutuksia kuidun rakenteeseen ovat:

- Kuitujen katkeileminen ja keskipituuden lyheneminen,
- Kuitujen suoristuminen,
- Sisäinen fibrillaatio,
- Ulkoinen fibrillaatio ja hienoaineksen syntyminen.

(Häggblom-Ahner & Komulainen 2003, s. 113; Lumiainen 2000, s. 89.)

3.3.1 Kuitujen lyheneminen

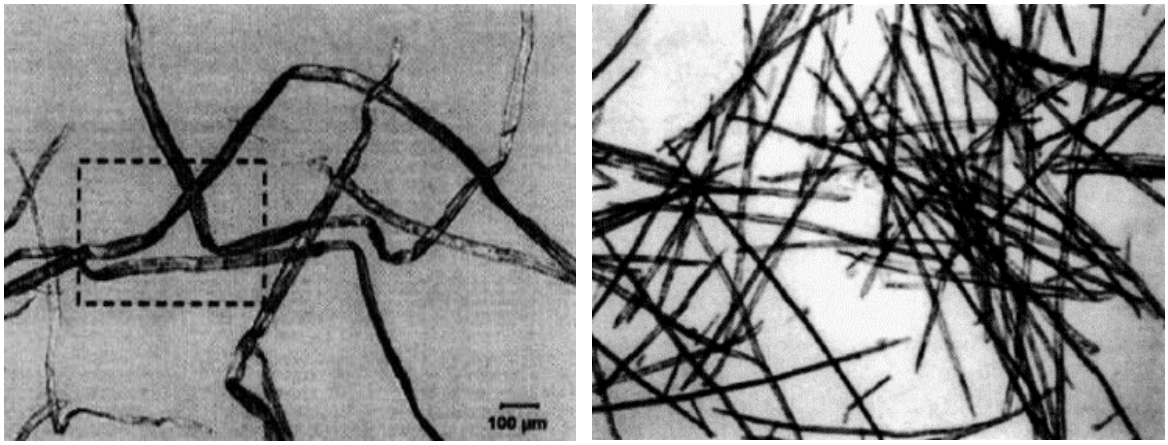
Kuitujen lyhenemisellä tarkoitetaan yksittäisten kuitujen katkeilua jauhatuksessa syntyvän rasituksen seurauksena, mikä näkyy kuitujen keskipituuden alenemisena. Alun perin jauhatuksella pyrittiin jossain määrin katkomaan kuituja samaan mittaan, mikä johtui tuoremassojen suurista laatuvaihteluista. Nykyisin kuitujen katkeilua pyritään kuitenkin välttämään, sillä etenkin pitkien havukuitujen katkeilu aiheuttaa paperin lujuusominaisuuksien alenemista. Korkea havukuidun pituus lisää kuituverkoston eri kuitulaatujen ja täyteaineiden sitoutumista toisiinsa ja näin ollen vahvistaa kuituverkostoa. (Koskenhely 2007, s. 99; KnowPap 2015.)

Päätekijöinä jauhatuksessa tapahtuvalle kuidun katkeilulle ovat jauhatuksen kuormitustaso ja terien kunto. Teräpintojen ohittaessa toisensa niiden kuituun kohdistamat voimat aiheuttavat kuidussa aksiaalisuuntaista venymää. Kuormitustason noustessa teräväli pienenee, joten kuidut joutuvat otsapintojen välissä kasvavassa määrin puristuksiin toistensa suhteen sekä teräsärmien kuituihin kohdistama rasitus kasvaa. Kun kuormitustaso on liian suuri, kuitua venytetään yli sen ominaislujuuden ja tapahtuu katkeaminen. (Koskenhely 2007, s. 99.)

Kuitujen katkeiluun vaikuttaa kuormituksen lisäksi huomattavasti rasittavan teräsärmän pyöreysprofiili. Kuitujen katkeilua esiintyy useammin liian terävillä tai kuluneilla, mahdollisesti säröillä olevilla terillä kuin hieman pyöristyneillä teräsärmillä, joiden pinnanlaatu on tasainen. Etenkin havukuitujen kohdalla terämateriaali tulisi valita siten, että teräsärmän pyöreysprofiili pysyy alueella 0,08–0,15 millimetriä, sillä pienemmän säteen omaavien särmien on havaittu katkovan kuituja voimakkaasti. Toisaalta korkeamman pyöreysprofiilin omaavien teräsärmien kyky rasittaa kuituja laskee, eikä niiden käyttö ole energiatehokasta. (Koskenhely, Nieminen & Paulapuro 2007, s. 1.)

3.3.2 Kuitujen suoristuminen

Tuoremassan valmistus- ja käsittelyprosessit korkeassa sakeudessa aiheuttavat kuitujen alkuperäiseen suoraan rakenteeseen paikallisia vaurioita, mikä näkyy kuitujen kihartumisena, kieroutumisena ja dislokaatioiden syntymisenä. Kuidun rakenteen paikalliset epämuodostumat alentavat yksittäisen kuidun lujuusominaisuuksia vaikuttaen oleellisesti myös kuituverkosta muodostuvan paperin ominaisuuksiin. Esimerkki erilaisten sekoitus-, pumppaus- ja valkaisuprosessien vaikutuksista kuidun rakenteen suoruuteen on esitetty kuvassa 6, jossa on esitetty laboratorio-olosuhteissa valmistetun massan jauhamaton kuiturakenne ja tyypillisen kaupallisen massan jauhamaton kuiturakenne. (Koskenhely 2007, s. 98; Seth 2006, s. 37.)



Kuva 6. Kaupallisen massan valmistusprosessin jälkeinen kiharainen kuiturakenne (vasemmalla) ja laboratoriossa valmistetun massan suora kuiturakenne (oikealla) (Seth 2006, s. 37).

Paperin kuituverkossa kuidut ovat sitoutuneena toisiinsa niiden risteyskohdista ja näin ollen jakavat verkkoon kohdistuvia voimia sidokselta sidokselle. Mikäli kuidut ovat suoria eivätkä sisällä epämuodostumia, verkoston kaikki kuidut pystyvät välittämään voimia sidoksien välillä, joten rasitus jakaantuu verkkoon tasaisesti. Seurauksena ovat paperin hyvät lujuusominaisuudet. Mikäli verkoston kuidut omaavat epämuodostumia, niiden kyky kantaa kuormitusta sidosten välillä on heikko, joten verkostoon syntyy rasitusjakaumia, kunnes epämuodostuma on suoristunut. Rasitusjakautumien seurauksena on usein kuituverkon hajoaminen kuormituksen alaisena, mikä näkyy paperin heikkoina lujuusominaisuuksina. Rasitusjakautumien taso riippuu epämuodostumien laajuudesta ja niiden määrästä. Toisaalta epämuodostumien on havaittu parantavan paperin venymisominaisuuksia, koska kiharilla ja sykkyräisillä kuiduilla on varaa suoristua. (Seth 2006, s. 37.)

Kuidun suoristumiseen eniten vaikuttavia jauhatusparametrejä ja olosuhteita ei ole täysin ymmärretty, mutta esimerkiksi jauhatussakeudella tiedetään olevan vaikutus kuitujen suoristumiseen. Matalassa sakeudessa jauhettaessa kuidut suoristuvat ja korkealla sakeudella vastaavasti kihartuvat. Vesi tunkeutuu kuidun huokosiin, mikä pehmentää ja turvottaa kuitua. Turpoamisilmiö aiheuttaa yhdessä kuitua aksiaalisuuntaisesti venyttävien jauhatusvoimien kanssa kuidun rakenteen suoristumisen. (Koskenhely 2007, s.98–99; Seth 2006, s. 39.)

3.3.3 Sisäinen fibrillaatio

Jauhatus aiheuttaa näkyvää kuitujen turpoamista ja notkistumista, mikä on osaltaan seurausta kuidussa tapahtuvasta sisäisestä fibrillaatiosta. Sisäisellä fibrillaatiolla tarkoitetaan kuidun sisäisen rakenteen löystymistä eli veden tunkeutumista kuidun seinämiin, mikä aiheuttaa molekyylitasolla kuidun ketjumolekyylien välisten vetysidosten aukeamisen ja korvautumisen ketjumolekyylien ja vesimolekyylien välisillä sidoksilla. Molekyylitason muutokset näkyvät kuitujen turpoamisena, minkä seurauksena kuitujen kosketuspinnat kasvavat ja kuituverkoston sidostenmuodostamiskyky parantuu. Tästä seuraa paperin lujuusominaisuuksien paraneminen, mutta toisaalta paperin optiset ominaisuudet laskevat. Sisäinen fibrillaatio on havainnollistettu kuvassa 7. (Retulainen, Niskanen & Nilsen 1998 s. 62; Ryti 1970, s. 44.)

Kuva 7. Kuidun poikkileikkaus, jossa nähtävissä osittaista veden vaikutuksesta johtuvaa sisäisten seinämien toisistaan irtoamista eli sisäistä fibrillaatiota (Retulainen, Niskanen & Nilsen 1998, s. 62).

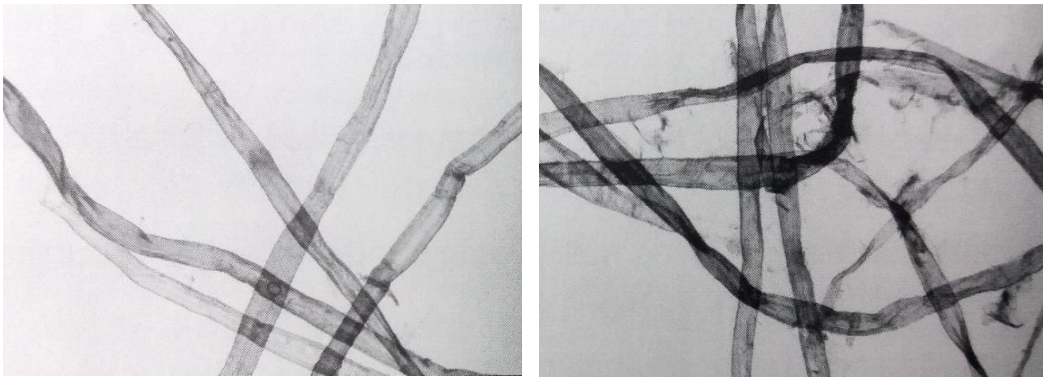
Sisäinen fibrillaatio aiheutuu kuidun sisäisen rakenteen rasittamisesta, mikä on seurausta jauhinterien otsapintojen välissä kuituihin aiheutetuista puristus- ja taivutusvoimista. Tarvittava kuidun sisäisen rasituksen määrä halutun fibrillaatiotason saavuttamiseksi on riippuvainen kuitujen rasituksen sietokyvystä. Karkeat kuidut vaativat enemmän rasitusta sisäisen rakenteen hajoamiseen kuin saman halkaisijan omaavat sileät kuidut. Kuidun halkaisijan pienentyessä kuidut kestävät paremmin puristusvoimia, mutta taipuvat helpommin. (Kereks & Senger 2006, s. 4−6.)

Veden tunkeutuminen kuitujen seinämiin aiheuttaa kuitujen turpoamisen lisäksi niiden mukautumiskyvyn kasvua, mikä parantaa yhdessä turpoamisesta johtuvan pinta-alan kasvun kanssa kuitujen kykyä sitoutua paperin kuituverkostossa toisiinsa. Jauhatuksen kuormituksen noustessa kuituihin kohdistuvat voimat kasvavat, mikä näkyy kuitujen turpoamisen lisääntymisenä. Energian ominaiskulutuksen noustessa kuitujen keskinäinen tiheys ja niiden väliset sidospinta-alat lisääntyvät, mikä näkyy parantuneena paperin vetolujuutena, mutta vastaavasti paperin ominaistilavuuden heikentymisenä, mitä pidetään negatiivisena vaikutuksena. Jauhatusintensiteetin nostamisella ei ole havaittu olevan yhtä selvää vaikutusta fibrillaation lisääntymiseen kuin energian ominaiskulutuksella. (Koskenhely 2007, s. 96–97.)

3.3.4 Ulkoinen fibrilliaatio ja hienoaineen syntyminen

Ulkoisella fibrillaatiolla tarkoitetaan jauhatuksen rasituksesta johtuvaa kuitujen pintakerroksen löystymistä ja hajoamista. Kuitujen pintaosia irtoaa toisistaan ja jauhatuksen lisääntyessä kuidut halkeavat muodostaen ympäröivään massalietteeseen kuidun pintaosista koostuvia hienoaineita eli fibrillejä. Ulkoisen fibrillaation seurauksena on kuidun turpoaminen ja kuituverkon sidostenmuodostamiskyvyn paraneminen kuten sisäisessäkin fibrillaatiossa. Erona ovat ulkoisen fibrillaation yhteydessä muodostuvat hienoaineet ja kuidun pinta-osien muokkautuminen kun sisäisessä fibrillaatiossa kuidun sisäpuolinen rakenne muokkautuu, mikä parantaa kuidun muokkautumiskykyä eli tekee kuidusta taipuisan ja plastisen. (Ryti 1970, s. 44–45.)

Ulkoisen pinnan rasitus ja siitä seuraava ulkoinen fibrillaatio on pitkälti riippuvainen kuidun pintaan jauhatuksen aikana kohdistuvasta teräpintojen hankauksesta, jonka voimakkuus riippuu terien otsapintojen välisestä puristusvoimasta sekä teräsärmien leikkausvoimista. (Kereks & Senger 2006, s. 4−5). Syntyvät hienoaineet täyttävät kuituverkoston kuitujen välisiä tiloja ja sitovat niitä toisiinsa, parantaen paperin lujuusominaisuuksia. Ulkoisen fibrillaation syntymiseen vaikuttaa luonnollisesti jauhatuksen kuormitustaso, mutta myös kuitujen laatu. Samalla energian ominaiskulutuksella jauhettaessa notkeiden ja sirojen kuitujen pinnat löystyvät vähemmän kuin jäykkien ja karkeiden havukuitujen pinnat, joiden pinta-osat rikkoutuvat helpommin. Esimerkki havukuidun ulkoisen fibrillaation synnyttämästä hienoaineksesta on esitetty kuvassa 8. (Koskenhely 2007, s. 100.)



Kuva 8. Vasemmalla on valkaistuja jauhamattomia havukuituja ja oikealla valkaistuja jauhettuja havukuituja. Ulkoisen fibrillaation seurauksena syntyvät hienoainekset näkyvät jauhettujen kuitujen väleissä. (Lumiainen 2000, s. 90.)

Jauhatuksen vaikutukset kuitujen rakenteeseen on esitetty yhteenvetona taulukossa 1. Kyseisessä taulukossa esitetään kuidussa tapahtuva rakenteen muutos, muutokseen vaikuttavat päätekijät sekä muutoksen vaikutus paperin lujuusominaisuuksiin. Taulukon lähdemateriaalina on aiemmin esitetty teoria.

Taulukko 1. Jauhatuksen erilaiset vaikutukset kuitujen rakenteeseen ja niiden vaikutukset paperin lujuusominaisuuksiin taulukoituna.

Kuidun rakenteessa tapahtuva muutos	Muutokseen vaikuttavat tekijät	Vaikutukset paperin lujuusominaisuuksiin
Kuitujen lyheneminen	Liian korkea kuormitustaso eli liialliset jauhatusvoimat	Lujuusominaisuuksien heikkeneminen
Kuitujen suoristuminen	Matala jauhatussakeus ja kuitua venyttävät jauhatusvoimat	Lujuusominaisuuksien parantuminen
Sisäinen fibrillaatio	Kuitua puristavat ja taivuttavat jauhatusvoimat	Lujuusominaisuuksien parantuminen
Ulkoinen fibrillaatio ja hienoaineen syntyminen	Kuitua puristavat ja leikkaavat jauhatusvoimat	Lujuusominaisuuksien parantuminen

3.4 Kuitujen jauhautuneisuuden mittaaminen

Perinteisesti kuitujen jauhautuneisuutta mitataan laboratoriossa suoritettavien kokeiden avulla, joissa simuloidaan paperinvalmistusprosessia laboratorioympäristössä. Käytännössä jauhatuksen laatua seurataan kuitenkin paperikoneelta valmistuvan paperin ominaisuuksien avulla, joita varten suoritetaan laboratoriokokeita paperiarkille. Vaikka yksittäisen kuidun ominaisuudet vaikuttavatkin suoraan paperin ominaisuuksiin, on pelkkien kuidussa tapahtuvien muutoksien perusteella vaikeata, tai jopa mahdotonta ennustaa lopullisen paperin ominaisuuksia. Jauhautuneisuutta seurataankin paperin ominaisuuksia mittaamalla, joiden tulokset määrittävät vaadittavan jauhatustason. Jauhatuksen toteutumisen mittausta varten suoritetaan laboratoriokokeita jauhetulle massalle, joiden avulla voidaan arvioida

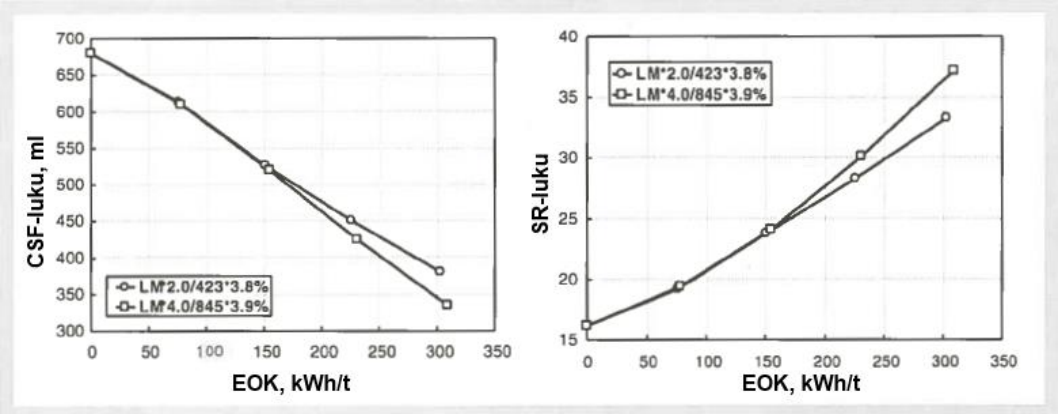
massan suotautuvuutta tai tarvittaessa keskittyä yksittäisten kuitujen ominaisuuksien muutoksiin. (Heikkurinen 1999, s. 19; Hiltunen 1999, s. 39.)

Nykyisin usealla paperikoneella on laboratoriokokeiden lisäksi käytössä massa-analysaattorit, joiden avulla kuidun ominaisuuksista saadaan jatkuvaa mittaustietoa laboratoriokokeiden rinnalle. Käytännössä analysaattorista ei kuitenkaan seurata muuta kuin massan suotautuvuutta, mikä pyritään pitämään riittävänä. Kuitujen tarkempia ominaisuuksia tutkitaan tilanteissa, joissa valmistuneen paperin ominaisuuksissa havaitaan poikkeamia. Oleellista jauhatuksen vaikutuksien mittaamisessa on näytteiden ottaminen tuoremassasta ja jauhetusta massasta, jolloin saadaan mittaustieto jauhatuksen vaikutuksista tuoremassojen ominaisuuksien vaihteluista riippumatta.

3.4.1 Suotautuvuus

Kuitujen jauhautuneisuutta mitataan jauhetun massan vedenpoistokyvyn avulla eli massan suotautuvuusominaisuuksien avulla, jotka heikkenevät kuiduissa tapahtuvien muutoksien kasvaessa. Yleisempiä massan suotautuvuuden eli massan jauhatusasteen mittareita ovat Canadian Standard freeness -luku (CSF) ja Schopper-Riegler -luku (SR). Suotautuvuutta mitataan erillisellä laitteistolla, jossa laimennettua massasuspensiota suodatetaan vapaasti laitteistossa olevan sihtilevyn läpi. Massa kasaantuu suotautumisen edetessä sihtilevyn päälle ja massasta poistuva vesi ohjautuu erilliseen mittasylinteriin. Mittasylinteriin ohjautuvan veden määrän perusteella arvioidaan massan suotautuvuutta ja sitä kautta massan jauhautuneisuutta. (Hiltunen 1999, s. 44.)

CSF- ja SR-kokeet suoritetaan samanlaisella mittalaitteistolla, mutta CSF -lukua mitattaessa käytetään yhtä litraa massasuspensiota, jonka sakeus on 3 g/l ja SR -lukua mitattaessa käytetään yhtä litraa massasuspensiota, jonka sakeus on 2 g/l. CSF -luku on mittasylinteriin kerääntyvän veden määrä [ml], joka pienenee jauhautuneisuuden lisääntyessä. SR -luvun mittauksessa mittasylinterissä on asteikko SR -arvoille, mikä kertoo suoraan jauhatusasteen. Näin ollen CSF -luku on kääntäen verrannollinen massan suotautumisvastukseen ja SR -luku puolestaan suoraan verrannollinen (Hiltunen 1999, s. 44−45.) Kuvassa 9 on esitetty jauhatusasteen (CSF ja SR) muuttuminen jauhatuksen netto-ominaisenergiankulutuksen eli jauhatuksen määrän suhteen.



Kuva 9. CSF ja SR-luvun muutos energian ominaiskulutuksen (EOK) lisääntyessä, josta huomataan, että EOK:n lisääntyessä CFS -luku käyttäytyy päinvastaisesti kuin SR -luku (muok. Lumiainen 2000, s. 110).

Molempien mittauksien tulokset riippuvat vahvasti massan hienoainepitoisuudesta ja kokoonpuristuvuusominaisuuksista, joten kyseiset mittarit kuvaavat heikosti kuitujen fibrilloitumista. Lisäksi massan laimennusveden laatuominaisuudet (pH, elektrolyyttisyys, kovuus) ja mittausolosuhteet vaikuttavat mittauksien tuloksiin, joten laboratoriokokeiden tulokset eivät välttämättä vastaa täysin massan suotautuvuutta paperikoneella vallitsevissa olosuhteissa. CFS ja SR -luvut ovat molemmat kokeellisia numeroita, jotka eivät kuvaa hyvin jauhettujen kuitujen lujuuspotentiaalia eivätkä massan suotautuvuusominaisuuksia paperikoneen viiraosalla. Tästä huolimatta kyseiset luvut ovat usein käytössä massan jauhatusastetta mitattaessa. (Hiltunen 1999, s. 45.)

CSF ja SR -lukua paremman informaation massan suotautumisominaisuuksista paperikoneolosuhteissa ja massan jauhautuneisuudesta antaa Water Retention Valve -luku (WRV). WRV -luku kuvaa kuituun jääneen veden määrää näytteen sentrifugoinnin jälkeen eli veden painon suhdetta kuivan kuidun painoon. Kyseinen luku on käytännöllinen osoittamaan, kuinka tiiviisti kuiturakenne pidättää vapaata vettä ja on riippuvainen veden suolapitoisuudesta, pH:sta ja lämpötilasta. (Hiltunen 1999, s. 46.)

3.4.2 Kuidun pituus

Kuidun pituutta voidaan mitata erilaisilla optisilla metodeilla tai laboratoriolaitteistolla. Laboratoriolaitteistoissa massaa johdetaan eri tiheyksisien sihtiverkkojen läpi ja poimitaan jokaisen sihtilevyn läpäisemättömät kuidut talteen. Näin saadaan massanäytteestä selville

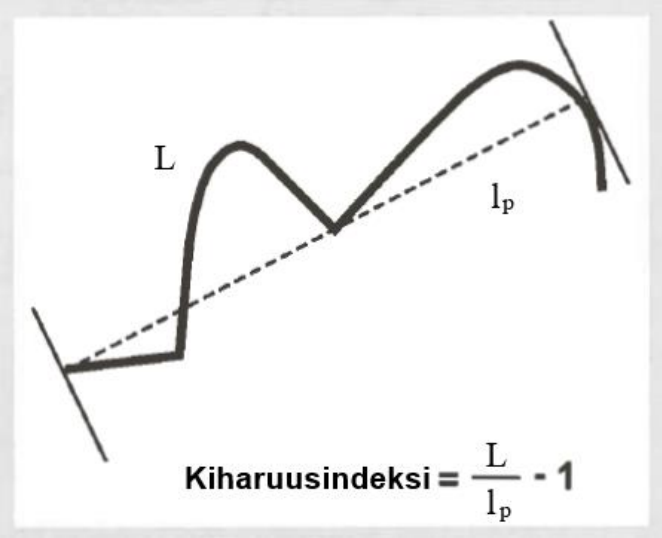
kuitujen pituudet ja niiden jakautuminen. Optisissa laitteistoissa laimennettua massasuspensiota virtautetaan mittauspisteen läpi, jossa valon lähteen avulla tehdään kuidut havaittaviksi mittauspisteessä sijaitsevalle kameralle. Kameralla otetaan virtaavasta massasta halutun ajanjakson välein kuvia, joita tutkitaan kuvan analysointitekniikoilla ja poimitaan kuitujen ominaisuuksia, kuten kuidun pituus talteen. (Heikurinen 1999, s. 22; Hiltunen 1999, s. 47.)

Yleisimpänä optisena kuidun mittauslaitteena pidetään Kajaani FS-200 -laitetta, mikä kertoo näytteen kuidun pituuden jakautumisen, kuidun keskipituuden ja kuidun karkeuden, mikäli näyte on riittävän tarkasti punnittu eli näytteen massa tiedetään. Käytetyin kuidun pituuden mittari on pituuspainotettu keskiarvo, joka ei ole kuitenkaan kovin käyttökelpoinen, jos näyte sisältää suhteellisesti paljon hienoaineita ja lyhyitä kuituja. Havupuumassan ollessa pitkäkuituista, on pituuspainotettu keskiarvo hyvin käyttökelpoinen mittari jauhatuksesta johtuvan pituuden muutoksien arviointiin. (Heikurinen 1999, s. 22.)

Mittauksen periaatteena on löytää kuidun alku- sekä loppupiste ja laskea kuidun pituus massan virtausnopeuden avulla. Laboratoriossa käytettävät laitteistot mittaavat yksittäisiä erillisiä näytteitä, mutta mittalaitteistosta kuten FS-200 -laitteesta on saatavilla online versioita, jotka mittaavat kuitujen ominaisuuksia sivuvirtauksen avulla jatkuvatoimisesti. Lisäksi mittalaitteistoista on saatavilla kehitysversioita, jotka mittaavat optisesti myös muun muassa kuitujen keskileveyksiä, kiharoituneisuutta ja hienoaineen määrää. (Heikurinen 1999, s. 23.)

3.4.3 Kuidun suoruus

Yksittäisten kuitujen suoruutta voidaan arvioida optisella kameran ja polarisoidun valon omaavalla mittalaitteistolla tai yksinkertaisemmin valomikroskoopin avulla. Kuituverkoston kuidut sisältävät kiharoita ja sykkyröitä, kuten aiemmin on mainittu. Kiharoiden ja sykkyröiden erona on kiharan muodostama loiva kaari, kun sykkyrällä tarkoitetaan kuidun rakenteen kohtaa, jossa kuitu muuttaa suuntaa terävästi ja muodostaa kulman. Kuidun kiharuutta voidaan arvioida kuvassa 10 esitetyn kiharuusindeksin avulla, jossa Curl Index (CI) on kiharuusindeksi. (Heikurinen 1999, s. 31.)



Kuva 10. Kiharuusindeksin määrittäminen, jossa L [m] on kuidun muotokäyrän pituus ja l_p [m] on kuidun etäisimpien pisteiden välinen etäisyys (muok. Heikurinen 1999, s. 31).

Kuidun muotokäyrän pituuden ja suorapituuden (kuidun etäisimpien pisteiden välinen etäisyys) mittaamisessa hyödynnetään kuvan analysointitekniikoita. Tyypillisesti kuitua voidaan pitää suhteellisen suorana, kun sen kiharuusindeksi on lähellä nollaa ja kiharana kun kiharuusindeksi lähenee tai ylittää arvon 0,5. Kuitujen sykkyröitymistä arvioidaan sykkyräindeksin (Kink Index, KI) avulla, joka voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla:

$$KI = \frac{N(10°-20°)+2N(21°-45°)+3N(46°-90°)+4N(91°-180°)}{L_t} \quad (9)$$

,jossa KI on sykkyräindeksi, N on näytteessä olevien kulmien lukumäärä, jotka ovat suluissa olevien asteiden välillä lukumäärä ja L_t [m] on näytteessä olevien kuitujen kokonaispituus. (Heikurinen 1999, s. 31−32.)

3.4.4 Fibrilloitumisaste

Fibrilloitumisasteella tarkoitetaan pääasiassa ulkoisen fibrillaation määrää, sillä sisäisen fibrilloitumisen määrää mitataan erillisillä kuidun kylläisyys mittarilla (FSB, fibre saturation point), jolla mitataan kuituun liuenneen veden määrää (Wang, Malouney & Paulapuro 2007, s. 1). Fibrilloitumisastetta mitattaessa mitataan jauhatuksessa syntyvien hienoaineiden eli fibrillien pituuden suhdetta kuitujen pituuteen tai yksinkertaisemmin arvioidaan mikroskoopin avulla syntyneiden hienoaineiden määrää suhteessa näytteessä oleviin ehjiin

kuituihin. Mikroskoopin avulla fibrilloitumista arvioitaessa yksittäinen kuitu luokitellaan kolmeen eri luokkaan: kuituihin jossa fibrillaatiota ei esiinny, fibrilliloituneihin kuituihin ja osittain aukinaisiin kuituihin. Jokaisen luokan kuitujen määrää verrattaessa näytteen kokonaiskuitujen määrään saadaan kuitujen luokittainen prosenttiosuus koko näytteen kuitujen määrästä ja voidaan arvioida koko näytteen fibrilloitumisastetta. (Heikurinen 1999, s. 26).

Edellä mainittua tarkempana menetelmänä ulkoisen fibrillaation määrittämiseen voidaan pitää laskentaa, jossa hyödynnetään optista mittauslaitetta ja kuvan analysointitekniikkaa. Tällaisessa menetelmässä näytteestä otetusta kuvasta lasketaan hienoaineiden peitossa olevien pikseleiden määrä, jota verrataan kuitujen peitossa olevien pikseleiden määrään. Tuloksena saadaan fibrilloitumisaste, joka kertoo näytteessä olevien hienoaineiden pinta-alan suhteessa kuitujen pinta-alaan. (Wang, Maloney & Paulapuro 2007, s. 1.) Kang:n ja Paulapuron (2006, s. 51) mukaan ulkoisen fibrilloitumisen mittaamiseen on kehitetty useita eri tekniikoita, mutta yleisesti hyväksyttyä menetelmää ei ole kuitenkaan olemassa.

Tutkittaessa eri jauhatustapojen aiheuttamia muutoksia fibrilloitumisasteeseen, käytetty mittausmenetelmä ei kuitenkaan näyttele tärkeätä roolia, vaan oleellista on, että mittausmenetelmä pysyy samana ja se on riittävän tarkka muutoksien havaitsemiseksi. Optista mittalaitetta käytettäessä saavutetaan todennäköisesti tarkempi ja vertailukelpoisempi fibrilloitumisasteen tulos näytteiden vertailua varten kuin mikroskoopilla tutkittaessa. Tässä tutkimuksessa fibrilloitumisaste määritellään optista jatkuvatoimista mittalaitetta käyttäen.

3.4.5 Massa-analysaattori

Mittauslaitteistot ovat kehittyneet ja nykyisin markkinoilla on kattavia jatkuvatoimisia massa-analysaattoreita, joihin on mahdollista yhdistää useita kuitulinjoja ja joiden mittauksia on mahdollista käyttää suoraan jauhatuksen realiaikaiseen ohjaamiseen. Periaatteiltaan mittaustavat ovat kuitenkin pysyneet samanlaisia kuin edeltävissä laitteissa. Kohdepaperikoneella massan laatuarvoja mitataan kehittyneellä modulaarisella analysaattorilla, mikä sisältää erillisen optisen mittausosan, näytteenkäsittely-yksikön sekä freenes-moduulin.

Analysaattorin mittausosan ja näytteenkäsittely-yksikön avulla voidaan suorittaa massan laatua tutkivia mittauksia mittausnopeudella 3–6/min. Näytteestä voidaan tutkita muun muassa näytteen kiharuusindeksiä, sykkyräindeksiä, fibrilloitumisastetta, hienoaineiden jakautumista ja karheutta. Erillistä freenes-moduulia käytetään massan yleisen jauhautuneisuustason mittaamiseen eli mitataan massan suotautuvuutta. Analysaattoriin voidaan kytkeä useita näytelinjoja eli samalla analysaattorilla voidaan mitata massan ominaisuuksia monesta eri kohteesta. Lisäksi analysaattorin näytteenkäsittely-yksiköstä voidaan ottaa erillinen näyte laboratoriomittauksia varten, joiden avulla suoritetaan tasaisin väliajoin analysaattorin kalibrointi. Kohdepaperikoneella sijaitsevasta massa-analysaattorista saatavilla olevan lähdemateriaalin luottamuksellisuudesta johtuen tässä tutkimuksessa ei syvennytä tarkemmin massa-analysaattorin käyttämiin mittausmenetelmiin.

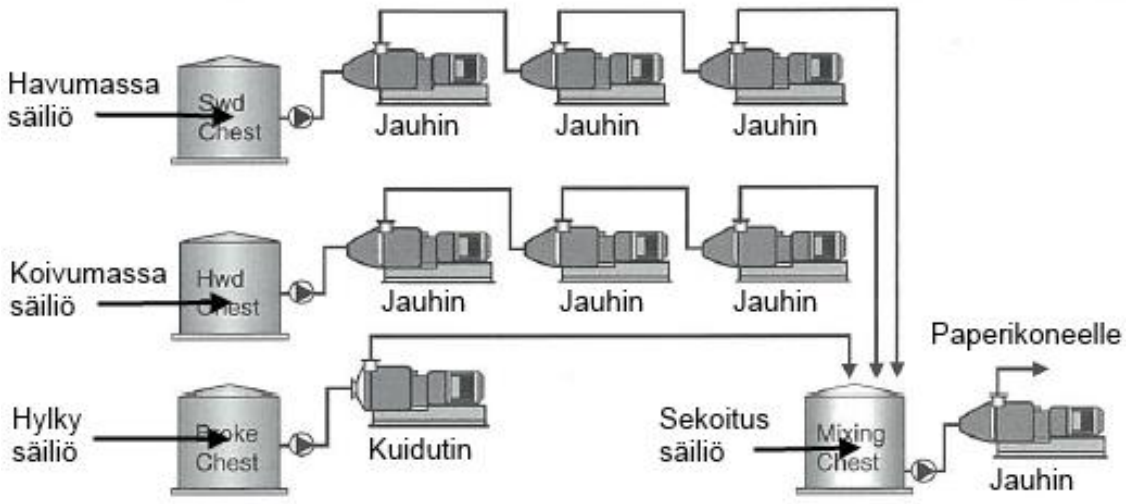
4 JAUHATUSJÄRJESTELMÄ

Jauhatusjärjestelmällä eli jauhinlinjalla tarkoitetaan useiden sarjaankytkettyjen jauhimien muodostamaa järjestelmää, jonka avulla jauhamaton massa jauhetaan paperikoneella käytettävään muotoon. Järjestelmän toteutustapa riippuu useista tekijöistä, kuten jauhettavasta massasta, tarvittavasta jauhatuskapasiteetista ja erityisesti lopputuotteen vaatimuksista. Käytännössä tarvittava jauhatuskapasiteetti määrää tarvittavien jauhimien määrän sekä niiden kokoluokat ja valmistettavan paperin laatuvaatimukset määräävät vaatimukset eri massalajien jauhatuksen luonteelle. Jauhatuksen luonteeseen vaikutetaan käytetyillä terätyypeillä, jauhatussakeudella sekä jauhatustavalla. (Koskenhely 2007, s. 122; Lumiainen 2000, s. 101.)

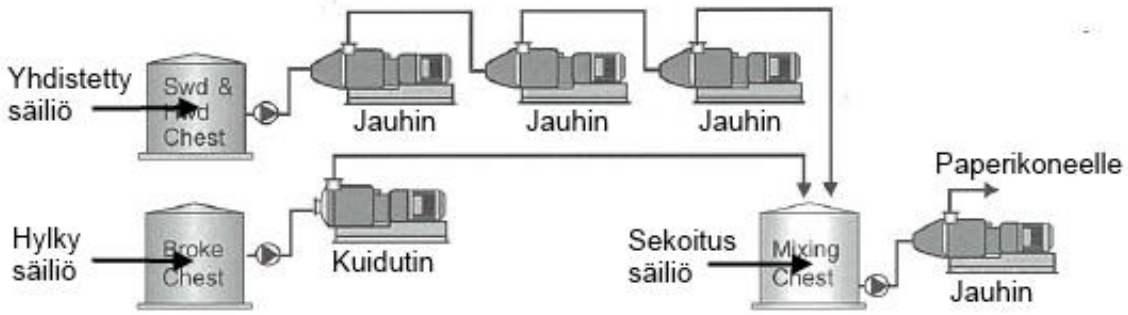
Jauhatusjärjestelmä voi olla yhdistetty, jolloin kaikki massalajit käsitellään samalla jauhinlinjalla eli massalajit sekoitetaan ennen jauhimia. Järjestelmä voi olla myös erillinen, jolloin eri massalajit jauhetaan omalla jauhinlinjallaan. Molemmissa tapauksissa jauhimien määrä määräytyy halutun jauhatustuloksen ja kapasiteetin vaihteluiden perusteella. Mitä korkeampi lopputuotteen vaatima jauhatuksen tarve on, sitä enemmän eri jauhatustasoja eli jauhimia tarvitaan. Erilaiset massalajit vaativat erilaisen jauhatustavan, joten massojen suhteet vaikuttavat yhdistetyllä järjestelmällä saavutettavaan jauhatustulokseen. Erillisissä jauhinlinjoissa jauhatusta voidaan säätää jokaisen massalajin omaisuuksien mukaan, jolloin saavutetaan parempi massakohtainen jauhatuslaatu ja alhaisemmat jauhatuskustannukset. Toisaalta joissain tapauksissa yhtenäinen jauhinlinja voi olla parempi vaihtoehto. (Jokisalo & Salomäki 1983, s. 432; Lumiainen 2000, s. 101–102).

Usein paperikoneilla on käytössä erilliset jauhinlinjat, sillä erillisellä linjalla mahdollistetaan yksittäisen kuidun rakenteellisen muutoksen hyödyntäminen paremmin. Erillisten jauhinlinjojen rakentaminen vaatii kuitenkin enemmän asennuspinta-alaa kuin yhdistetty jauhinlinja, joten etenkin vanhempien paperikoneiden osalta vanhan yhdistetyn jauhinlinjan päivittäminen erillisiin linjoihin ei ole aina mahdollista. (Koskenhely 2007, s. 123.) Kuvassa 11 on havainnollistettu esimerkki erillisestä jauhatusjärjestelmästä ja kuvassa 12 yhdistetystä järjestelmästä. Erillisessä järjestelmässä kullakin massalajilla on kolme sarjaankytkettyä jauhinta sekä sekoitusäiliön jälkeen massalajeille yhtenäinen erillinen

viimeistelyjauhin. Massa pumpataan syöttöpumpulla annostelusäiliöstä jauhinlinjan läpi sekoitussäiliöön, josta se kuvan 11 ja 12 esimerkeissä johdetaan viimeistelyjauhimen läpi eteenpäin paperikoneelle.



Kuva 11. Erillinen jauhatusjärjestelmä, jossa erilaatuiset kuidut jauhetaan toisistaan erillään olevilla jauhinlinjoilla (muok. Lumiainen 2000, s. 102).



Kuva 12. Yhdistetty jauhatusjärjestelmä, jossa kaikki kuidut jauhetaan yhteisellä jauhinlinjalla (muok. Lumiainen 2000, s. 102).

Jauhatusjärjestelmissä voi olla jauhintyypeistä ja jauhatustarpeen eli tuotannon vaihteluista riippuen säädettävä massan takaisinkierrätyslinja viimeisen jauhimen jälkeen. Takaisinkierrätyslinjan avulla osa jauhetusta massasta johdetaan ennen sekoitussäiliötä takaisin syöttöpumpun imuyhteeseen. Takaisinkierrätyslinjan tarkoituksena on varmistaa riittävä massavirtaus jauhimien läpi jokaisessa tuotantotilanteessa. (Lumiainen 2000, s. 116). Jauhatusjärjestelmästä riippumatta halutun jauhatustuloksen saavuttaminen on riippuvainen

muun muassa jauhatukseen käytetyistä jauhintyypeistä ja jauhimien sisältämistä teristä. Eri jauhintyypit poikkeavat toisistaan rakenteeltaan, mutta toimintaperiaate pysyy hyvin samanlaisena. Jauhintyyppien välillä terien jauhatuspinta-alat muodostuvat eritavoilla, mutta teräkuvioinnin terägeometriat ovat samanlaiset.

4.1 Jauhintyypit

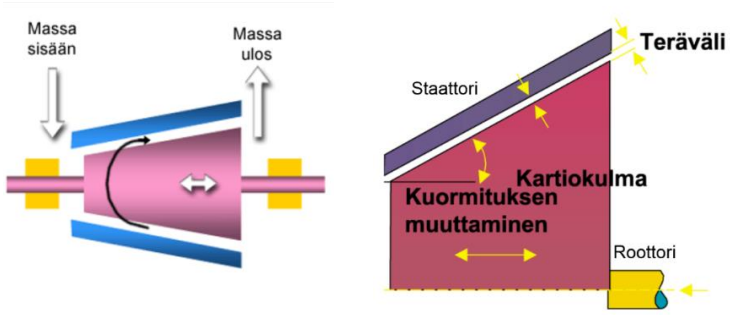
Massan jauhatusmetodit, niihin käytetyt laitteet sekä työkalut ovat kehittyneet alkuperäisistä iskevistä konstruktioista nykyaikaisiin jatkuvatoimisiin jauhimiin vuosisatojen aikana. Jauhatuskapasiteetin lisääntymisen tarve sekä jauhatuksen tärkeyden ymmärtäminen ovat olleet keskeiset syyt jauhatusteknologioiden kehittymiselle. (Koskenhely 2007, s. 94.) Massanjauhatus voidaan toteuttaa rakenteeltaan toisista poikkeavilla jauhinlaitteilla, joiden valinta riippuu jauhettavasta massasta ja valmistettavasta paperista. Jauhinlaitteet on jaettu kolmeen päätyyppiin, joita ovat sylinteri-, kartio- ja levyjauhimet. (Syrjänen & Oivanen 1983, s. 453–454.) Kartio- ja levyjauhimien tyypilliset jauhatusparametrit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Tyypilliset kartio- ja levyjauhimen jauhatusparametrit havumassalle (Lumiainen 2000, s. 99–101).

Jauhatusparametri	**Kartiojauhin**	**Levyjauhin**
Teräharjanteen leveys [mm]	3,5 – 5,5	3,0 →
OSK [J/m]	0,9 – 6,0	1,5 – 4,0
OPK [J/m²]	250 – 1000	500 →
Massan sakeus [%]	3,5 – 4,5	3,5 – 4,5

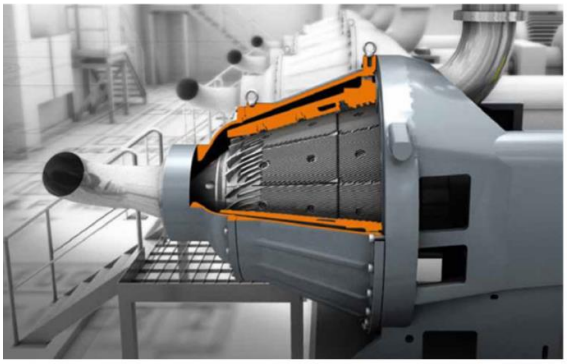
4.1.1 Kartiojauhin

Kartiojauhimen terät ovat nimensä mukaisesti kartiomaiset, joista ulkoterä (staattori) on kiinteä ja sisäterä (roottori) pyörivä. Jauhettava massa syötetään kartion kapeammassa päässä sijaitsevasta syöttöyhteestä, josta massa etenee terävälissä sijaitsevaa jauhatusaluetta pitkin jauhimen läpi massan poistoputkeen. Jauhatustapahtuman hallitsemiseksi jauhimen kuormitusta säädetään pyörivän roottorin asemaa muuttamalla. Kartiojauhimen toimintaperiaate ja perusgeometria on esitetty kuvassa 13. (KnowPap 2015.)



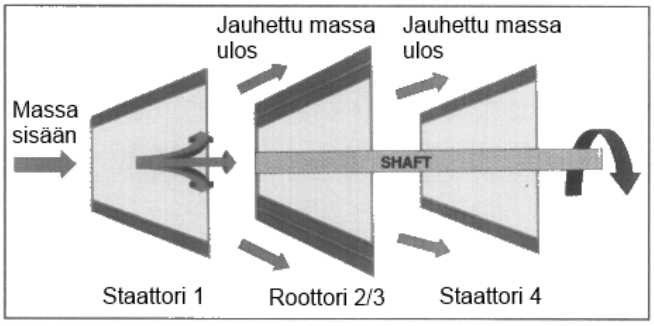
Kuva 13. Kartiojauhimen toimintaperiaate ja geometria, jossa vasemmalla on esitetty massan kulkeutuminen jauhatusalueen läpi ja oikealla terävälin muodostuminen (muok. KnowPap 2015).

Ensimmäinen kartiomaisilla terillä oleva jauhin oli matalan kartiokulman omaava Jordan -tyyppinen jauhin. Jauhin on varustettu läpi-akselilla, jossa pyörivä roottori on laakerointien välissä. Lisäksi jauhinta käytettiin tyypillisesti karkeilla terillä, jotta saavutettiin mahdollisimman hyvä kuituja katkova jauhatusvaikutus. Seuraava kartiojauhimen kehitysversio oli Claflin-tyypin jauhin, joka omaa edeltäjäänsä huomattavasti jyrkemmän noin 30 asteen kartiokulman, jonka seurauksena myös terien pituus on lyhempi. Molempien kartiojauhimien rakenteellisena heikkoutena on läpi-akseli, mikä vaikeuttaa terien vaihtoa sekä muita jauhimen kunnossapitotöitä. Nykyisin kartiojauhimien rakenteessa akseli ei ole läpimenevää tyyppiä, sillä akselin laakerointi on toteutettu siten, että pyörivä roottori on akselin päässä ja staattori on kiinnitetty jauhimen avattavaan kanteen. Rakenteen muutoksen seurauksena terät ovat helpommin tarkastettavissa ja vaihdettavissa. (Koskenhely 2007, s. 111; Lumiainen 2000, s. 98–99; Knowpap 2015.) Nykyaikainen 20 asteen kartiokulman omaava jauhin on esitetty kuvassa 14. Jordan- ja Claflin-jauhimet on kuvattuna liitteessä 1.



Kuva 14. Nykyaikainen kartiojauhin, jonka osaleikkauksessa näkyy pyörivä roottori ja kanteen kiinnitetty kiinteä staattori sekä niiden välinen jauhatusalue (KnowPap 2015).

Kartiojauhimia on saatavilla useilla erilaisilla terävaihtoehdoilla ja useassa eri kokoluokassa. Esimerkiksi erään jauhinvalmistajan kartiojauhinta on saatavana kuudessa eri kokoluokassa, joiden tehoalue vaihtelee 110 kilowatista 2600 kilowattiin ja niiden teräväli säätyy sähkömekaanisesti. (Koskenhely 2007, s. 111.) Perinteisten kartiojauhimien pohjalta on kehitetty kaksoiskartiojauhimia, mitkä omaavat kaksi jauhatusaluetta. Erään kaksoiskartiojauhimen toimintaperiaate on esitetty esimerkinomaisesti kuvassa 15. Esimerkissä kaksi jauhatusaluetta ovat sisäkkäin ja jauhettava massa syötetään jauhimeen tavallisen kartiojauhimen tapaan yhden syöttöyhteen kautta. Syötettävä massa jakaantuu molempien jauhatusalueiden kesken, jonka jälkeen massa etenee poistoputkeen. (Lankford 2001, s. 50.)



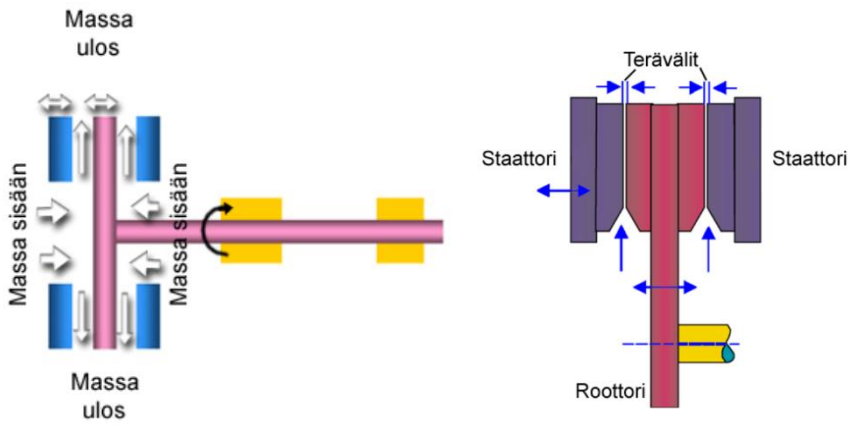
Kuva 15. Erään valmistajan kaksi jauhatusaluetta sisältävän kaksoiskartiojauhimen toimintaperiaate, jossa massa syötetään yhdestä syöttöyhteestä (muok. Lankford 2001, s. 50).

Kaksoiskartiojauhimissa on kaksi kiinteää staattoria ja niiden välissä kaksi jauhatuspintaa sisältävä liukuva roottori. Roottori tasapainottuu tasaisesti staattoreiden väliin jauhettavan massan paineen avulla ja muodostaa jauhimeen kaksi jauhatusaluetta. Kahden jauhatusalueen omaava rakenne mahdollistaa jauhimen kokoluokan pienentämisen jauhatusalueen kokonaispinta-alaa pienentämättä, minkä seurauksena jauhimen energiatehokkuus paranee. (Lankford 2001, s. 50.)

4.1.2 Levyjauhin

Levyjauhimissa terät ovat puolestaan kiekkojen muotoiset ja ne ovat vertikaalisesti jauhimen akseliin nähden. Levyjauhimet on jaettu yksi- ja kaksi- ja monilevyjauhimiin, joista yksilevyisiä käytetään pääasiassa korkean sakeuden jauhatuksessa, sillä niiden jauhatuskapasiteetti on alhainen verrattaen useamman levyn jauhimiin. Matalissa

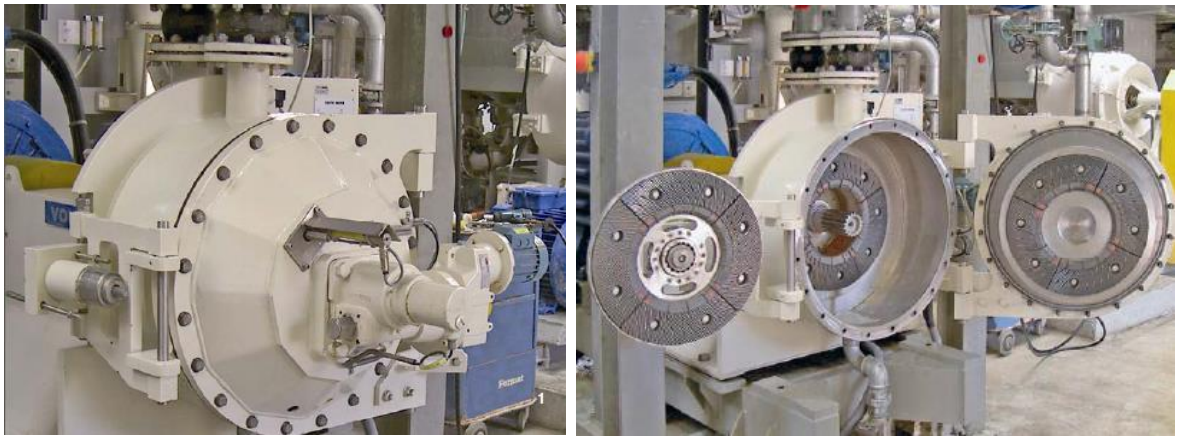
sakeuksissa (3–6 %) käytetään kaksoislevyjauhimia ja monilevyjauhimia pääasiassa massojen jälkijauhatuksessa vielä matalammilla sakeuksilla. Yksilevyjauhin sisältää kaksi teräkiekkoa, joista toinen on pyörivä ja toinen kiinteä. Kiekkojen väliin muodostuu yksi jauhatusalue. Kaksoislevyjauhimessa teräkiekkoja on vastaavasti kolme, joista yksi pyörii kahden kiinteän välissä. Tämän seurauksena kaksoislevyjauhimessa jauhatusalueita on kaksi ja jauhatuskapasiteettia on vastaavan kokoista yksilevyjauhinta enemmän. Monilevyjauhimessa pyörivien roottoreiden määrää on lisätty kahteen, ja staattoreita on kolme, joista yksi sijaitsee roottoreiden välissä. Jauhettava massa syötetään levyjen väliin syöttöyhteen avulla, josta massa etenee jauhatusalueiden läpi poistoputkeen. Kaksoislevyjauhimen toimintaperiaate ja perusgeometria on esitetty kuvassa 16. (KnowPap 2015; Lumiainen 2000, s. 100.)



Kuva 16. Kaksoislevyjauhimen toimintaperiaate ja rakenne, jossa vasemmalla on esitetty massan kulkeutuminen jauhatusalueiden läpi ja oikealla terävälien muodostuminen (KnowPap 2015).

Ensimmäinen levyjauhin oli yksilevyinen Sutherland-tyyppinen jauhin, joka julkaistiin vuonna 1928. Jauhimessa massa syötetään syöttöyhdettä pitkin staattorin lävitse teräväliin, jonka läpi massa virtaa jauhimen pohjassa sijaitsevaan poistoputkeen. Poikkileikkaus Sutherland-jauhimesta on esitetty liitteessä 1. Kaksoislevyjauhin on kartiojauhimen ohella suosituimpia tehdasolosuhteissa käytettyjä jauhimia. Esimerkki erään valmistajan nykyaikaisesta kaksoislevyjauhimesta on kuvassa 17. Jauhinta on saatavina viidessä eri kokoluokassa, joista jokainen on saatavilla vähintään kahdella eri levykoolla. Levyjen halkaisijat vaihtelevat 467 mm ja 1473 mm välillä. Jauhimessa on kartiojauhimen lailla avattava kansi, johon toinen staattoreista on kiinnitetty. Roottori on sijoitettu akselin päähän

ja toinen staattoreista on kiinnitetty jauhimen runkoon. Jauhettava massa syötetään jauhimen rungossa olevasta syöttöyhteestä akselin ympärille, josta jakaantuu kahdelle jauhatusalueelle. Jauhatusalueiden kautta massa etenee yhteen poistoputkeen. (Koskenhely 2007, s. 111−112.)

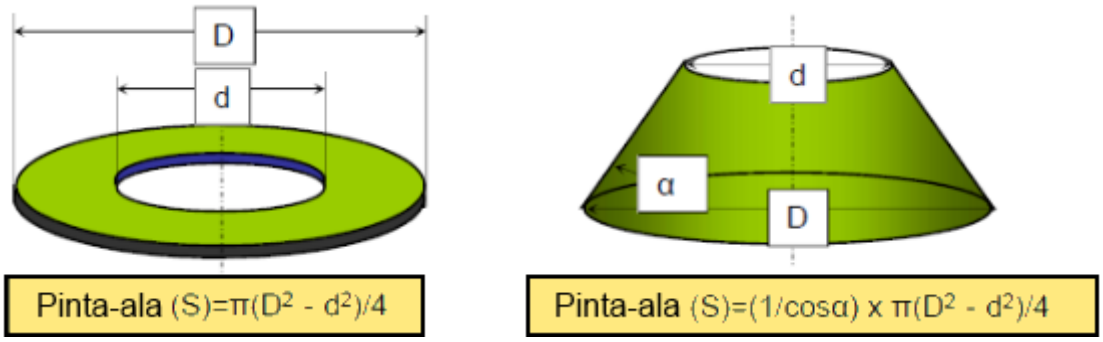


Kuva 17. Kaksoislevyjauhin suljettuna ja huolto-asennossa (Voith Paper 2013).

Jauhettavan massan rakenne, jauhatusvastus sekä haluttu jauhatustulos määräävät jokaisen jauhintyypin kohdalla oikean kokoluokan, jauhatuskapasiteetin, ja tarvittavan jauhatusintensiteetin. Yleisesti pitkäkuituinen havumassa on lujinta, joten niiden jauhatusvastus on korkeampi kuin heikkojen ja lyhyiden massojen. Tämän seurauksena havumassan jauhatus vaatii myös enemmän jauhatusenergiaa. (Lumiainen 2000, s. 101.)

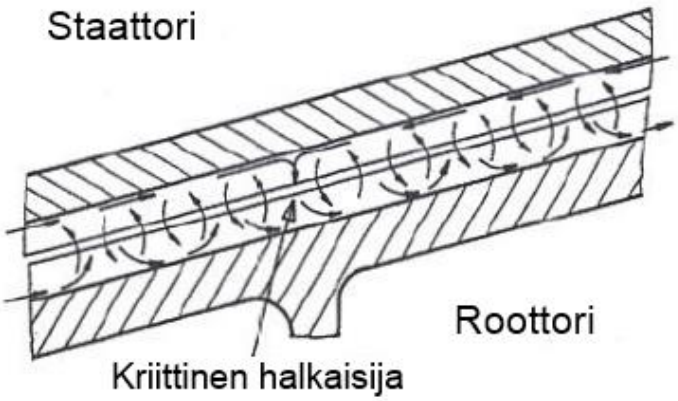
4.1.3 Jauhatuspinta-alat ja virtaukset

Kartiojauhimen kartiokulman ansiosta jauhatusalueen pinta-ala on suurempi kuin vastaavan terähalkaisijan omaavalla levyjauhimella. Sama jauhatuspinta-ala saavutetaan pienemmällä halkaisijalla, millä on vaikutus jauhimen kuluttamaan häviötehoon, kuten aiemmin jauhatusteorioiden yhteydessä esitettiin. Pienemmän halkaisijan seurauksena roottorin kehänopeus on vastaavan jauhatuspinta-alan levyjauhinta huomattavasti matalampi. Matalampi kehänopeus mahdollistaa jauhimen kierrosnopeuden nostamisen, minkä seurauksena jauhatusintensiteetti laskee. (Lankford 2001, s. 50.) Kuvassa 18 on esitetty levy- ja kartiojauhimen jauhatuspinta-alojen laskenta. Kuvasta havaitaan, että halkaisijoiden pysyessä samana kartiokulman α tuoma kerroin (1/cosα) kasvattaa jauhatuspinta-alaa kartioterille suotuisaksi.



Kuva 18. Jauhinterien pinta-alojen laskenta, jossa vasemmalla levyjauhinterän ja oikealla kartiojauhinterän malli (muok. Nurminen 2016a).

Kartio- ja levyjauhimien jauhatusalueelle syntyy virtauksia, joiden mukana kuidut etenevät jauhatusalueen läpi. Kuituja eteenpäin vievä virtaus syntyy pyörivän roottorin teräuriin ja staattorin kapeamman pään uriin, mutta jauhatusalueen loppupäässä staattorin teräuriin syntyy vastavirtausta. Vastavirtaus kohti syöttöyhdettä jatkuu tiettyyn pisteeseen asti, jossa se yhtyy takaisin eteenpäin vievään päävirtaukseen. Tämän pisteen paikkaa kutsutaan jauhimen kriittiseksi halkaisijaksi. Kriittisten halkaisijan paikkaan voidaan vaikuttaa jauhimen pyörimisnopeuden, syöttövirtauksen sekä -paineen avulla. Eteenpäin vievä virtaus, vastavirtaus sekä kriittinen halkaisija on esitetty kuvassa 19, jossa on havainnollistettu myös aiemmin esitetyt uriin syntyvät pyörrevirtaukset. (Koskenhely 2007, s. 108–109; Wittberg et al. 2012, s. 173.)



Kuva 19. Kartiojauhimen teräpari, jossa on osoitettu kriittinen halkaisija sekä teräväliin muodostuvat pyörrevirtaukset (muok. Koskenhely 2007, s. 109).

Jauhatusalueen virtaukset ovat jauhatuksen onnistumisen kannalta tärkeitä, sillä ne vaikuttavat kuitujen liikkeeseen ja näin ollen kuitujen joutumiseen rasituksen alaiseksi. Jauhettujen kuitujen määrä kasvaa mitä lähempänä syöttöyhdettä kriittinen halkaisija sijaitsee eli kuinka voimakkaasti kuidut palaavat staattorin urissa takaisin ja näin ollen läpäisevät jauhatusalueen mahdollisesti useammin. Toisaalta kuitujen jauhautuneisuuden heterogeenisyys voi lisääntyä, sillä osa kuiduista voi edelleen läpäistä jauhimen jauhamattomana, mutta vastaavasti osa kuiduista saattaa jauhautua korkean vastavirtauksen johdosta vielä useammin kuin normaalisti. (Koskenhely 2007, s. 109.) Pyörrevirtaukset syntyvät teräurien yläosaan ja uran suuntaiset virtaukset urien pohjalle (Wittberg et al. 2012, s. 173).

4.2 Jauhinterät yleisesti

Jauhinterät ovat jauhatuksen onnistumisen kannalta jauhatuksen tärkein osa, sillä jauhimen jauhatusenergia välitetään terien kautta muokattaviin kuituihin. Terien ominaisuuksiin vaikuttavat muun muassa terägeometria, mittapysyvyys ja terämateriaali. Terägeometrian valintaan vaikuttaa oleellisesti jauhettavan massan laatu ja käytettävä jauhintyyppi. Terien materiaalilta vaaditaan hyvän kulutuskestävyyden lisäksi riittävää pinnan kovuutta, jotta teräpinnat eivät kiillotu jauhatuksen seurauksena, vaan pysyvät alkuperäisessä pinnanlaadussaan. Lisäksi terämateriaalin on kestettävä jauhatuksessa muodostuvia rasituksia ja lämmönvaihteluita. (Syrjänen & Oivanen 1983, s. 461.) Lopulliset terämateriaalin ominaisuudet riippuvat käytetyistä seosaineista ja jälkikäsittelymenetelmistä. Materiaalilta vaaditaan hyvää murtolujuutta, korroosionkestoa ja kulumisenkestoa, sillä terien muokkaantuminen, kuten teräsärmän liiallinen pyöristyminen lisää energian kulutusta ja vastaavasti heikentää kuitujen jauhautuneisuutta. (Lumiainen 2000, s. 116.)

Pienien jauhimien terät ovat valmistettu yhdestä kiinteästä osasta, mutta isommissa tehdasolosuhteissa käytössä olevissa jauhimissa terät koostuvat useammista teräsegmenteistä. Segmentit koostuvat useista teräharjanteista ja niiden välisistä urista, jotka muodostavat teräkuvioinnin. Itse kuituja rasittavat pinnat ovat teräharjanteen särmä- ja otsapinnat. Terien perinteisiä valmistusmenetelmiä ovat valaminen, koneistaminen ja hitsaaminen. Terägeometrioiden mittavariaatiot ovat lisääntyneet laserteknologian ansiosta, mikä on mahdollistanut erittäin kapeiden teräurien ja -harjanteiden valmistamisen. Terien

terämateriaalit riippuvat valmistajasta, mutta pääsääntöisesti käytetään martensiittista ruostumatonta terästä. Tyypilliset kartiojauhimen terät on esitetty kuvassa 20. (Koskenhely 2007, s. 128.)

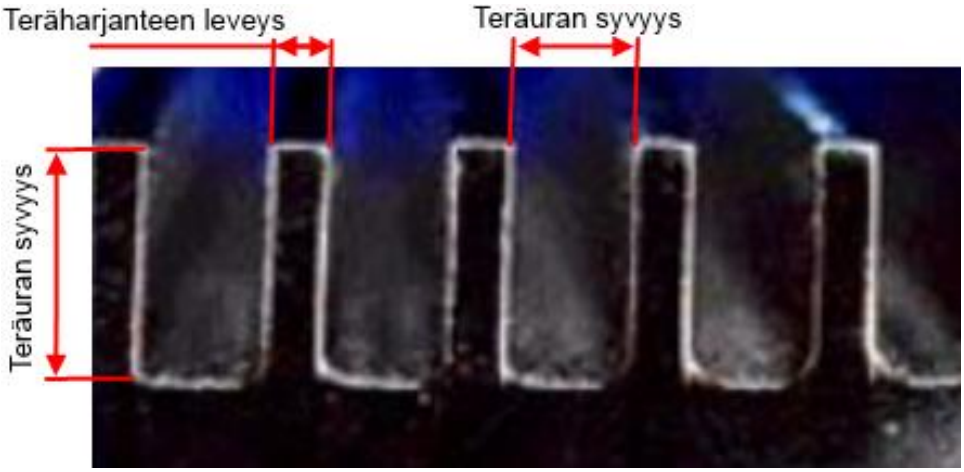
Kuva 20. Kaksi kartiojauhimen teräparia, joista vasemman puoleisessa teräsegmentit ovat kiinnitetty pulttiliitoksien avulla (KnowPap 2015).

4.2.1 Terägeometriat

Terien terägeometrialla määritetään kuinka jauhatusvoimat kohdistuvat kuituihin ja millaiseen rasitukseen kuidut saatetaan. Terägeometriat koostuvat teräurien ja -harjanteiden dimensioista sekä jauhintyypistä riippuvasta jauhatuspinta-alasta. Muuttuvia segmenttien teräparametrejä ovat teräharjanteen leveys ja pituus, teräurien syvyys ja leveys sekä niiden radiaalikulma. Vastakkain olevien roottorin ja staattorin terien välinen teräharjanteiden leikkauskulma on 20–35 asteen välillä, riippuen jauhettavasta massasta. Leikkauskulmalla ehkäistään jauhimen terien kuituja katkovaa ominaisuutta ja mahdollistetaan jauhimen käyttö joko pumppaavana tai ei-pumppaavana. Teräurissa voi olla myös patoja, mutta niiden käyttö on tuoremassojen jauhatuksessa harvinaista. Oikeanlainen teräkuviointi valitaan jauhatettavan massan, jauhatustavoitteiden ja jauhatusolosuhteiden mukaan. Esimerkiksi pitkät ja vahvat havukuidut vaativat leveämmät teräurat ja -harjanteet kuin lyhyet ja heikommat kuidut. Taulukossa 3 on esitelty tyypilliset teräurien ja -harjanteiden dimensiot havumassan jauhatukselle eri jauhintyypeillä. (Lumiainen 2000, s. 115). Kuvassa 21 on esitetty erään jauhinterän teräkuviointi päästä kuvattuna.

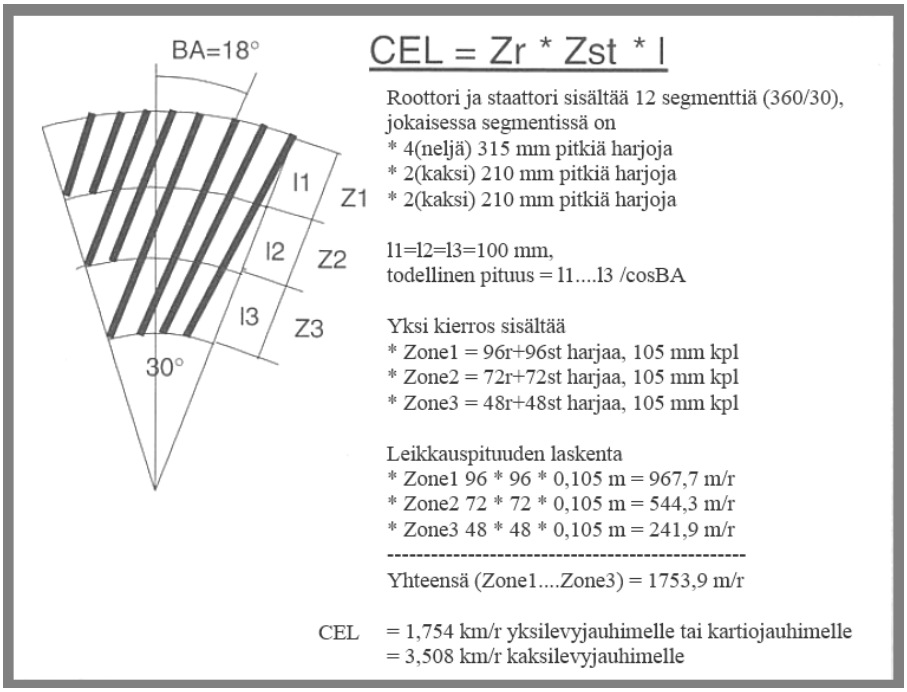
Taulukko 3. Tyypilliset terädimensiot kartio- ja levyjauhimille, joissa havaitaan eroavaisuuksia jauhintyyppien välillä (Lumiainen 2000, s. 115).

Terädimensio	**Kartiojauhimet**	**Levyjauhimet**
Harjanteiden leveys [mm]	3,5 – 5,5	3,0 – 5,0
Urien leveys [mm]	4,5 – 7,0	3,0 – 5,0
Urien syvyys [mm]	10,0	7,0



Kuva 21. Kapeat teräharjanteet sisältävän laserteknologian avulla valmistetun jauhinterän teräkuviointi, jossa terädimensiot on havainnollistettu mittaviivojen avulla (muok. Joy et al. 2004, s. 3).

Ominaissärmäkuorman laskennassa (3) käytetty terien leikkausnopeus sisältää jauhimen pyörimisnopeuden. Jos pyörimisnopeus jätetään pois, käsitellään teräkohtaista leikkaussärmäpituutta (Cutting Edge Length, CEL). Terien leikkaussärmäpituus kuvaa yhden teräparin leikkaavien särmäpintojen yhteispituutta yhden kierroksen aikana. Leikkaussärmäpituuden laskeminen on esitetty esimerkin mukaisesti kuvassa 22. (Koskenhely 2007, s. 116.)

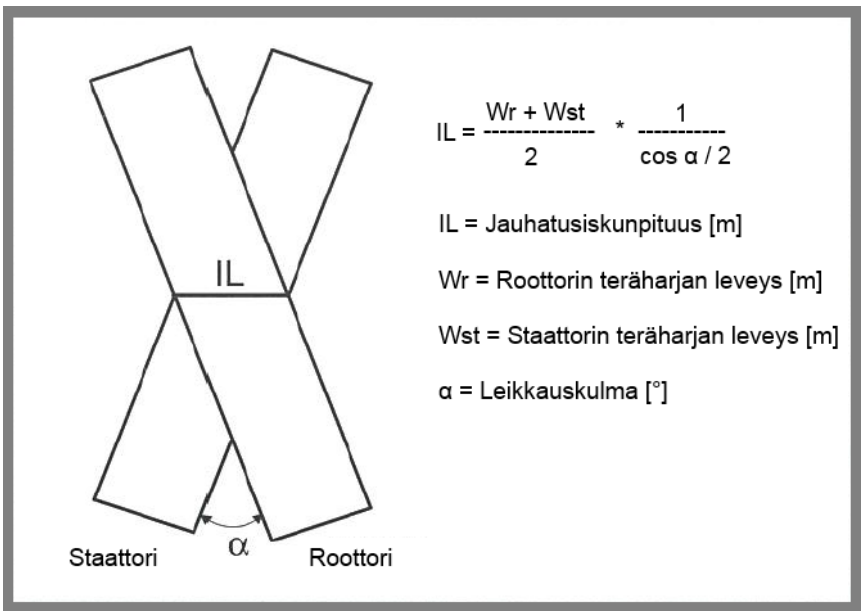


Kuva 22. Leikkaussärmäpituuden laskenta, jossa esitellyssä yhtälössä CEL on leikkaussärmäpituus (leikkauspituus) [Km/r], Z_r on roottorin teräharjojen lukumäärä, Z_{st} on staattorin teräharjojen lukumäärä ja l on teräsärmien kontaktipituus [km] (muok. Lumiainen 2000, s. 93).

Terien leikkauspituus on roottorin ja staattorin teräharjojen yhdistetty pituus, mikä on riippuvainen jauhintyypistä, jauhimen kokoluokasta ja teräharjojen lukumäärästä. Kehittyneiden terien valmistusmenetelmien seurauksena voidaan valmistaa yhä kapeampia teräuria ja -harjanteita, mikä mahdollistaa terien suuren leikkauspituuden teräpinta-alaa lisäämättä eli käytännössä jauhimen kokoluokkaa kasvattamatta. Korkean leikkauspituuden seurauksena jauhatusenergia kohdistuu kuituihin useammalla teräsärmällä, mikä laskee jauhatusintensiteettiä. Tämän seurauksena jauhinta voidaan kuormittaa eli jauhatuksen määrää lisätä, kuituihin kohdistuvan jauhatusintensiteetin muuttumatta. Lisäksi suuri leikkauspituus tarkoittaa jauhatustapahtuman mahdollistavien teräpintojen määrän lisääntymistä, mikä parantamaan kuitujen jauhautuneisuutta, sillä kuidun todennäköisyys joutua teräpintojen rasitettavaksi kasvaa. (Joy et al. 2004, s. 3−4.)

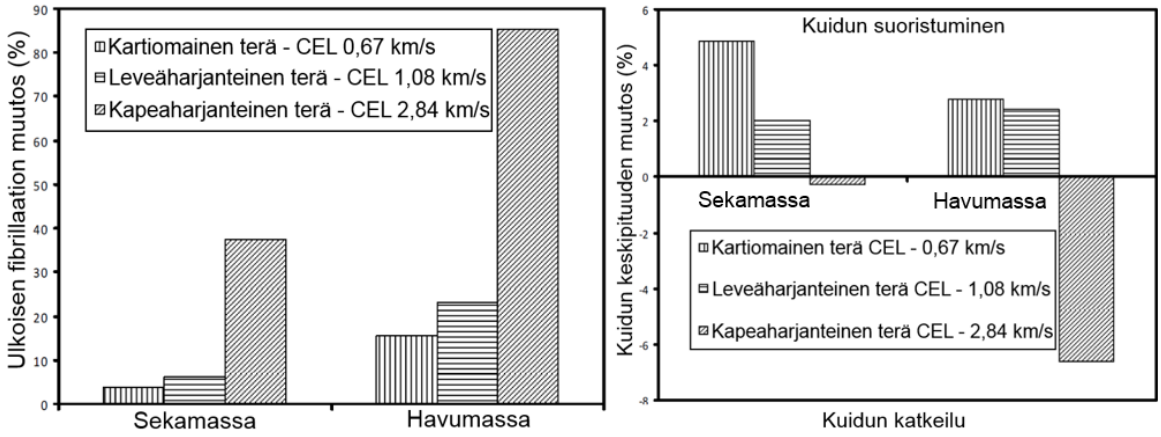
Teräharjanteiden leveyden huomioivan ominaissärmäkuorman sovellutuksen ominaispintakuorman laskennassa käytetty jauhatusiskunpituus (Impact Length IL) määräytyy teräharjojen leveyden sekä roottorin ja staattorin välisen kulman perusteella.

Jauhatusiskupituuden laskenta on havainnollistettu kuvassa 23. Jauhatusiskunpituus koostuu staattorin ja roottorin teräharjojen keskileveyden ja niiden välisen leikkauskulman muodostaman komponentin tulona. Jauhatusiskunpituuden avulla arvioidaan kuinka pitkällä matkalla kuituja kuormitetaan teräharjojen otsapintojen välissä. (Lumiainen 2000, s. 95.)



Kuva 23. Jauhatusiskunpituuden (IL) laskenta (muok. Lumiainen 2000, s. 95).

Kapeat teräurat ja -harjanteet omaavien terien eli terien, joiden leikkauspituus on suuri, on havaittu olevan suotuisia, jos kuitujen ulkoista pintaa halutaan muokata tehokkaasti eli jauhatuksen tuloksena halutaan korkeaa fibrillaatiota ja turpoamista. Toisaalta suuren leikkauspituuden terät katkovat kuituja enemmän kuin matalamman leikkauspituuden terät, jotka omaavat hyvän kyvyn suoristaa kuitujen kiharoita, mutta fibrillioivat kuituja heikommin. Kapeat teräharjanteet kuormittavat kuituja lyhyeltä pituudelta, mikä johtaa helpommin kuidun katkeamiseen kuin leveämmillä teräharjanteilla kuormittaessa, jolloin kuitu kantaa kuormituksen pidemmältä matkalta. Toisaalta silloin kuin teräharjanteita on paljon eli leikkauspituus on suuri, kuidut joutuvat useammin rasituksen alaisiksi teräharjanteiden väliin, mikä parantaa jauhatustulosta muilta osin. Terien geometrioiden valinnassa tulee huomioida jauhettavan massan laatu ja haluttu jauhatustulos sekä jauhatustapa. (El-Sharkawy et al. 2008, s. 420–422.) Terien leikkauspituuden vaikutus kahden eri massalaadun fibrilloitumiseen ja kuidun keskipituuteen on havainnollistettu kuvassa 24.



Kuva 24. Terägeometrian vaikutus ulkoiseen fibrillaatioon ja kuidun keskipituuteen sekamassalla ja havumassalla käyttäen samoja jauhatusarvoja. Kuvasta nähdään ulkoisen fibrillaation lisääntyvän ja kuitujen keskipituuden laskevan terien leikkauspituuden kasvaessa. (muok. El-Sharkawy et al. 2008, s. 418.)

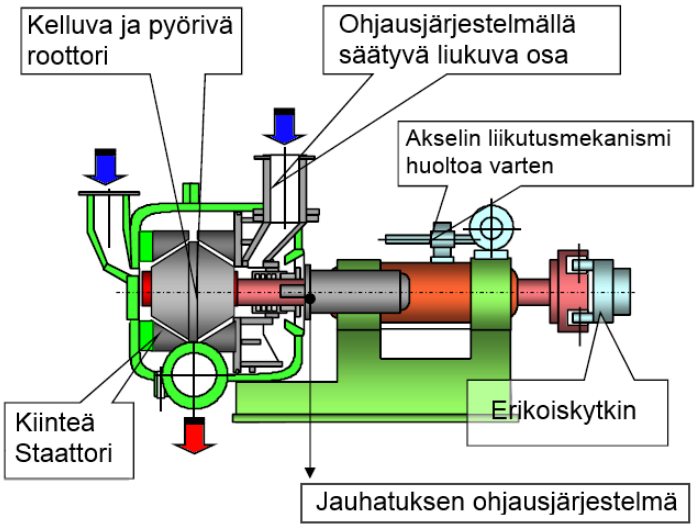
Jauhatustavasta riippumatta terägeometrioiden valinnassa tulee huomioida kolme ensisijaista tekijää, joita ovat terien kyky muokata kuitujen rakennetta, terien virtauksen käsittelykyky ja terämateriaalin kulutuskestävyys. Tärkeimpänä tekijänä on terien kuitujen muokkauskyky, sillä jauhimien ensisijainen tarkoitus on nimenomaan muokata kuitujen rakennetta. Havupuukuitujen matalasakeusjauhatuksessa hellemmin käsittelevillä terillä eli korkean leikkauspituuden sisältävillä terillä kuidut rasittuvat suuremmissa määrin kuitujen keskinäisten hankauksien avulla, jolloin saavutetaan kuidun muokkaantumisen osalta parempi lopputulos. Toisaalta hyvin kuituja muokkaavat terät ovat käyttökelvottomat, jos teräkuviointi ei mahdollista riittävää virtauksen käsittelykykyä, mikä heikkenee leikkauspituuden lisääntyessä. Terämateriaalin kulutuskestävyys on riippuvainen terägeometrioista, sillä teräkuvioinnin dimensiot määrittelevät terien valmistukseen käytettävän valmistusmenetelmän, jolla on vaikutus käytettyyn terämateriaaliin. (J&L Fiber Services 1999b.)

Tähän mennessä käsitelty jauhatuksen perusteoria luo perustan kaksoiskartiojauhimen toiminnan tutkimiselle, sillä kaksoiskartiojauhimen kohdalla pätee samat jauhatuksen ohjaamiseen tarkoitetut jauhatusteoriat ja jauhatusalueella tapahtuva jauhatustapahtuma on yhtäläinen. Jauhintyypiltään kaksoiskartiojauhin on teoriassa käsiteltyjen perinteisten jauhintyyppien risteytys, minkä seurauksena myös kaksoiskartiojauhimen jauhinterien kohdalla pätee samat jauhinterien ja teräkuvioinnin lainalaisuudet.

5 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN TOIMINTAPERIAATE JA RAKENNE

Tässä osiossa käsitellään kyseiselle paperikoneelle investoidun kaksoiskartiojauhimen toimintaperiaatetta ja rakennetta. Kyseisiä japanilaisvalmisteisia jauhimia ei ole valmistajan edustajan mukaan toimitettu muualle Eurooppaan, joten käyttökokemuksia vastaavasta jauhimesta ei ole helposti saatavilla. Lisäksi jauhinkonstruktion erikoisuudesta ja harvinaisuudesta johtuen myös kirjallisuutta kyseisestä jauhintyypistä on niukasti saatavilla, jonka seurauksena kappale perustuu jauhimen mukana toimitettuun materiaaliin sekä tutkijan omiin havaintoihin. Jauhintyyppiä suunniteltaessa on pyritty yhdistämään kaksoislevyjauhimen ja tavallisen kartiojauhimen edut, jonka lopputuloksena on tavoiteltu mahdollisimman energiatehokkaasti toimivaa jauhinta.

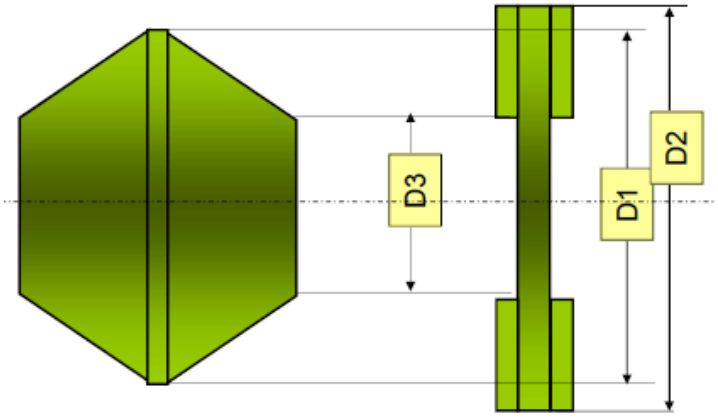
Kaksoiskartiojauhin on suunniteltu saavuttamaan hyvä jauhatustulos taloudellisemmin kuin vastaavan kokoiset kaksoislevy- tai kartiojauhimet. Jauhin omaa kaksi kartiomaisten teräparien väliin muodostuvaa jauhatusaluetta, joihin massa syötetään erillisien syöttöputkien avulla. Jauhatusalueiden läpi massa virtaa yhteiseen poistumisalueeseen, josta jauhettu massa johdetaan eteenpäin yhden poistoputken avulla. Kyseisen jauhintyypin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 25. (Aikawa Iron Works 2008, s. 6.)



Kuva 25. Kaksoiskartiojauhimen toimintaperiaate, jossa siniset nuolet osoittavat jauhettavan massan syöttöputkia ja punainen poistoputkea (muok. Nurminen 2016a).

Kuten kuvasta 25 nähdään, jauhimen jauhatusalueet ovat toisiinsa nähden rinnakkain ja niiden yhdistävänä tekijänä on kelluvaan akselipakettiin kiinnittyvä pyörivä roottori. Jauhatusalueiden terävälin säätö tapahtuu sähkömekaanisen ohjausjärjestelmän avulla, jolla liikutetaan jauhimen rungon sisällä olevaa liukuvaa rakennetta, jonka liikkeiden seurauksena myös kelluva akselipaketti keskittyy jauhatustilan keskelle. Kun esimerkiksi teräväliä pienennetään eli liukuvaan rakenteeseen kiinnitettyä staattoria liikutetaan kohti roottoria, roottori liikkuu liukuvan akselipaketin ansiosta kohti kiinteää staattoria ja terävälit tasoittuvat jauhatusalueiden kesken. Jauhinta pyörittävän sähkömoottorin kiinteän akselin voiman välittäminen liukuvalle akselipaketille on mahdollistettu liukukytkimen avulla, jossa on voidellut liukupinnat jauhimen akselin aseman muutoksia varten. Huoltotöitä varten akselipakettia voidaan liikuttaa myös mekaanisen liikutusmekanismin avulla, mikä on tuotantotilanteessa kytketty pois käytöstä.

Jauhinta on saatavissa useassa eri kokoluokassa ja erilaisilla terägeometrioilla varustetuilla terillä (Aikawa Iron Works 2008, s. 9). Jauhimen energiatehokkuus perustuu kaksoislevyjauhimen tavoin kahteen jauhatusalueeseen sekä lisäksi kartiomaisten terien mahdollistamaan suurempaan jauhatuspinta-alaan vastaavan terähalkaisijan omaavaan levyjauhimeen verrattaessa. Edellä mainittujen seikkojen seurauksena jauhimen häviöteho on samalla pyörimisnopeudella vastaavan jauhatuspinta-alan omaavaa kaksoislevyjauhinta matalampi. Kuvassa 26 on havainnollistettu saman jauhatuspinta-alan omaavien kaksoislevyjauhimen ja kaksoiskartiojauhimen roottorin halkaisijaerot.



Kuva 26. Saman jauhatuspinta-alan omaavat kaksoislevy- ja kaksoiskartiojauhimen roottorit, jossa D2 on 515 mm ja D1 on 462 mm. Roottorin sijainti on esitetty kuvassa 25. (Nurminen 2016a.)

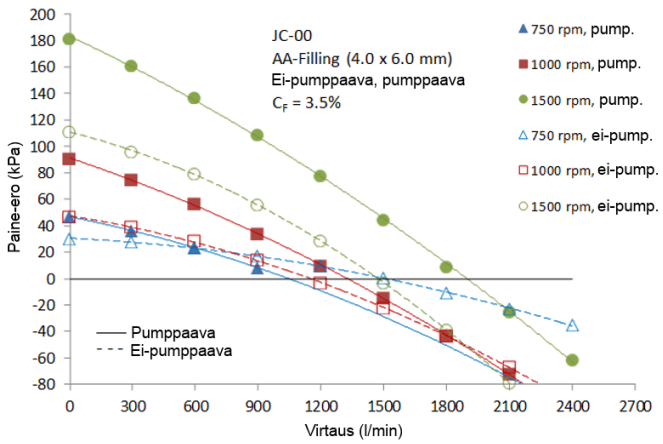
Toimintaperiaatteeltaan kaksoiskartiojauhin on samankaltainen kuin kaksoislevyjauhin, jossa massa syötetään rinnakkain oleviin jauhatusalueisiin jauhinlevyjen pienemmästä päästä. Merkittävimmin toimintaperiaate eroaa yksilevyjauhimista jauhatusalueiden terävälin säädön osalta. Tavallisissa yhden jauhatusalueen jauhimissa teräväliä säädetään yksinkertaisesti ja tarkasti roottorin tai staattorin asemaa muuttamalla, jolloin kahden terän välinen rako säätyy ja jauhimen luonne muuttuu. Kahden jauhatusalueen jauhimissa toisen jauhatusalueen teräväliä säädetään suoraan liikkuvan staattorin asemaa muuttamalla, minkä liikkeen seurauksena jauhatusalueen teräväli muuttuu. Terävälin muutoksen seurauksena myös vapaana liukuvan roottorin asema muuttuu, mikä vaikuttaa molempien jauhatusalueiden teräväleihin. Kaksoislevyjauhimessa roottori asemoituu jauhatustilan keskelle massan virtauksesta syntyvien voimien seurauksena, joihin vaikuttaa pääosin jauhimeen syntyvä pumppausefekti. (Aikawa Fiber Technologies 2001, s. 51–52.) Kaksoiskartiojauhimen toimintaperiaatteen ollessa hyvin samankaltainen kuin kaksoislevyjauhimilla, voidaan kaksoiskartiojauhimen roottorin asemoitumisen päätellä tapahtuvan kuten kaksoislevyjauhimessa.

Jauhatusalueidensa osalta kaksoiskartiojauhin on kuten tavallinen kartiojauhin, jossa massa syötetään jauhimeen kartion kapeammasta päästä ja se etenee jauhatusalueen läpi kartion leveämpään päähän, jonka jälkeen poistuu jauhatusalueelta. Jauhatustapahtuman voidaan tästä syystä päätellä tapahtuvan kuten tavallisissa jauhimissa ja näin ollen kirjallisuudesta löytyvää jauhatuksen perusteoriaa voidaan soveltaa myös kaksoiskartiojauhimen kohdalla.

5.1 Pumppaustila

Jauhimet jauhavat nesteeseen sekoitettuja kuituja suurella nopeudella pyörivien terien avulla. Tämän seurauksena jauhimiin kohdistuu huomattavasti nesteen aiheuttavia kitka- ja keskipakovoimia, joten niiden toimintaa voidaan verrata keskipakopumppuun. (Aikawa Fiber Technologies 2001, s. 45.) Jauhimet saavat aikaan pumppausvaikutuksen, mikä on pääosin riippuvainen jauhettavan massan määrästä ja jauhimen teristä. Pumppausvaikutusta voidaan arvioida keskipakopumpun teoriaa soveltamalla. On kuitenkin huomattava, että pumppausvaikutuksesta johtuen pumpattava massa voi joissain tapauksissa hävitä jauhatuspinnoilta, mikä aiheuttaa terien rikkoutumisen. Tämän seurauksena jauhimen poistopuolelle on järjestettävä vastapaine, toisin kuin keskipakopumppua käytettäessä. (Horo et al. 1983 s. 50–52.)

Jauhimen muodostama pumppausvaikutus perustuu roottorin toimiseen ikään kuin pumpun juoksupyöränä. Roottorin pyörimisliikkeen seurauksena jauhimen sisälle syntyy keskipakovoima, jonka ansiosta massan paine nousee sen siirtyessä roottorin kapeammasta päästä roottorin kehälle. Paineen muutos tietyllä roottorin halkaisijalla määrittyy roottorin pyörimisnopeuden ja jauhatusalueelle syötettävän massan virtaustason mukaan. Pumppausvaikutusta ei kuitenkaan voida pitää täysin samanlaisena kuin keskipakopumpussa, sillä jauhimen kiinteän staattorin uriin syntyy vastavirtausta, kuten aiemmin jauhintyyppien teoriassa esitettiin. Lisäksi jauhimen teräkuviointi poikkeaa pumppausominaisuuksiltaan tyypillisestä keskipakopumpun juoksupyörästä, jonka päätehtävänä on pumppausefektin muodostaminen. Pyörimisnopeuden ja massan virtaustason lisäksi teräkuvioinnin teräharjanteiden leikkauskulmalla voidaan vaikuttaa jauhimen pumppausominaisuuksiin ja muokata jauhimen toimintaa pumppaavasta ei-pumppaavaksi. (Aikawa Fiber Technologies 2001, s. 53–54.) Kuvassa 27 on esitetty kartiojauhimella suoritettujen pumppauskokeiden tulokset, jossa jauhinta on koeajettu kolmella eri kierrosnopeudella pumppaavassa ja ei-pumppaavassa toiminnassa laajan virtausalueen läpi. Jauhettava massa on ollut 3,5 % sakeudessa ja jauhin on ollut varustettuna kaikissa koeajoissa samoilla terägeometrioilla.

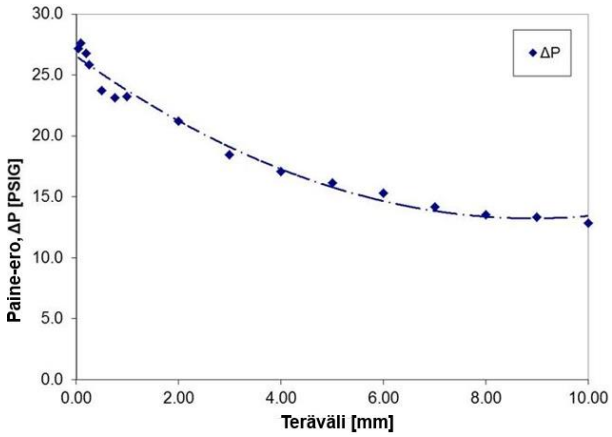


Kuva 27. JC-00 kartiojauhimella suoritetun pumppauskokeen tulokset, jossa jauhimen pumppausvaikutuksesta syntyvä paine-ero on esitetty virtauksen suhteen eri kierrosnopeuksilla ja jauhimen pumppaustiloilla. Virtauksen ollessa alle 1200 l/min paine-eron nähdään olevan positiivinen muista tekijöistä riippumatta. (muok. Nurminen 2016b.)

Kuten kuvasta 27 voidaan havaita, jauhimen pyörimisnopeus ja massan virtaustaso vaikuttavat jauhimen syöttöputken ja poistoputken välille syntyvään paine-eroon.

Virtaustason kasvaessa paine-ero muuttuu kaikilla kierrosnopeuksilla negatiiviseksi eli pumppausvaikutus katoaa kokonaan ja vastaavasti virtaustason lähestyessä nollavirtausta paine-ero kasvaa. Lisäksi voidaan todeta, että mitä korkeampi jauhimen kierrosnopeus on, sitä suurempi paine-ero saavutetaan. Jauhimen toimintatavan (pumppaava tai ei-pumppaava) vaikutuksen nähdään korostuvan kierrosnopeuden kasvaessa, mutta on kuitenkin huomioitava, että kuvasta nähtävistä pumppauskokeiden tuloksista ei ilmene terien kartiokulmaa eikä leikkauskulmaa, joten terägeometrioiden vaikutusta pumppausvaikutukseen ei voida tarkasti arvioida.

Nurmisen (2016b) mukaan jauhimen pumppausvaikutus on riippuvainen edellä mainittujen seikkojen lisäksi myös terävälistä. Kuvassa 28 on esitetty kuvaaja jauhatuskokeen tuloksista, jossa kartiojauhimen pumppausvaikutuksen tuottamaa paine-eroa on mitattu jauhimen kuormitusta lisättäessä (terävälin kaventuessa). Tuloksista on havaittavissa paine-eron kasvu terävälin kaventuessa eli pumppausvaikutuksen lisääntyminen kuormituksen kasvaessa.



Kuva 28. Terävälin muutoksen vaikutus kartiojauhimen pumppausvaikutukseen (muok. Nurminen 2016b).

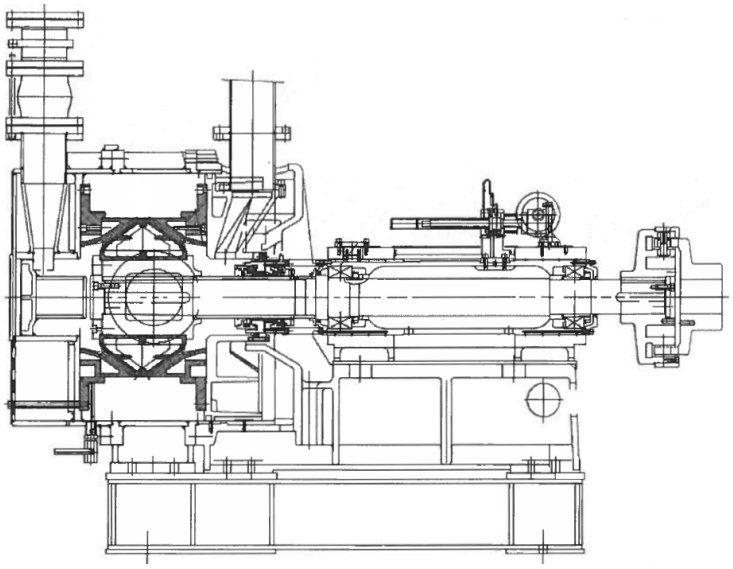
Kuten keskipakopumpun siipipyörän geometrioilla myös roottorin terägeometrioilla on vaikutus pumppausefektiin. Tärkeimpiä tekijöitä terägeometrioiden pumppausominaisuuksia arvioitaessa on teräurien syvyys sekä roottorin ja staattorin teräharjanteiden välinen leikkauskulma. Teräurat toimivat kuten siipipyörän siivet, joten niiden syvyys määrittää pitkälti pumppausvaikutuksen tehokkuuden. Siipipyörien siipien korkeuden madaltaminen puolella puolittaa myös pumppausvaikutuksen. Näin tapahtuu myös roottorin teräurien syvyyden puolittuessa. Jauhimen pumppausvaikutusta arvioitaessa

on kuitenkin muistettava myös staattorin teräurissa tapahtuva vastavirtaus, mikä toimii roottorin teräurissa syntyvää pumppausvaikutusta vastaan. (Aikawa Fiber Technology 2001, s. 55; J&L Fiber Services 1999a.)

Teräharjanteiden leikkauskulman etenemissuunnan avulla voidaan tarvittaessa muuttaa jauhimen toimintatapa pumppaavasta ei-pumppaavaksi. Mikäli vastakkain olevien terien leikkauskulma etenee roottorin pyöriessä kohti jauhimen pienempää halkaisijaa, urat vastustavat massan liikettä ja jauhin toimii vähemmän pumppaavana. Vastaavasti jos terien leikkauskulma etenee roottorin pyöriessä pienemmästä halkaisijasta kohti teräparin suurempaa kehää, teräurat voimistavat pumppausvaikutusta. Leikkauskulman etenemissuunnan vaikutus voidaan vaihtaa kääntämällä terägeometriat (teräurien suunta) päinvastaiseksi tai yksinkertaisemmin vaihtamalla roottorin pyörimissuuntaa. Leikkauskulman eri etenemissuunnat on havainnollistettu liitteessä 2. (Aikawa Fiber Technology 2001, s. 54; J&L Fiber Services 1999a.) Pumppausvaikutuksen säätäminen itse leikkauskulmaa muuttamalla ei kuitenkaan ole edullinen keino, sillä leikkauskulman muutos vaikuttaa jauhetun massan laatuun. Kuidun kannalta edullisin vaihtoehto pumppausvaikutuksen muokkaamiseen on virtauksen säätäminen oikeaksi kulloinkin käytössä olevalle terätyypille. Seuraavaksi edullisin tekijä on pumppausvaikutuksen säätäminen teräurien syvyyksiä muuttamalla. (Aikawa Fiber Technology 2001, s. 59.)

Jauhimien pumppausvaikutuksesta syntyvä paine-ero on hyvä mittari jauhimen terävälien ja terien kulumisen arviointiin. Lisäksi paine-eron muutoksella voidaan arvioida jauhimen pumppauskapasiteettia ja kykyä saavuttaa optimaaliset massan laatuominaisuudet. Paine-eroa seuraamalla saadaan kriittisistä tietoa jauhatusolosuhteista, sillä mitä korkeampi paine-ero on, sitä lähempänä terät ovat toisiaan ja sitä kovempi on kuituihin kohdistuva rasitus. Toisaalta korkealla paine-erolla operoidessa riski terien ajoittaisiin fyysisiin teräkosketuksiin kasvaa, mikä johtaa terävaurioihin ja kuitujen rikkoutumiseen. Lisäksi korkeammalla paine-erolla jauhinterien uriin syntyvät pyörrevirrat heikkenevät ja virtaus jauhimen läpi kasvaa. (J&L Fiber Services 1999a.) Edellä mainituista seikoista johtuen voidaan ajatella jauhatuksen laadun heikentyvän, mikäli operoidaan liian korkealla paine-erolla, sillä kuituja terien väliin ohjaavien pyörrevirtojen vaikutus heikkenee ja kuitujen mahdollinen rikkoutuminen lisääntyy rasituksen kasvaessa liian suureksi. Kohdepaperikoneella kaksoiskartiojauhimen toimintapa on pumppaava.

Kaksoiskartiojauhimen rakenne koostuu erilaisista osista, joista pääosia ovat runko, kansi, akselipaketti, akselitiiviste, laakerointi, liukukytkin, jauhinterät, putkiyhteet, ohjausjärjestelmä ja liukuva staattori. Valuraudasta valmistettu runko kiinnittyy jauhinpetiin ja muodostaa jauhatustilan sekä sitoo yhteen kaikki jauhimen muut osat. Jauhatustilan päähän on sijoitettu avattava ruostumattomasta teräksestä valmistettu jauhimen kansi, joka muodostaa kiinteän staattorin rungon ja mahdollistaa jauhimen sisäiset kunnossapitotyöt sekä terien vaihdot. Syöttöyhteistä toinen kiinnittyy suoraan jauhimen kanteen ja toinen jauhimen rungon läpi jauhatustilassa sijaitsevaan liukuvan staattorin runkoon. Poistoputki kiinnittyy jauhatustilan keskelle runkoon. (Aikawa Iron Works 2008, s. 7, 40–43.) Kuvassa 29 on esitetty kaksoiskartiojauhimen poikkileikkaus ja liitteessä 3 jauhimen sivuprofiilit.

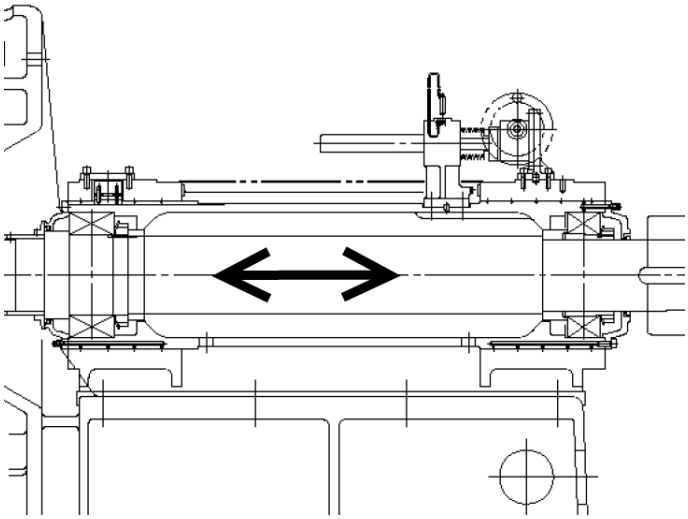


Kuva 29. Kaksoiskartiojauhimen poikkileikkaus (muok. Aikawa Iron Works 2008, s. 43).

5.2 Akselipaketti ja laakerointi

Akselipaketin tehtävä on välittää jauhinta pyörittävän sähkömoottorin voima jauhimen terien kautta jauhettaviin kuituihin. Akselipaketti koostuu itse akselista ja sen päähän kiinnittyvästä roottorin rungosta sekä liukukytkimestä. Akselipaketti pyörii kahden pallomaisten rullalaakerin avulla, joiden sisemmät laakerikoolit kiinnittyvät akseliin ja ulommat laakeripesiin, jotka on koneistettu erilliseen laakerilohkoon. Laakerilohko on oma itsenäinen osansa, jonka tehtävä on mahdollistaa akselipaketin aksiaalisuuntainen liukuminen. Laakerilohkon ulkokehälle on koneistettu rasvavoidellut liukupinnat, joiden avulla laakerilohko sovittuu varsinaisen jauhimen rungon sisään. Laakerilohko liikkuu

rungon suhteen akselipakettiin kohdistuvien aksiaalisuuntaisten voimien tai huoltoasennossa käytettävän mekaanisen liikutusmekanismin avulla. (Aikawa Iron Works 2008, s. 7.) Kuvassa 30 on havainnollistettu akselin ja laakerilohkon liukuminen rungon suhteen sekä laakeroinnin rakenne.



Kuva 30. Laakeroinnin rakenne, jossa nuolella kuvataan akselin liikettä (muok. Aikawa Iron Works 2008, s. 36).

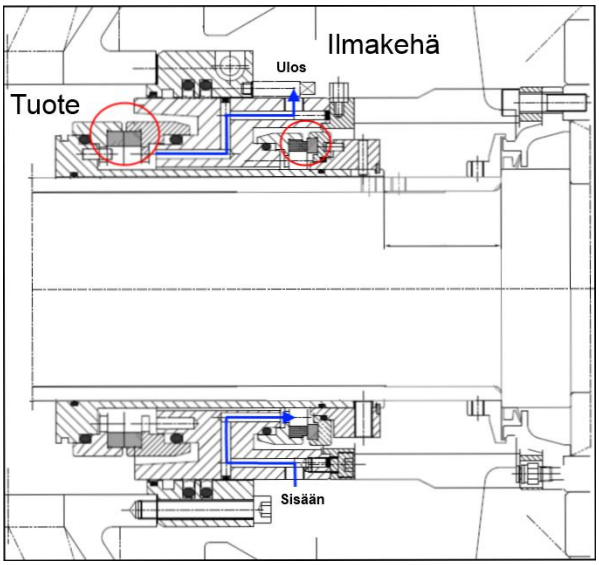
Sähkömoottorin voima välitetään akselille liukukytkimen avulla, mikä rakentuu kahdesta kytkinpuolikkaasta. Toinen kytkinpuolikkaista kiinnittyy sähkömoottorin akseliin ja toinen jauhimen akselin päähän. Kytkinpuolikkaat yhdistetään rasvavoidelluilla rullilla, jotka välittävät pyöritysvoiman, mutta sallivat jauhimen akselin aksiaalisuuntaisen liikkeen kiinteän sähkömoottorin akselin suhteen (kuva 29). (Aikawa Iron Works 2008, s. 7.)

5.3 Mekaaninen tiiviste

Mekaaninen tiiviste on yksi kaksoiskartiojauhimen toiminnan kannalta tärkeimmistä osista, sillä kyseisen tiivisteen avulla jauhettava massa pidetään erillään ilmakehästä ja samalla mahdollistetaan akselipaketin pyörimisliike sekä aksiaalisuuntainen liike. Tiivisteen päätehtävä on jauhimen jauhatustilan ja akselin välisen raon tiivistäminen. Lisäksi tiivisteeltä vaaditaan suurta toimintavarmuutta, sillä tiivisteen rikkoutumisesta seuraa korjaavia kunnossapitotöitä, mitkä aiheuttavat kaksoiskartiojauhimen toiminnan pysäytyksen. Kaksoiskartiojauhinta on saatavilla myös perinteisellä punostiivisteellä, mikä vaatii mekaanisesta tiivisteestä poiketen jatkuvaa ennakoivaa kunnossapitoa sekä

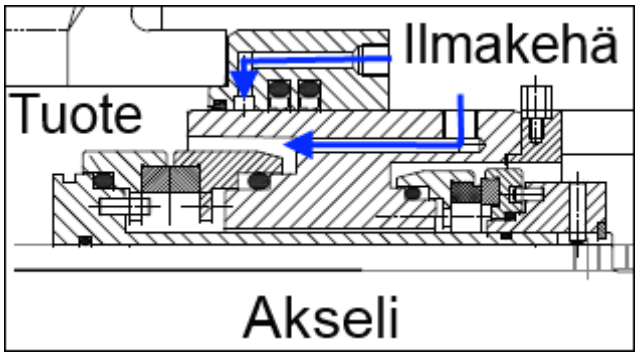
määrällisesti enemmän juoksevaa vettä. Edellä mainituista seikoista ja mekaanisen tiivisteen tarjoamasta paremmasta kulutuskestävyydestä johtuen kohdepaperikoneen kaksoiskartiojauhin on varustettu punostiivisteen sijaan mekaanisella tiivisteellä.

Mekaanisen tiivisteen toimintaperiaate perustuu kahden liukurengasparin ja aputiivisteiden toimintaan sekä tiivisteen toimintavarmaan rakenteeseen. Tiivisteen rakenne koostuu akselin ympärille kiinnittyvästä akseliholkista, liikkuvaan staattoriin ja laakerointiin kiinnittyvistä runko-osista sekä rakenteen sisälle jäävistä liukupinta-osista, joihin pyörimisliikkeen mahdollistavat liukurengasparit kiinnittyvät. Rakennemateriaalina tiivisteen osissa on käytetty hyvän korroosionkeston omaavaa duplex-terästä ja liukurengasparien materiaalina tuotteen eli jauhettavan massan puolella piikarbidia [SiC] ja ilmakehän puolella pehmeämpää hartsi-kyllästettyä hiiltä sekä piikarbidia [SiC]. Liukurenkaat sisältävät liukupintaosat sijoittuvat akseliin kiinnittyvän akseliholkin ja laakerointiin kiinnittyvän runko-osan väliin, jolloin toinen tiivisteparin liukurenkaasta pyörii akselin mukana ja toinen pysyy laakerointiin kiinnittyvän runko-osan mukana paikallaan. Lisäksi liukurenkaiden pintoja painetaan toisiaan vasten jousikuorman ja hydraulisen kuormituksen avulla. Liukurenkaiden pintojen väliin johdetaan samanaikaisesti paineistettu tiivistevesi, jonka tehtävänä on vähentää liukurenkaiden välille muodostuvaa kitkaa eli voidella tiivistepintoja sekä pitää jauhettava massa jauhimen sisällä tiivisteveden ylipaineen avulla. (Kinnunen 2017.) Poikkileikkaus mekaanisen tiivisteen rakenteesta on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Mekaanisen tiivisteen periaatekuva, jossa liukurengasparit on merkattu punaisilla ympyröillä ja tiivisteveden virtauskanavat sinisillä nuolilla (muok. Kinnunen 2016).

Laakeripaketin aksiaalisuuntainen liike on mahdollistettu jauhimen liikkuvaan osaan kiinnittyvän runko-osan ja laakeripakettiin kiinnittyvän runko-osan välisellä koneistetulla liukupinnalla, mikä sisältää aputiivisteitä. Liukupintaa voidellaan jatkuvalla huuhteluvedellä, mitä johdetaan myös tiivisteen sisäpuolelle tuotteeseen. Tuotteeseen johdettavan huuhteluveden tarkoituksena on estää jauhettavien kuitujen ajautuminen liukupinnalle ja näin parantaa tiivisteen toimintavarmuutta. Huuhteluvedet johdetaan tiivisteeseen vakiovirtausventtiilien läpi, joten veden kulutusta voidaan säätää tai tarvittaessa sulkea kokonaan. (Kinnunen 2017.) Aksiaalisuuntaisen liikkeen mahdollistava liukupinta on esitetty kuvassa 32



Kuva 32. Suurennos mekaanisen tiivisteen rakenteesta, jossa aputiivisteille ja tuotteeseen johdettava huuhteluvesi on merkattu sinisillä nuolilla (muok. Kinnunen 2016).

Mekaanisen tiivisteen toimintavarmuus on varmistettu rakenteen riittävillä radiaalisilla liikevaroilla sekä rakenteen tarkoilla mittatoleransseilla ja korkean kulutuskestävyyden omaavilla liukurengas -materiaaleilla. Lisäksi toimintavarmuutta parannetaan tiivisteen virtausvapaalla rakenteella, jossa tiivisteveden liike mahdollistetaan runko-osan akselinsuuntaisten porausten avulla, jolloin liukupintojen välissä muodostuvan kitkalämmön lämmittämä tiivistevesi pääsee kiertämään tiivisteen sisällä. Virtausvapaa tiiviste kytketään suljettuun paineakun sisältävään paineistettuun tiivistevesijärjestelmään, jossa uutta tiivistevettä ei juoksuteta tiivisteen läpi, kuten tavallisessa mekaanisessa tiivisteessä, vaan samaa vettä kierrätetään suljetun järjestelmän sisällä. Tämän seurauksena tiivisteen toimintavarmuus paranee, sillä tiivisteveden paine pysyy stabiilina, eikä paperikoneen tiivistevesiverkon mahdolliset paine- ja virtausheitot pääse rikkomaan tiivisteen liukurengaspintoja. (Kinnunen 2017; Demmel & Törnqvist 2000.)

5.4 Jauhinterät

Jauhin on varustettu laserteknologian avulla valmistetuilla matalan jauhatusintensiteetin omaavilla terillä eli terillä joiden terägeometriat mahdollistavat suuren leikkauspituuden. Teräpinta muodostuu 24 teräsegmentistä, joista kukin omaa samanlaisen teräkuvioinnin, joten jokaisen teräpinnan ominaisuudet ovat samanlaiset. Terägeometrian tärkeimmät dimensiot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kaksoiskartiojauhimen terien terägeometriat.

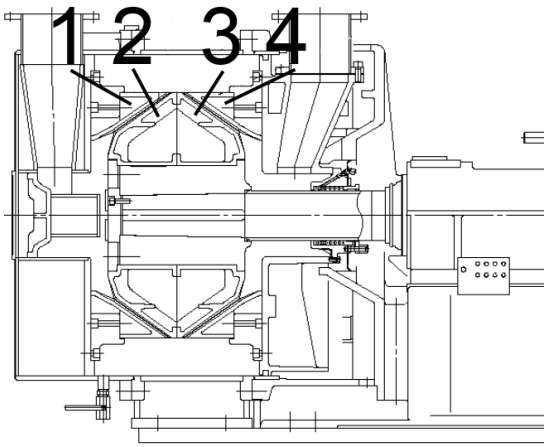
Teräharjanteen leveys [mm]	**Teräuran leveys [mm]**	**Teräuran syvyys [mm]**	**Teräkulma [°]**	**Leikkaussärmäpituus [Km/r]**
2,0	3,6	5,0	18	6,1

Terägeometrian dimensiot poikkeavat kirjallisuudesta löytyvistä tyypillisistä havupuumassan jauhatuksessa käytetyistä terädimensioista. Teräkuviointi on lähempänä tyypillistä levyjauhimen terien kuviointia kuin kartiojauhimen terien kuviointia. Teräharjanteen leveys on tyypillisten terien teräharjanteen leveyttä kapeampi (tyypillisesti 3,0–5,5 mm) ja teräuran syvyys matalampi (tyypillisesti 7,0–10,0 mm). Teräuran leveyden osalta kyseiset terät ovat tyypillisen levyjauhimen terän uraleveyden alueella, kuitenkin alueen alapäässä (tyypillisesti 3,5–5,0 mm) ja kaukana tyypillisestä kartiojauhimen terän leveydestä (tyypillisesti 4,5–7,0 mm). Teräharjanteen kapeuden seurauksena terät kuormittavat kuituja lyhemmältä matkalta kuin tyypilliset leveämmän teräharjanteen omaavat terät, mutta toisaalta kuituja rasittavien pintojen määrä on suurempi kapeiden teräharjanteiden mahdollistavan korkean leikkaussärmäpituuden seurauksena. Teräurien syvyyden ollessa tyypillisiä teriä matalampi, voidaan katsoa terien pumppausominaisuuksien olevan heikommat kuin saman teräkulman omaavilla tyypillisillä terillä.

Jauhinterät muodostavat kaksi erillistä teräparia, joissa vastakkaisten terien teräkuvioinnit ovat päinvastaiset eli teräkulmat ovat vastakkaiset, joten teräparin terien yhteiseksi leikkauskulmaksi muodostuu 36 astetta. Kahden teräparin ansiosta jauhinterien kokonaisleikkaussärmäpituudeksi muodostuu 12,2 kilometriä kierroksella, mikä on kaksinkertainen vastaavan kokoiseen tavalliseen kartiojauhimeen verrattaessa.

Kartiomaisten roottorin terien ulkohalkaisija on 560 mm ja sisähalkaisija on 370 mm sekä kartiokulma 40 astetta. Näistä parametreista saadaan aiemmin mainitun jauhatuspinta-alan laskukaavan mukaan teräparin jauhatuspinta-alaksi 0,181 m² ja jauhatuksen kokonaispinta-alaksi 0,362 m². Vastaavilla terähalkaisijoilla olevan kaksoislevyjauhimen teräparin jauhatuksen jauhatuspinta-alaksi saadaan 0,145m² ja jauhatuksen kokonaispinta-alaksi 0,289m². Kartiomaisten terien 40 asteen kartiokulman ansiosta saavutetaan siis noin 20 % suurempi jauhatuspinta-ala levyjauhimen teriin verrattaessa. Tämä tarkoittaa, että kaksoislevyjauhinta käytettäessä saman jauhatuspinta-alan saavuttamiseksi terien ulkohalkaisijan tulisi olla noin 7 % suurempi kuin kaksoiskartiojauhinta käytettäessä. Jauhimen häviötehon laskentakaavan (2) mukaan 7 % pienemmällä ulkohalkaisijalla saavutetaan noin 26 % pienempi häviöteho, mikäli muut muuttujat pidetään samana (pyörimisnopeus ja jauhinkohtainen vakio). Tämän seurauksena kaksoiskartiojauhinta voidaan pitää kaksoislevyjauhinta energiatehokkaampana jauhimena.

Terien teräsegmentit ovat kiinnitetty hitsaamalla terien runkoelementteihin, mitkä kiinnittyvät jauhimen roottoriin ja staattoreihin. Ensimmäisen staattorin runko on rakennettu avattavaan kanteen, johon terärunko kiinnittyy pulttiliitoksen avulla. Jauhimen akselin päähän kiinnittyvään roottorin runkoon kiinnittyy kartiosovitteella ja päätylaipalla toinen ja kolmas terärunko, muodostaen kahden kartion omaavan roottorin. Neljäs terärunko kiinnittyy pulttiliitoksella liikkuvan staattorin runkoon. Terien sijoittuminen jauhatustilaan on havainnollistettu kuvassa 33.



Kuva 33. Jauhintilaan sijoittuvat jauhinterät, jossa 1 on kiinteän staattorin terä, 2 on roottorin etuterä, 3 on roottorin takaterä ja 4 on liikkuvan staattorin terä (muok. Aikawa Iron Works 2008, s. 29).

Jauhinterien terägeometrioilla vaikutetaan pääosin jauhetun massan laatuarvoihin ja jauhatuksen luonteeseen. Kaksoiskartiojauhimen toiminnan kannalta oleellinen tekijä on terägeometrioiden vaikutus jauhimen pumppaukseen ja sitä seuraavat vaikutukset jauhatusalueiden osavirtauksiin. Kohdepaperikoneen kaksoiskartiojauhimessa molempien jauhatusalueiden teräparit ovat kuitenkin keskenään identtiset, joten terägeometrioihin ei tehdä tutkimusongelman ratkaisemiseksi muutoksia. Lisäksi jauhettavan massan laadun kannalta optimaalisten terägeometrioiden löytäminen vaatisi useita investointeja erityyppisiin terämalleihin ja lukuisia koeajoja teräsarjojen välillä.

5.5 Ohjausjärjestelmä ja liikkuva staattori

Jauhin on varustettu sähkömekaanisilla jauhatuksen ohjausyksiköillä, jotka kiinnittyvät jauhimen runkoon akselin molemmin puolin. Ohjausyksiköt koostuvat mekaanisesta ruuvista, jota pyöritetään servomoottorilla. Mekaaninen ruuvi vastaa vapaasta päästään liikkuvan staattorin runkoon, joten ruuvia pyörittämällä liikkuvan rungon asema muuttuu ja staattori liukuu jauhatustilassa jauhimen pää-akselin suuntaisesti. Kahden ohjausyksikön ansiosta staattorin liikkeet ovat tarkkoja, mikä mahdollistaa jauhatuksen tarkan ohjaamisen kohti tavoiteltua kuormitusta. (Aikawa Iron Works 2008, s. 7−8.)

Ohjausyksiköiden ansiosta liikkuvan staattorin asemaa voidaan liikuttaa tarkasti kohti vastakkaista roottorin teräpintaa, jolloin roottori tasapainottuu samanaikaisesti jauhimen läpivirtaavan massan paineiden avulla keskelle jauhatustilaa, muodostaen identtiset terävälit roottorin ja staattoreiden terien välille. Ohjausyksiköitä voidaan ohjata suoraan jauhimen oman ohjauspaneelin liikutusnapeista tai automaattisen etäohjauksen avulla. Servomoottorit on varustettu momenttirajoilla, jotka saavutettuaan ohjausyksiköt liikuttavat staattoria automaattisesti vastakkaiseen suuntaan eli lisäävät teräväliä. Tällä toiminnolla on pyritty estämään terävälin ajautuminen kiinni ja siitä johtuva teräpintojen vaurioituminen. (Aikawa Iron Works 2008, s. 8.)

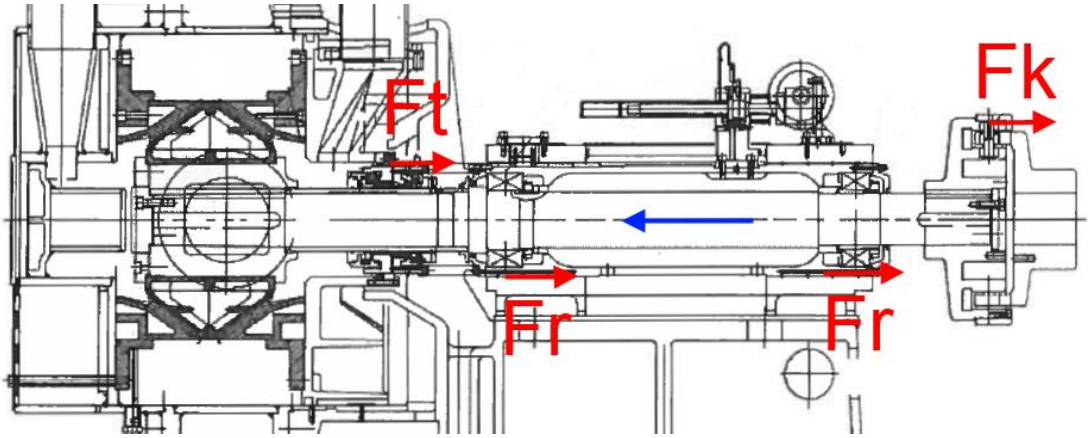
Kohdepaperikoneella jauhinta ohjataan automaattisen etäohjauksen avulla prosessinohjausjärjestelmästä. Jauhinta säädetään asettamalla jauhimelle tietty kuormitustaso, jota jauhin tavoittelee automaattisesti paperikoneelle menevän massan virtauksen ja sakeuden mukaan ohjausyksiköitä säätämällä. Operaattori voi muuttaa asetusarvoa kulloiseenkin ajotilanteeseen sopivaksi prosessinohjausjärjestelmän

jauhatuksen ohjausnäytöstä, mikä kertoo operaattorille kuormitustason lisäksi lukuisia muita parametrejä jauhimen ympäriltä (Esimerkiksi syöttöpaineen, virtauksen, osavirtaukset, terävälin ja jauhimen tehon). Jauhimen oma ohjauspaneeli on käytössä vain tuotannon pysähdyksissä tehtävien huoltotöiden aikana.

5.6 Toimintaperiaatteen ja rakenteen asettamat vaatimukset

Kahden jauhatusalueen omaavien levyjauhimien kohdalla jauhimen läpi virtaavan massan jakautuminen tasaisesti molemmille jauhatusalueille on ensiarvoisen tärkeää, jotta molempien jauhatusalueiden jauhatusvaikutukset kuituihin ovat samanlaiset. Mikäli virtaus jakaantuu epätasaisesti jauhatusalueiden kesken, myös jauhatuksen luonteessa eli intensiteetissä ja jauhatuksen määrässä on eroja jauhatusalueiden kesken. Tällöin jauhimen läpi virtaavia kuituja rasitetaan erilailla jauhatusalueiden kesken ja jauhetun massan laatu heikkenee. (Aikawa Fiber Technologies 2001, s. 52.)

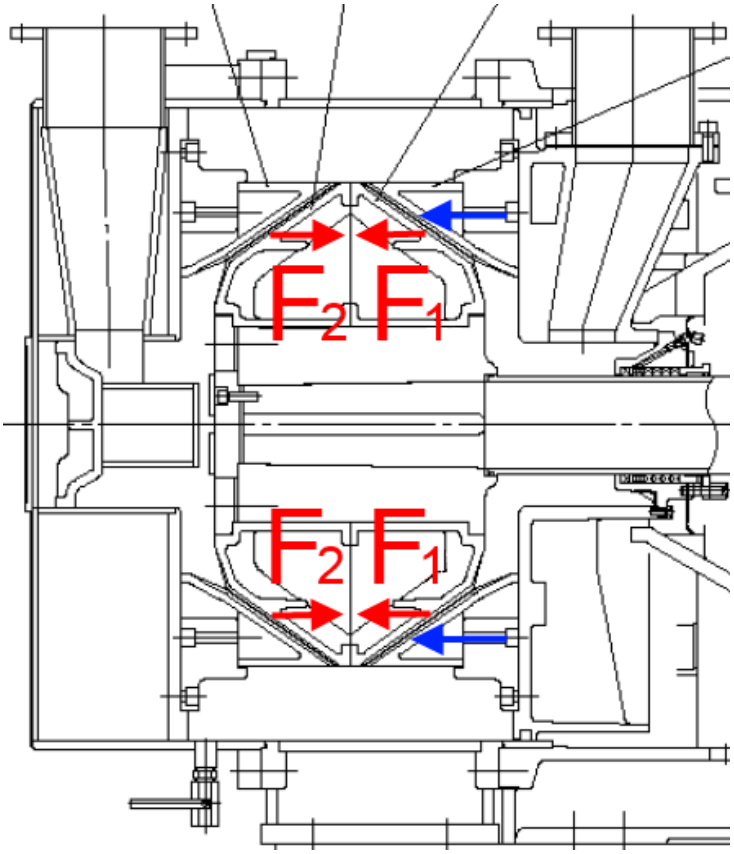
Tasaisen jauhatuksen laadun saavuttamiseksi molempien jauhatusalueiden teräväleissä kuituja kuormittavien voimien on oltava yhtä suuret, mutta erisuuntaiset. Lähtökohtana kuormittavien voimien tasaisuudelle jauhatusalueiden kesken on täysin vapaasti liukuvan roottorin toiminta, jonka vapaata liukumista vastustaa jauhinkonstruktiosta johtuvat voimat. Roottorin liukumista vastustavien voimien lisäksi terävälien symmetriseen toimintaan vaikuttavat roottorin teräpintoihin kohdistuvat voimat, jotka ovat riippuvaisia jauhatusalueen läpi virtaavan massan määrästä ja teräparin sisä- ja ulkohalkaisijan välillä tapahtuvasta paineen noususta. Useimmissa tapauksissa juuri jauhatusalueiden pumppausvaikutus määrittelee virtauksen jakaantumisen ja sitä kautta kelluvan roottorin tasapainottavat voimat. (Aikawa Fiber Technologies 2001, s. 52.) Jauhinkonstruktiosta johtuvat roottorin vapaata liikettä vastustavat voimat ovat esitetty havainnollistaen kuvassa 34, jossa sininen nuoli kuvaa roottorin liikesuuntaa kyseisellä hetkellä ja punaset nuolet liikettä vastustavia voimia.



Kuva 34. Roottorin liikettä vastustavat voimat havainnollistettuna jauhimen poikkileikkaukseen (muok. Aikawa Iron Works 2008, s. 36).

Roottorin liikettä vastustavat voimat ovat konstruktiosta johtuvia kitkavoimia, jotka vaikuttavat roottorin liikesuuntaa vastaan. Näistä voimista Ft on mekaanisen tiivisteen aiheuttama voima, mikä muodostuu tiivisteen rakenteessa olevan aputiivisterenkaan ja jauhimen rungon koneistetun pinnan välille. Fr on laakerilohkon aiheuttama voima, mikä muodostuu laakerilohkon ja jauhimen rungon liukupintojen väliin. Fk on liukukytkimen aiheuttama voima, mikä muodostuu paikallaan pysyvän kytkinpuolikkaan liukupintojen ja liikkuvan kytkinpuolikkaan liukurullien välille. Liikettä vastustavia kitkavoimia minimoidaan laakerilohkon ja kytkimen osalta rasvavoitelulla sekä mekaanisen tiivisteen osalta erillisellä huuhteluvedellä.

Roottorin liikettä vastustavat kitkavoimat ovat kuitenkin rakenteesta johtuen yhtä suuria roottorin molempia liikesuuntia vastaan, joten roottorin tasapainottumisen kannalta ratkaisevampaa on jauhatusalueille muodostuvien tasapainottavien voimien yhtä suuri vaikutus. Roottoria tasapainottavat, jauhettavan massan liikkeestä johtuvat voimat ovat havainnollistettu kuvassa 35, jossa punaiset nuolet havainnollistavat roottoria tasapainottavia voimia ja siniset nuolet terävälejä säätävien ohjausyksiköiden muodostamaa voimaa.



Kuva 35. Jauhatustilassa roottorin tasapainottumiseen vaikuttavat voimat (muok. Aikawa Iron Works 2008, s. 29).

F_2 muodostuu jauhimen kiinteän staattorin ja roottorin etuterän väliseen teräväliin kun F_1 muodostuu jauhimen liikkuvan staattorin ja roottorin takaterän väliseen teräväliin. Molemmat voimat syntyvät teräväliin virtaavan massan paineen vaikutuksesta ja kasvavat pumppausefektin seurauksena. Jauhimen kuormitusta muutettaessa eli liikkuvan staattorin asemaa liikuttaessa liikkuvan staattorin ja roottorin takaterän välinen teräväli muuttuu, jonka seurauksena terävälissä tapahtuva pumppausefekti muuttuu, mikä vaikuttaa voimaan F_1. F_1:n ja F_2:n välille syntyvän paine-eron seurauksena roottorin asema muuttuu kunnes terävälien väliset voimat ovat jälleen tasapainossa eli käytännössä molemmat terävälit ovat identtiset. Esimerkiksi jauhatuksen kuormitusta lisättäessä liikkuvaa staattoria liikutetaan kohti roottoria, jolloin teräväli pienenee, jonka seurauksena pumppausefekti lisääntyy ja terävälissä virtaavan massan paine nousee. Tällöin F_1 on suurempi kuin F_2, joten roottori liikkuu kohti kiinteää staattoria kunnes massan paineet ovat molemmilla teräväleillä yhtä suuret.

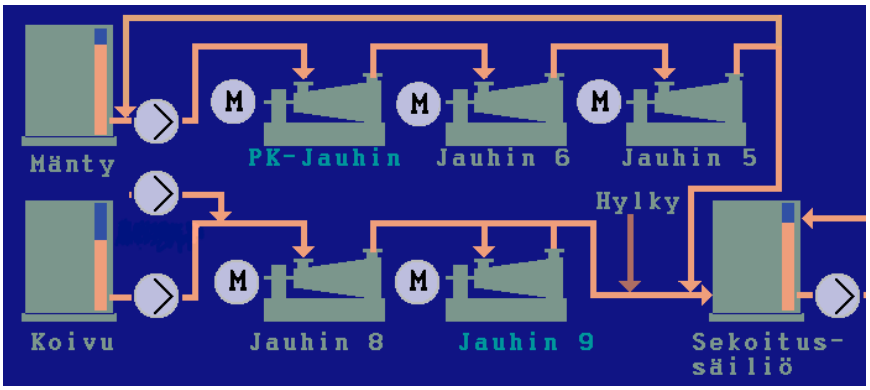
Huomioitavaa on kuitenkin, että terävälien välille syntyvästä paine-erosta johtuvan tasapainottavien voimien epätasapainon on roottorin asemaa liikuttaakseen ensin voitettava jauhinkonstruktiosta johtuvat liikettä vastustavat kitkavoimat. Mikäli kitkavoimat kasvavat oleellisesti syystä tai toisesta (esimerkiksi liukupintojen rikkoutuminen), tulee roottorin tasapainottumisesta mahdotonta tai vähintään takertelevaa. Tässä tutkimuksessa ei arvioida tasapainottumiseen tarvittavien voimien suuruutta, sillä terävälien välillä vallitsevien paine-erojen mittaaminen ei ole nykyisellä mittalaitteistolla mahdollista. Tämän seurauksena laskelmia kitkavoimien suuruudesta ei esitetä, vaan tutkimusongelma pyritään ratkaisemaan jauhimen jauhatusparametrejä muuttamalla olettaen, että jauhimen suunnittelu on toteutunut ja konstruktion aiheuttamat kitkavoimat ovat vähäisiä.

6 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN TOIMINTAYMPÄRISTÖ JA TOIMINNALLISET ONGELMAT

Tässä luvussa käsitellään kaksoiskartiojauhimen toimintaympäristöä sekä kohdepaperikoneella havaittuja ongelmia kaksoiskartiojauhimen toiminnassa. Toimintaympäristö koostuu jauhatusjärjestelmästä, joka pitää sisällään kaksoiskartiojauhimen lisäksi kaksi tavallista kartiojauhinta sekä paperikoneen historian aikana useasti muokatun prosessiputkiston. Toiminnassa havaitut ongelmat ovat jauhimen jauhatusalueiden välinen epätasainen virtausjakauma ja jauhinterien teräkuvioinnin teräpintojen vaurioituminen, mikä on osoitettu kohdepaperikoneella käytettyjä vanhoja jauhinteriä valokuvaamalla.

6.1 Havumassan jauhatusjärjestelmä kohdepaperikoneella

Kohdepaperikoneen jauhatusjärjestelmä on rakennettu erilliseksi järjestelmäksi siten, että mäntysellusta valmistettu havupuumassa sekä koivusellusta valmistettu lehtipuumassa jauhetaan kukin omalla jauhinlinjallaan. Vesilietteessä oleva havupuumassa pumpataan annostelusäiliöstä syöttöpumpun avulla jauhimille, jonka jälkeen osa jauhetusta massasta kierrätetään takaisinkierrätyslinjan avulla takaisin syöttöpumpun imupuolelle ja osa annostellaan sekoitussäiliöön. Havupuumassan lisäksi sekoitussäiliöön yhtyvät muut massat sekä hylkykierrot. Sekoitusäiliöstä sekamassa pumpataan eteenpäin paperikoneelle. Periaatekuva jauhatusjärjestelmän toteutuksesta on esitetty kuvassa 36.



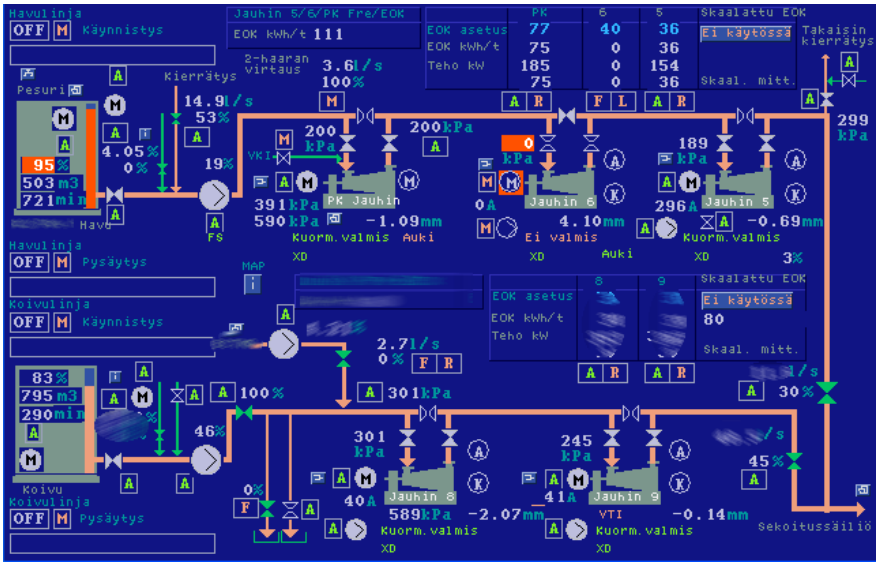
Kuva 36. Prosessinohjausjärjestelmästä poimittu periaatekuva jauhatusjärjestelmästä, jossa havupuumassan jauhinlinja on kuvan ylälaidassa.

Tutkittu havupuumassan jauhinlinja sisältää kolme sarjaankytkettyä kartiojauhinta, joista ensimmäinen on kaksoiskartiojauhin ja jälkimmäiset tavallisia kartiojauhimia. Kaksoiskartiojauhin on investoitu linjaan 2013, jolloin samassa yhteydessä toinen kartiojauhimista ohitettiin ja jätettiin linjan vara-jauhimeksi. Jauhinlinjaa ohjataan prosessinohjausjärjestelmästä EOK-säädön avulla, jolloin kullekin jauhimelle asetetaan haluttu kuormitustaso eli EOK:n asetusarvo, jonka jälkeen jauhimet säätävät automaattisesti jauhatuksen määrää sekoitussäiliöön annosteltavan massan virtauksen ja sakeuden mukaan. Jauhatuksen laatua seurataan kuitujen ominaisuuksia mittaavan massa-analysaattorin ja laboratoriomittausten avulla. Jauhatuksen luonnetta seurataan jauhimien ottaman tehon perusteella, sillä järjestelmässä ei ole varsinaista jauhatuksen intensiteettiin perustuvaa säätömahdollisuutta. Käytännössä operaattori säätää jauhatuksen luonnetta EOK:n asetusarvoa muuttamalla, jolloin jauhimen teräväli säätyy ja jauhimen ottama teho muuttuu, jonka seurauksena myös jauhatusintensiteettissä tapahtuu muutos. Jauhinlinjan käytössä olevien jauhimien tekniset tiedot on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Jauhimien tekniset tiedot.

Jauhintyyppi	**Moottorin teho [kW]**	**Häviöteho [kW]**	**Pyörimisnopeus [rpm]**
Kaksoiskartiojauhin (ADC-26)	450	44	750
Kartiojauhin (JC-02)	315	87	1500

Molemmat jauhimet on varustettu alhaisen jauhatusintensiteetin terillä, jotka omaavat kapeat teräurat ja harjanteet, minkä seurauksena terien leikkaussärmäpituus on suuri. Jauhatus on toteutettu asteittain siten, että ensimmäisenä olevaa energiatehokkaampaa kaksoiskartiojauhinta kuormitetaan korkeammalla EOK-tasolla kuin seuraavana olevaa kartiojauhinta. Operaattori voi halutessaan muuttaa molempien jauhimien kuormitusta yksitellen tai vastaavasti molempien yhtä aikaa. Jauhinlinjan kokonaisenergiankulutus pyritään kuitenkin pitämään mahdollisimman alhaisena, sillä jauhatusta voidaan pitää paperikoneen massankäsittelyn suurimpana yksittäisenä energiankuluttaja. Kyseisen linjan jauhimien energian kokonaiskulutus vaihtelee tuotantotilanteesta riippuen 300–500 kWh välillä. Jauhinlinjojen operointinäyttö on esitetty kuvassa 37.



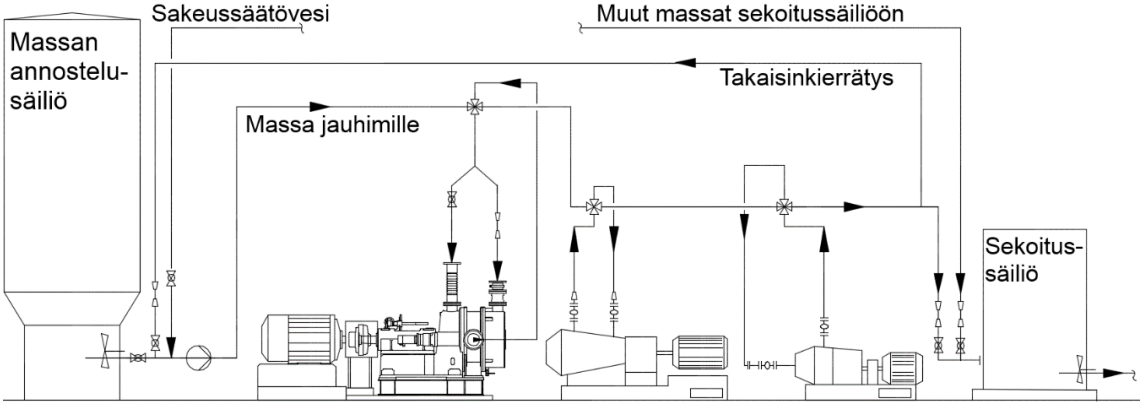
Kuva 37. Jauhinlinjojen operointinäyttö, jossa havupuumassan jauhinlinja on kuvan yläosassa (PK-jauhin = kaksoiskartiojauhin ja Jauhin 5 = kartiojauhin).

Kuvan 37 operointinäytön yläreunassa on jokaisen jauhimen EOK-asetusarvo, jonka alapuolella on kyseisen hetken toteutunut energianominaiskulutus. Toteutuneen EOK:n alapuolella on puolestaan jauhimen sähkömoottorin ottama teho. Lisäksi näytöltä ilmenee jauhinlinjan toteutunut kokonaisenergianominaiskulutus sekä lukuisia muita tärkeitä online mittauksia kuten virtaus sekoitussäiliöön, takaisinkierrätyksen virtaus, jauhatussakeus, jauhimien syöttöpaineet ja teräasemat. Linjan ohjaaminen tarkoittaa käytännössä jauhimien kuormituksien säätämistä, sillä muut tekijät on vakioitu tavoittelemaan automaattisesti haluttua asetusarvoa, joiden osalta operaattorin tehtäväksi jää mahdollisten häiriötilanteiden huomioiminen. Kohdepaperikoneella sekoitussäiliöön tarvittava virtaus kuitenkin vaihtelee tuotantotilanteesta riippuen 10–16 l/s välillä, joten jauhinlinjan ohjaaminen vaatii operaattorilta jatkuvaa massan ja valmistuvan paperin laaduntarkkailua.

6.1.1 Prosessiputkisto

Jauhimet on sijoitettu paperikoneen konetasolle, joille havupuumassa pumpataan annostelusäiliön jälkeisestä annostelutukista runkolinjaa pitkin keskipakopumpulla. Massa ohjataan runkolinjasta jokaiselle jauhimelle nelitieventtiilin avulla, jolloin massa virtaa jauhimen lävitse ja palaa takaisin runkolinjaan, mikä päättyy ennen sekoitussäiliötä olevaan sekoitustukkiin. Ennen sekoitustukkia runkolinjasta haarautuu virtausmittauksen sisältävä venttiililillä säädettävä takaisinkierrätyslinja, minkä avulla osa massasta johdetaan takaisin annostelutukkiin. Annostelutukkiin syötetään kierrätetyn massan lisäksi sakeuden säätöön

tarkoitettu vesi. Sekoitustukkiin syötetään havupuumassan lisäksi muut paperikoneella käytettävät massat, jotka sekoitetaan sekoitussäiliössä. Kohdepaperikoneen havupuumassan jauhinlinjan yksinkertaistettu virtauskaavio on esitetty kuvassa 38.



Kuva 38. Yksinkertaistettu jauhinlinjan virtauskaavio, jossa jauhettavan massan annostelutukki on vasemmalla massan annostelusäiliön jälkeen ja sekoitustukki oikealla ennen sekoitussäiliötä.

Runkolinjan ja jauhimien välissä olevat nelitieventtiilit mahdollistavat jokaisen jauhimen ohittamisen tuotantotilanteessa. Kaksoiskartiojauhimen kohdalla nelitieventtiilin jälkeinen jauhimen syöttölinja jakaantuu tavallisista jauhimista poiketen kahteen erilliseen syöttöhaaraan, joita pitkin massa etenee molemmille jauhatusalueille. Toiseen syöttöhaaroista on asennettu säätöventtiili ja toiseen virtauksien jakaantumisen seurantaa varten virtausmittari. Runkolinjassa on virtausmittari ja säätöventtiili ennen sekoitustukkia, joiden avulla jauhettu massa annostellaan sekoitustukkiin. Lisäksi putkisto sisältää paikallismittauksia ohjausta varten ja käsiventtiileitä sekä huuhtelu- ja tyhjennyshaaroja linjan pysäyttämistä ja kunnossapitotöitä varten. Putkistokokonaisuutta on päivitetty useasti historian aikana, minkä seurauksena putkisto kulkee useassa eri tasossa ja sisältää huomattavan määrän mutkia. Jauhatuskokonaisuus on rakennettu ahtaaseen matalaan tilaan, mikä myös vaikuttaa osaltaan putkiston suoraviivaisuuteen ja tekee putkistosta monimutkaisen.

6.1.2 Havupuumassan takaisinkierrätys

Jauhimet ovat suunniteltu kokoluokasta, tyypistä ja käytetyistä terägeometrioista riippuen operoimaan tietyllä virtaus-alueella, jonka ulkopuolella jauhimen toiminta heikkenee ja sillä

saavutettu jauhatustulos huononee. Usein jauhimen toiminta-alueen yläpäässä jauhin tulisi olla varustettu erilaisilla terillä kuin alueen alapäässä, jotta haluttu jauhatustulos saavutetaan. Korkeiden virtauksien käsittelyyn suotuisat terät omaavat leveät teräurat ja vastaavasti matalille virtauksille terien tulisi sisältää kapeat teräurat. Lisäksi virtauksen vähentyessä jauhimen terien fyysisten teräkosketuksien mahdollisuus kasvaa, sillä terien välissä olevan massan määrä vähenee. (Rihs & Josephson 1997, s. 1; Kereks 2014, s. 29.)

Riittävän jauhimen läpi virtaavan massan määrän varmistamiseksi jauhinlinjaan voidaan rakentaa takaisinkierrätyslinja. Lisäksi takaisinkierrätyslinjalla voidaan varmistaa jauhimen toiminta optimaalisella alueella tuotantotilanteesta riippumatta. Havupuumassan jauhatuksessa takaisinkierrätyksellä ei ole negatiivisia vaikutuksia jauhatustulokseen, mutta energian ominaiskulutus kasvaa hieman jauhetun ja jauhamattoman massan suhteen kasvaessa. (Rihs & Josephson 1997, s. 2−3.)

Rihls:n ja Josephsonin (1997, s. 7) mukaan jauhinkohtainen minimivirtaus perustuu käytännön kokemuksiin riippuen jauhintyypistä, kokoluokasta, pyörimisnopeudesta, käytetyistä terägeometrioista ja jauhettavan massan ominaisuuksista. Kohdepaperikoneella tuotannossa olevat paperilajit eivät vaadi korkeita havupuumassan määriä. Osaltaan tämän seurauksena havupuumassan jauhinlinjan massavirtaukset ovat kaikilla paperilajeilla matalia. Ilman massan takaisinkierrätystä jauhinlinjan läpi virtaavan massan määrä ei riittäisi tyydyttämään jauhimien tarpeita, vaan jauhatustulos olisi riittämätön.

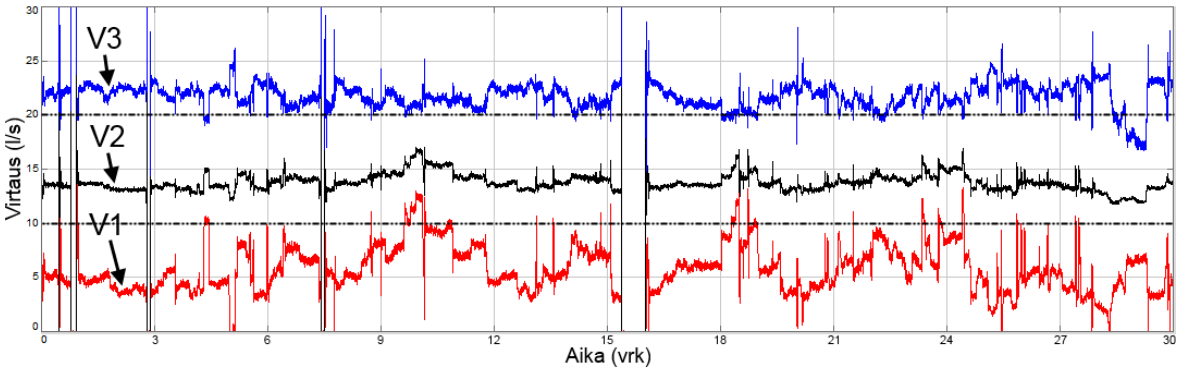
6.2 Toiminnalliset ongelmat kohdepaperikoneella

Kaksoiskartiojauhinta voidaan pitää toimintaperiaatteeltaan ja rakenteeltaan hyvin samanlaisena kuin kaksoislevyjauhinta. Tämän seurauksena myös kaksoiskartiojauhimen toiminnan toteutumisen edellytyksenä voidaan pitää läpi virtaavan massan jakautumista mahdollisimman tasaisesti jauhatusalueiden kesken. Mikäli toiselle jauhatusalueelle virtaa enemmän massaa kuin toiseen, voidaan jauhatusteorioiden perusteella todeta myös jauhatuksen määrän ja luonteen olevan erilaiset jauhatusalueiden kesken. Yksittäisen jauhatusalueen jauhatustapahtumien kuituihin kuituja muokkaavat voimat ovat riippuvaisia niihin kohdistetuista rasituksista, kuten jauhatustapahtumaa käsiteltäessä esitettiin. Rasitukset ovat pääpiirteittäin riippuvaisia teräparin terävälistä, jauhettavan massan laadusta, määrästä sekä käytetyistä terägeometrioista.

6.2.1 Virtauksien epätasainen jakautuminen

Kohdepaperikoneella jauhimen osavirtauksien seuraamista varten on asennettu virtausmittari kiinteän staattorin omaavan jauhatusalueen syöttöhaaraan ja kokonaisvirtausta jauhimen läpi mitataan ennen sekoitussäiliötä olevalla virtausmittarilla sekä takaisinkierrätyksen putkessa sijaitsevalla virtausmittarilla. Jauhimen läpi virtaava massan kokonaisvirtaus saadaan lisäämällä sekoitussäiliöön annosteltavan massan virtaus takaisinkierrätettävän massan virtaukseen. Kokonaisvirtaus puolittamalla saadaan tavoiteltu laskennallinen osavirtaus eli virtauksen määrä, joka pitää toteutua molemmilla jauhatusalueilla, jotta jauhimen jauhatustapahtuma toteutuu tasaisesti molemmilla jauhatusalueilla.

Kyseisten mittausten perusteella jauhimen läpi virtaavan massan määrä jakaantuu tuotannossa olevasta lajista riippumatta epätasaisesti jauhatusalueiden kesken. Epätasaisen virtausjakauman ja aiemmin esitellyn jauhatuksen teorian perusteella jauhin rasittaa tällöin kuituja epätasaisesti jauhatusalueiden välillä, eikä toimi suunnitellusti. Kuvassa 39 on esitetty kuvaaja jauhimen virtauksista kuukauden ajalta ennen tämän tutkimuksen aloittamista. Kuvaajassa sininen käyrä (V3) kuvaa liikkuvan staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtausta, musta käyrä (V2) tavoiteltua osavirtausta ja punainen käyrä (V1) kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtausta. Kolmenkymmenen vuorokauden ajojaksolta on kerätty 43200 mittauspistettä, mittaustiheyden ollessa 1/min.



Kuva 39. Kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueiden toteutuneet osavirtaukset (V3 ja V1) ja tavoiteltu osavirtaus (V2) esitettynä ajan suhteen, jossa huomioitavaa on toteutueiden osavirtauksien (V3 ja V1) yli 10 l/s poikkeama toisistaan. 10 l/s alueen mittaviivat on havainnollistettu kuvaan katkoviivoin.

Kuvaajassa näkyvät yksittäiset käyrien piikit ovat mittavirheitä ja mittausjakson puolivälissä (Ajanhetkellä 15–18vrk) näkyvä tyhjä alue, jossa kaikki käyrät laskevat nollaan on vuorokauden pituinen tuotannon pysäytys, jolloin jauhatusjärjestelmä on ollut pysäytettynä. Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että V3 on koko mitatun jakson ajan yli 7 l/s korkeampi kuin V1 ja molemmat poikkeavat tavoitellusta V2 käyrästä. Keskiarvollisesti mittausjakson aikana osavirtaus V3 on 21,00 ±4,03 l/s, tavoiteltu osavirtaus V2 on 13,27 ±2,55 l/s ja osavirtaus V1 on 5,55 ±2,39 l/s. Kokonaisvirtaus jauhimen läpi on keskiarvollisesti 26,54 ±5,10 l/s, joten liikkuvan staattorin sisältävä jauhatusalueen avulla käsitellään 79 % jauhettavasta massasta ja vastaavasti kiinteän staattorin jauhatusalueella 21 % massasta.

Kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen 15,45 l/s matalamman virtauksen seurauksena kyseisen jauhatusalueen pumppausefekti on teorian mukaan toisen jauhatusalueen pumppausefektiä tehokkaampi, jolloin myös paineesta syntyvä liukuvaan roottoriin vaikuttava voima on suurempi kuin korkeamman virtauksen jauhatusalueella. Tämän seurauksena myös roottorin asema painottuu teorian mukaan lähemmäksi liikkuvaa kuin kiinteää staattoria. Teorian mukaan kuituja kuormitetaan siis liikkuvan staattorin sisältävällä jauhautusalueella kapeammassa terävälissä eli suuremmalla rasituksella, jolloin myös kuiduissa tapahtuvat muutokset ovat jauhautusalueiden kesken erilaiset. Jauhatusalueille muodostuvia voimia ja kuituihin kohdistuvia rasituksia ei ole tässä tutkimuksessa todennettu.

Kyseisessä ajojaksossa jauhatusjärjestelmän säädöt on pidetty vakiona jauhatustasoa lukuunottamatta eli EOK-asetusarvoa (jauhatustaso) on muutettu sekoitussäiliöön tarvittavan virtauksen mukaan. Massan syöttöpaine on vakioitu tavoittelemaan arvoa 200 kPa ja takaisinkierrätyksen virtaus arvoa 15 l/s. Kaksoiskartiojauhimen EOK-asetusarvoa on säädetty 72−77 kWh/t välillä siten, että jauhatusjärjestelmän kokonaisenergian ominaiskulutus on pidetty 105−110 kWh/t välillä. Jauhatusjärjestelmän jauhatussakeus on pidetty sakeusveden säädön avulla 4,1 %:ssa.

6.2.2 Terien vaurioituminen

Kohdepaperikoneella on havaittu terien vaihdon yhteydessä liikkuvan staattorin jauhatusalueen teräparin terissä poikkeuksellista vaurioitumista, mikä on havaittavissa samassa kohtaa teräparin jokaisessa teräsegmentissä. Vaurioitumisen arvioidaan olevan

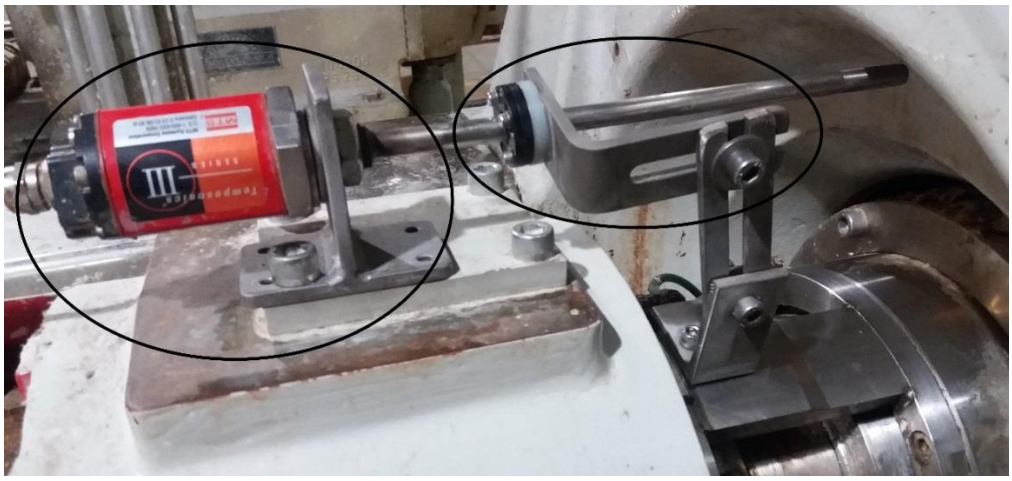
peräisin mahdollisesta terien fyysisestä teräkosketuksesta, sillä jauhettavan massan ei ole havaittu sisältävän kovia ainesosia, jotka teräparin väliin joutuessaan aiheuttaisivat vastaavan teräpintojen rikkoutumisen. Kuvassa 40 on esitetty valokuva yhdestä kaksoiskartiojauhimen teräsegmentistä, jossa teräkuvioinnissa on selkeästi nähtävissä vaurioituneet teräpinnat. Teräpintojen vaurioituminen on kuvattuna laajemmalta alueelta liitteessä 4.

Kuva 40. Kaksoiskartiojauhimen vaurioitunut teräsegmentti, jossa teräpintojen rikkoutuminen on havaittavissa kuvien alalaidassa.

J&L Fiber Services:n (1999b) mukaan teräpintojen rikkoutuminen tapahtuu tyypillisesti teräsegmenttien välisissä siirtymäkohdissa tai teräkartion pienemmän halkaisijan päässä teräkuvioinnin alussa ja rikkoutumisia voidaan välttää terägeometrian oikealla valinnalla. Kohdepaperikoneella teräpintojen rengasmainen rikkoutumisalue muodostuu juuri teräkartion pienemmän halkaisijan päähän teräkuvioinnin alkuun, mutta on havaittavissa vain toisen jauhatusalueen teräparissa vaikka terägeometriat ovat jauhatusalueiden kesken identtiset. Lisäksi huomioitavaa on, että terävauriot ovat muodostuneet jauhatusalueelle, jossa virtaus on normaalissa tuotantotilanteessa toisen jauhatusalueen virtausta korkeammalla tasolla. Edellä mainituista seikoista johtuen mahdollisia fyysisiä teräkosketuksia tutkitaan tässä tutkimuksessa tuotantotilanteista, joissa jauhatusalueet eivät ole massakuormalla eli teräväleissä ei ole jauhettavaa massaa. Tällaisia tilanteita ovat jauhimen pysäytys- ja käynnistysvaihe.

7 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN PYSÄYTYS- JA KÄYNNISTYSVAIHE

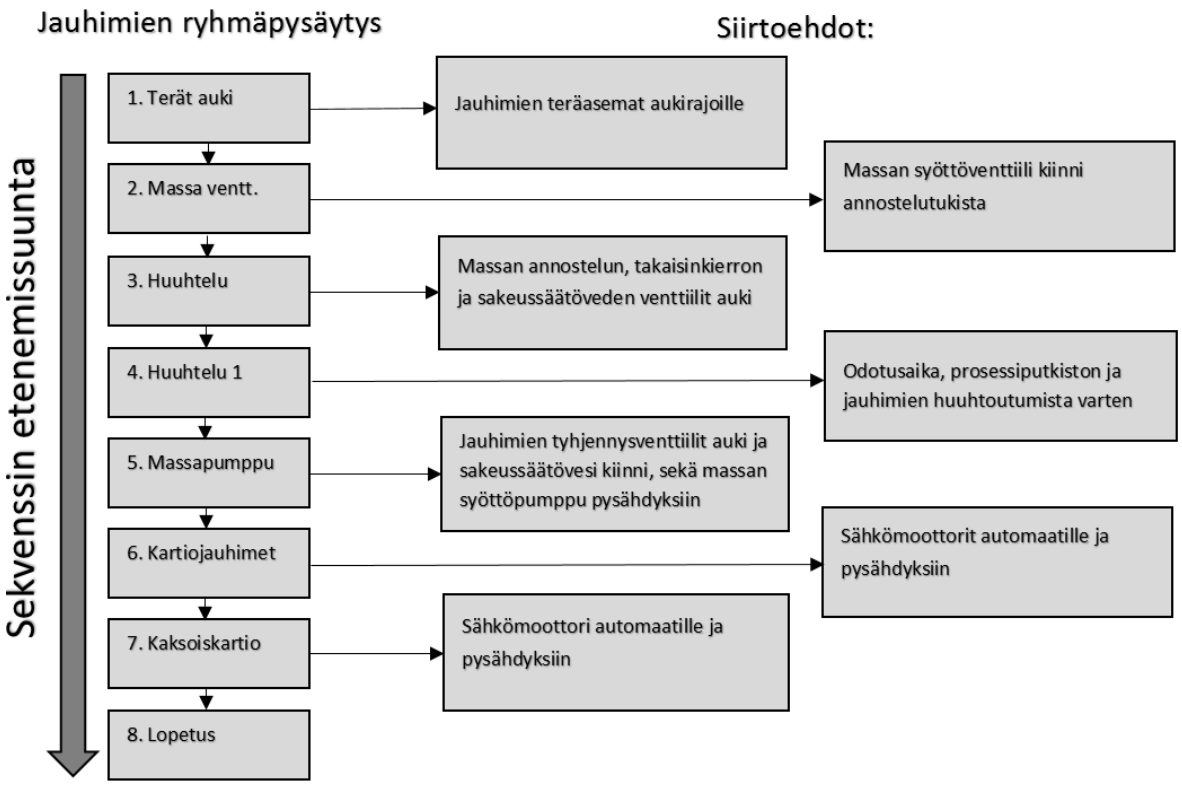
Kaksoiskartiojauhimen terissä havaittujen terävaurioiden seurauksena jauhimen pysäytys- ja käynnistysvaihe tutkitaan ja pyritään löytämään vaiheista kohdat, joissa fyysinen teräkosketus on mahdollinen eli teräpintojen väliltä puuttuu kuormituksen vastaanottava tuote. Terien asematietojen seuraamiseksi tutkittavaan kaksoiskartiojauhimeen asennettiin magnetostriktiivinen lineaari-anturi, minkä magneetin sisältävä mittapää asennettiin jauhimen akselin mukana liikkuvaan mekaanisen tiivisteen laakerointiin kiinnittyvään runko-osaan. Itse mittalaite asennettiin telineen avulla jauhimen kiinteään runkoon. Anturin avulla mitattiin jauhimen roottorin asematietoa tarkkuudella 0,01 mm ja mittaustiheydellä 1/10s. Ennen kyseisen anturin asennusta terien asematietoja on mitattu pelkällä jauhimen alkuperäisellä liikkuvan staattorin asematiedon mittaavalla anturilla, jolloin terien välistä etäisyyttä ei ole saatu selville. Tutkimuksen aikana asennettu lineaari-anturi on esitetty kuvassa 41. Fyysisen teräkosketuksen katsotaan olevan mahdollinen kun teräasemien välinen etäisyys on alle 0,50 mm ja jauhin on vesikuormalla. Terien asematietojen nollakohdat on asetettu jauhimen ollessa tyhjänä ja pysähdyksissä sekä teräpintojen ollessa fyysisesti kiinni toisissaan.



Kuva 41. Kaksoiskartiojauhimeen asennettu magnetostriktiivinen lineaari-anturi, jonka mittalaite on kuvan vasemmassa laidassa ja magneetin sisältävä mittapää asennustelineineen oikealla.

7.1 Pysäytysvaiheen kuvaus

Kaksoiskartiojauhimen pysäytysvaihe on osa jauhatusjärjestelmän jauhimien ryhmäpysäytys -sekvenssiä, mikä pitää sisällään kahdeksan askelta. Jokaisen askeleen takana ovat askelkohtaiset siirtoehdot, jotka sisältävät ohjausjärjestelmälle välitettäviä käskyjä. Sekvenssi etenee seuraavaan askeleeseen, kun edellisen askeleen siirtoehdot ovat täyttyneet. Kuvassa 42 on havainnollistettu kohdepaperikoneen jauhimien ryhmäpysäytyksen sekvenssin askeleet ja askeleiden siirtoehdot.

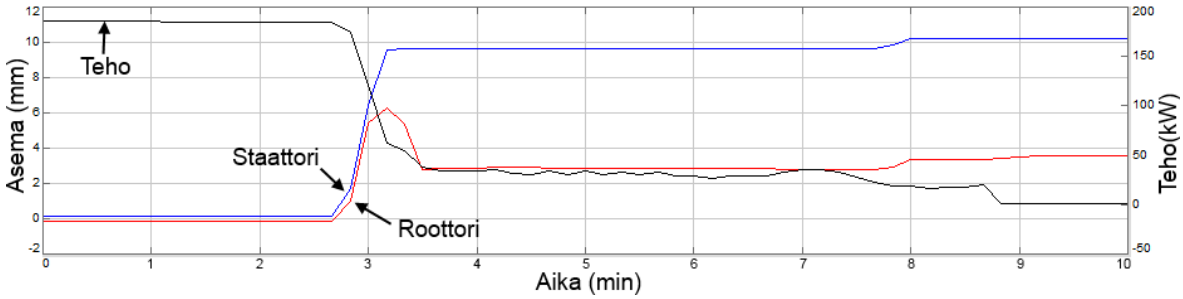


Kuva 42. Kohdepaperikoneen jauhimien ryhmäpysäytyksen sekvenssikuvaus, jossa sekvenssin askeleet on esitetty kuvan vasemmassa laidassa ja askelkohtaiset siirtoehdot oikealla.

Operaattori käynnistää jauhimien ryhmäpysäytyksen tilanteissa, joissa tuotanto pysähtyy ja järjestelmä ajetaan hallitusti alas. Jauhimien pysäytyssekvenssi aloittaa ajamalla jauhimien teräasemat auki asentoon, jonka jälkeen massan annostelusäiliön ja syöttöpumpun välinen massan syöttöventtiili suljetaan. Tämän jälkeen prosessiputkisto huuhdellaan sakeudensäätövedellä kokonaisuudessaan massan syöttöpumpun avulla. Huuhtelun aikana huuhteluvesi ja prosessiputkistoon jäänyt massa johdetaan massan annosteluventtiilin läpi sekoitustukkiin. Odotusajan sisältävän huuhtelun jälkeen massan syöttöpumppu pysäytetään

ja sakeussäätöventtiili suljetaan sekä jauhimien tyhjennysventtiilit avataan, jotta putkisto ja jauhimet tyhjenevät. Tämän jälkeen jauhimien sähkömoottorit pysäytetään ja sekvenssi loppuu. Tuotannon aikana järjestelmä valvoo itsenäisesti itseään ja mikäli käyntiohjelmaan ohjelmoidut raja-arvot täyttyvät, ei ryhmäkäynnistystä käynnistetä erikseen, vaan jauhimet pysäytetään automaattisesti vaurioiden välttämiseksi.

Asematietojen avulla kaksoiskartiojauhimen pysäytystä tutkittaessa huomataan, että jauhin ajaa liikkuvan staattorin aukirajalle pysäytyksen alkaessa, kuten pysäytyssekvenssin kuvauksestakin on nähtävissä. Jauhimen rakenteessa olevan akselipaketin mekaanisen aksiaalisuuntaisen lukituksen avulla on varmistettu, että myös roottorin asema liikkuu staattorin mukana auki vähintään 3 mm, jolloin myös kiinteän staattorin ja roottorin välinen teräväli avautuu. Liikkuvan staattorin ja roottorin mitatut asematiedot ryhmäpysäytyksen ajalta on esitetty kuvassa 43, jossa mittausjakson pituus on 10 min ja mittaustiheys 1/10 s (mittauspisteitä 60).



Kuva 43. Jauhinterien asematiedot sekä jauhimen jauhatusteho pysäytyksen ajalta, jossa mahdollisien fyysisien teräkosketuksen ajankohtia ei havaita eli teräasemat pysyvät yli 0,5 mm päässä toisistaan staattorin liikuttua aukirajalle, jolloin myös jauhatusteho laskee alle 50 kW:n.

Kuvasta 43 nähdään, että pysäytysvaihe alkaa terävälien aukaisulla, mikä näkyy staattorin asematiedon muutoksena positiiviseen suuntaan. Staattorin asematiedon muuttuessa myös roottorin asematieto muuttuu positiiviseen suuntaan eli molemmat terävälit aukeavat. Terävälien aukeamisen seurauksena jauhimen jauhatusteho laskee. Staattorin teräaseman saavuttaessa sille asetetun aukirajan sen liike pysähtyy, samoin tapahtuu roottorin aseman liikkeelle. Tämän jälkeen pysäytyssekvenssi sulkee massan syöttöventtiilin ja aloittaa huuhtelu-askeleen. Ennen huuhtelu askeleen alkamista tai juuri sen alkaessa roottorin asema

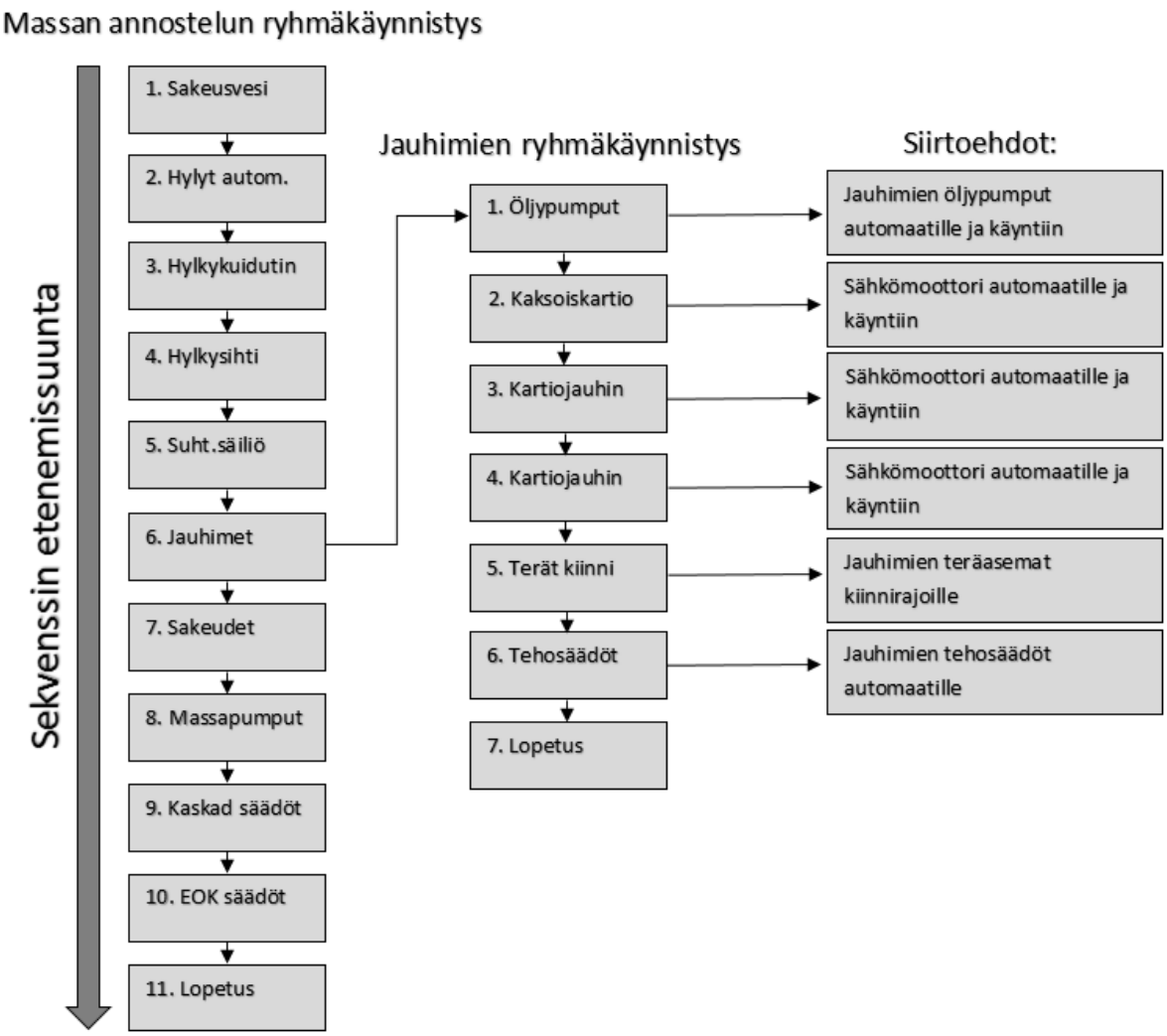
liikahtaa takaisin 3,50 mm, jonka jälkeen pysyy lähes stabiilina lukuun ottamatta huuhtelu-askeleen lopussa tapahtuvaa pientä muutosta, mikä näkyy myös staattorin aseman liikahtamisena. Huuhtelu askeleen päätyttyä massan syöttöpumppu pysäytetään ja jauhimien tyhjennysventtiilit avataan, jolloin vesi poistuu putkistosta, mikä näkyy jauhatustehon laskuna ajanhetkellä 7,5 min. Tämän jälkeen jauhimen sähkömoottori pysäytetään, jolloin jauhatusteho laskee nollaan.

Jauhimien ryhmäpysäytyksen sekvenssikuvauksen perusteella pysäytyssekvenssin ensimmäisessä askeleessa jauhimen staattorin teräasema ajetaan aukirajalle, jonka jälkeen toisessa askeleessa massan syöttöventtiili suljetaan ja jauhin siirtyy vesikuormalle. Kuvassa 43 nähtävien asematietojen perusteella staattorin ja roottorin asemien keskinäinen poikkeama on ensimmäisen askeleen päättymishetkellä 3,27 mm, eikä pienene tämän jälkeen, joten poikkeama ei saavuta alle 0,50 mm jauhimen ollessa vesikuormalla, tämän seurauksena fyysisien teräkosketuksen ei katsota olevan mahdollisia kaksoiskartiojauhimen pysäytysvaiheessa. Huomioitavaa on kuitenkin, että jauhimen aksiaalisuuntainen mekaaninen lukitus ei estä roottorin liikettä molempiin suuntiin, sillä asematietojen perusteella kelluvan roottorin asema muuttuu vielä ensimmäisen askeleen päätyttyä.

7.2 Käynnistysvaiheen kuvaus

Kaksoiskartiojauhimen käynnistysvaihe on osa jauhimien ryhmäkäynnistys -sekvenssiä, mikä käynnistyy osana massan annostelun ryhmäkäynnistys -sekvenssiä. Massan annostelun ryhmäkäynnistys pitää sisällään 11 askelta, joista kuudes käynnistää jauhimien ryhmäkäynnistyksen, mikä pitää sisällään seitsemän askelta. Pääpiirteittäin massan annostelun ryhmäkäynnistys etenee seuraavasti: ensimmäinen askel käynnistää sakeussäätöveden pumpun ja täyttää prosessiputkiston vedellä. Seuraavissa neljässä askeleessa käynnistetään paperikoneen hylkyjärjestelmä ja suhteutussäiliön pumppu sekä aktivoidaan hylkyjärjestelmän sakeus. Kuudennessa askeleessa jauhimien jälkeinen massan annosteluventtiili sekoitustukkiin avataan sekä takaisinkierrätyksen venttiili avataan. Tämän jälkeen askel käynnistää jauhimien ryhmäkäynnistyksen, jonka päätyttyä seitsemännessä askeleessa massan annostelutukin syöttöventtiili sekä jauhinlinjan sakeudensäätöveden venttiili avataan. Kahdeksannessa askeleessa massan syöttöpumppu käynnistetään ja jauhinlinjan sakeussäätö aktivoidaan eli sakeussäätöveden venttiili asetetaan tavoittelemaan haluttua sakeusarvoa. Seuraavassa askeleessa sekoitustukissa sijaitsevat eri massojen

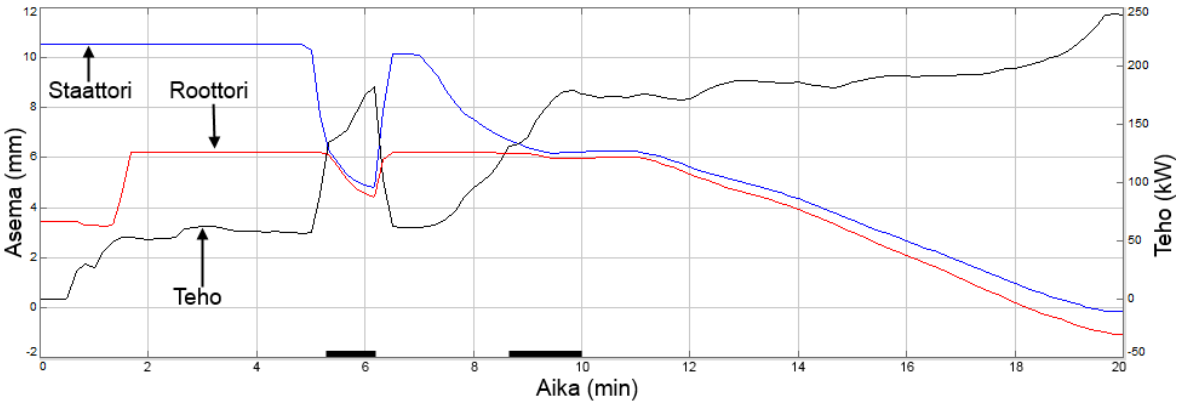
annosteluventtiilit asetetaan kaskad-säädölle eli seuraamaan sekoitussäiliön pintaa ja säätämään jauhinlinjakohtaista massan määrää käytettävän hylyn määrä huomioiden. Kymmenennessä askeleessa jauhimet asetetaan EOK-säädölle, jonka jälkeen massan annostelun ryhmäkäynnistys loppuu. Massan annostelun ryhmäkäynnistyksen askeleet sekä jauhimien ryhmäkäynnistys siirtoehtoineen on esitetty kuvassa 44.



Kuva 44. Kohdepaperikoneen massan annostelun ryhmäkäynnistyksen sekvenssinkuvaus, johon sisältyvä jauhimien ryhmäkäynnistys on esitetty kuvan keskellä.

Massan annostelun ryhmäkäynnistyksen osana käynnistyvä jauhimien ryhmäkäynnistys on yksinkertainen. Jauhimien ryhmäkäynnistyksessä ensimmäiseksi jauhimien öljypumput asetetaan automaatille ja käynnistetään. Öljypumppujen käynnistämisen jälkeen jauhimien sähkömoottorit käynnistetään sarjassa siten, että ensin käynnistyy kaksoiskartiojauhin, jonka jälkeen käynnistyvät tavalliset kartiojauhimet. Tämän jälkeen jauhimien teräasemia ajetaan

kiinni ohjelmaan asetettuun rajaan asti, jonka tarkoituksena on saattaa jauhimien terävälit lähemmäksi toisiaan jo ennen jauhettavan massan syöttöä, jotta jauhaminen olisi mahdollisimman tehokasta heti alusta alkaen. Terien kiinni ajon jälkeen jauhimet asetetaan tehosäädölle eli tavoittelemaan ohjelmaan asetettua käyntitehoa, kunnes massan annostelun ryhmäkäynnistys etenee askeleeseen, jossa jauhimet asetetaan EOK-säädölle. Viimeisenä askeleena jauhimien ryhmäkäynnistyksessä on lopetus, jolloin jauhimien ryhmäkäynnistys päättyy ja massan annostelun ryhmäkäynnistys jatkaa seuraavaan askeleeseen. Kaksoiskartiojauhimen liikkuvan staattorin ja roottorin mitatut asematiedot jauhimien ryhmäkäynnistyksen ajalta on esitetty kuvassa 45, jossa mittausjakson pituus on 20 min ja mittaustiheys 1/10 s (mittauspisteitä 120).



Kuva 45. Jauhinterien asematiedot sekä jauhimen jauhatusteho käynnistysvaiheen ajalta, jossa mahdollisien fyysisien teräkosketusten ajankohdat on merkattu x-akselille (asematiedot ovat alle 0,50 mm ja teho nousee jauhimen ollessa vesikuormalla).

Kuvasta 45 nähdään, että jauhimen sähkömoottorin käynnistyttyä roottorin asema liikahtaa 2,92 mm lähemmäksi staattorin asemaa. Tämän jälkeen jauhinlinjan muiden jauhimien sähkömoottorit käynnistetään, minkä ajan kaksoiskartiojauhimen asemat pysyvät paikallaan. Jauhinlinjan kaikkien jauhimien sähkömoottorien käynnistyttyä siirrytään jauhimien ryhmäkäynnistyksen viidenteen askeleeseen, jolloin jauhimien teräasemia ajetaan kiinni jauhinkohtaisiin ohjelmallisiin kiinnirajoihin asti (kaksoiskartiojauhin 5 mm). Asematietojen perusteella kaksoiskartiojauhin toteuttaa askeleen ja staattorin teräasema liikkuu kiinnirajaan asti, jonka jälkeen palaa lähes lähtöpisteeseen. Staattorin teräaseman saavuttaessa kiinnirajaa myös kelluvan roottorin asema heilahtaa negatiiviseen suuntaan (ajanhetkellä 6 min).

Tämän jälkeen asemat ovat stabiilit, kunnes kuudennessa askeleessa kaksoiskartiojauhin asetetaan tehosäädölle tavoittelemaan ohjelmaan asetettua käyntitehoa (180 kW), jolloin jauhin pyrkii säätämään terävälejä kapeammiksi staattorin teräasemaa liikuttamalla (ajanhetkellä 7–10 min). Kuormitettavan staattorin ja kelluvan roottorin teräasemien etäisyyden kaventuessa myös roottorin teräasema liikahtaa teräaseman edellä. Kaksoiskartiojauhimen saavutettua asetettu tehosäädön mukainen käyntiteho jauhimien ryhmäkäynnistys loppuu. Teräasemat pysyvät stabiilina, kunnes massan annostelun ryhmäkäynnistys etenee kymmenenteen askeleeseen, jossa jauhimet asetetaan EOK-säädölle. EOK-säädölle mentäessä kaksoiskartiojauhin alkaa kuormittamaan itseään toteutuvan massan virtauksen mukaan eli säätämään staattorin teräasemaa kiinni, jolloin myös roottorin teräasemassa tapahtuu negatiivista muutosta.

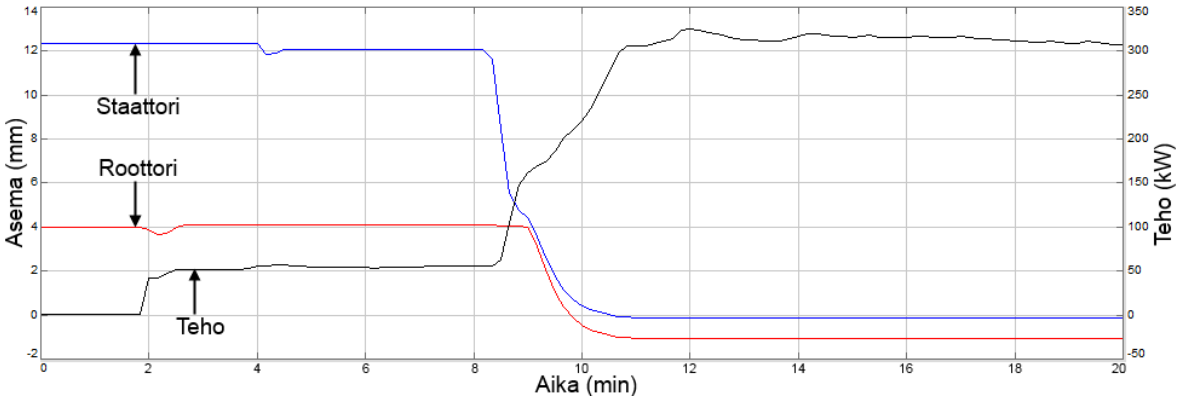
Massan annostelun ryhmäkäynnistyksen sekvenssikuvauksen mukaan jauhatusjärjestelmän massan syöttöventtiili avataan sekvenssin seitsemännessä askeleessa ja massan syöttöpumppu käynnistetään kahdeksannessa askeleessa. Tällöin kaksoiskartiojauhin on vesikuormalla koko jauhimien ryhmäkäynnistyksen ajan. Kuvassa 45 nähtävien asematietojen perusteella staattorin ja roottorin asemien keskinäinen poikkeama on alle 0,50 mm jauhimien ryhmäkäynnistyksen viidennessä ja kuudennessa askeleessa eli jauhinterien fyysinen teräkosketus on kaksoiskartiojauhimen käynnistymisvaiheen aikana mahdollinen.

7.3 Käynnistysvaiheeseen tehdyt muutokset

Kaksoiskartiojauhimen käynnistysvaihetta tutkittaessa huomio kiinnittyy jauhimien ryhmäkäynnistyksen viidenteen ja kuudenteen askeleeseen sekä lisäksi kaksoiskartiojauhimen sähkömoottorin käynnistymisen jälkeen tapahtuvaan roottorin asemassa havaittavaan hallitsemattomaan liikkeeseen. Roottorin paikallaan pysyminen varmistettiin jauhimen rakenteessa olevaa mekaanista akselipaketin takavastetta säätämällä, mikä pysäyttää akselipaketin liikkeen jauhimen pysäytysvaiheessa takavastetta vasten. Mekaanisen takavasteen ja mekaanisen aksiaalisuuntaisen lukituksen yhteistoiminnan seurauksena roottorin asema on pakotettu jauhimen käynnistymisvaiheessa paikoilleen, kunnes liikkuva staattori säädetään pois aukirajalta. Käytännössä takavasteen ja aksiaalisuuntaisen lukituksen välille jää kuitenkin pieni välys, säätöteknillisistä asioista johtuen.

Jauhimien ryhmäkäynnistyksen viidennen askeleen kohdalla ohjelmallinen kiinniraja muutettiin siten, että kyseisessä askeleessa kaksoiskartiojauhin säätää staattorin asemaa vain 0,50 mm verran pois aukirajalta. Tämän seurauksena staattorin asema ei lähesty kriittisen etäisyyden (alle 0,50 mm) päähän roottorin asemaa vesikuormalla, mutta poistuu kuitenkin aukirajalta, jotta ohjelmalliset lukitukset avautuvat ja sekvenssi voi edetä seuraavaan askeleeseen. Viidennen askeleen mukainen jauhinterien kiinnirajalle ajaminen ei aiheuta vastaavia ongelmia tavallisien yhden jauhatusalueen sisältävien kartiojauhimien kohdalla, sillä tavallisissa kartiojauhimissa teräparin teristä vain toisen asema muuttuu teräasemaa säädettäessä.

Kaksoiskartiojauhimen tehosäädöllä tavoittelema käyntiteho muutettiin alkuperäisestä 180 kW:sta jauhimen tyhjäkäyntitehon läheisyyteen 50 kW:iin. Tämän seurauksena kaksoiskartiojauhin ei säädä staattorin asemaa negatiiviseen suuntaan ennen kuin massan annostelun ryhmäkäynnistyksen kymmenes askel asettaa jauhimen EOK-säädölle, jolloin massan syöttöpumppu on käynnistetty ja kaksoiskartiojauhin on massakuormalla. Jauhinterien mitatut asematiedot tehdyn tutkimuksen perusteella muutetun käynnistysvaiheen ajalta on esitetty kuvassa 46, jossa mittausjakson pituus on 20 min ja mittaustiheys 1/10 s (mittauspisteitä 120).



Kuva 46. Jauhinterien asematiedot sekä jauhimen jauhatusteho muutetun käynnistysvaiheen ajalta, jossa vastaavia mahdollisia fyysisien teräkosketuksien ajankohtia kuin kuvassa 45 ei ole nähtävissä eli jauhimen teho nousee ja jauhimen asematiedot lähestyvät toisiaan vasta EOK-säädöllä, jolloin jauhin on massakuormalla.

Kuvassa 46 nähtävien muutetun käynnistysvaiheen asematietojen mukaan jauhimen käynnistysvaihe onnistuu alkuperäistä tasaisemmin. Kaksoiskartiojauhimen käynnistyttyä

roottorin asema liikahtaa 0,21mm negatiiviseen suuntaan, mutta palaa kuitenkin takaisin lähtöpisteeseen. Tämän jälkeen toisessa askeleessa staattorin teräasema säädetään pois aukirajalta, jonka jälkeen molemmat teräasemat pysyvät stabiilina kunnes massan annostelun ryhmäkäynnistys asettaa jauhimen EOK-säädölle. Tällöin jauhin alkaa säätämään staattorin teräasemaa negatiiviseen suuntaan, jolloin jauhimen jauhatusteho nousee. Staattorin aseman lähestyessä roottorin asemaa, terävälin pumppausefekti kasvaa, minkä seurauksena myös roottorin asema alkaa liikkumaan staattorin aseman edellä negatiiviseen suuntaan. Ajan hetkellä 11 min jauhin saavuttaa asetetun EOK-tason mukaisen jauhatustehon, mikä havaitaan teräasemien liikkeen loppumisena ja siitä seuraavana toiminnan tasaantumisena.

Tehdyn tutkimuksen perusteella muutetun käynnistysvaiheen aikana kaksoiskartiojauhimen teräasemien keskinäisen etäisyyden ei havaita alittavan 0,50 mm rajaa jauhimen ollessa vesikuormalla, joten mahdollisia fyysisiä teräkosketuksia ei katsota esiintyvän. Huomioitavaa on kuitenkin, että kaksoiskartiojauhimen käynnistymisvaiheen onnistumiseen vaikuttaa useat jauhatusjärjestelmän muut tekijät, kuten esimerkiksi mahdolliset massan sakeus- ja paineheitot sekä jauhimien ryhmäkäynnistyksen piiriin kuuluvien tavallisten kartiojauhimien käyttäytyminen, joita ei tässä tutkimuksessa todennettu. Lisäksi käynnistysvaiheiden välisellä tuotantojaksolla tapahtuu jauhinterien lievää kulumista, joten muutetun käynnistysvaiheen asematiedot eivät ole täysin vertailukelpoisia alkuperäisen käynnistymisvaiheen kanssa. Mitattujen asematietojen perusteella voidaan kuitenkin sanoa muutetun käynnistysvaiheen olevan alkuperäistä käynnistysvaihetta stabiilimpi ja yksinkertaisempi teräasemien käyttäytymisen osalta, jolloin mahdollisien fyysisien teräkosketusten tapahtuminen on epätodennäköisempää. Kaksoiskartiojauhimen pysäytys- ja käynnistysvaiheen tarkempaa tutkimista varten kaksoiskartiojauhin tulisi varustaa tärinämittauksilla ja mittausjärjestelmä tulisi päivittää siten, että teräasemista olisi saatavilla mittaustietoa vähintään sadasosasekunnin välein. Tällöin voitaisiin varmemmin osoittaa, että fyysisiä teräkosketuksia ei tapahdu.

8 KAKSOISKARTIOJAUHIMEN AJOKOKEET JA TULOKSET

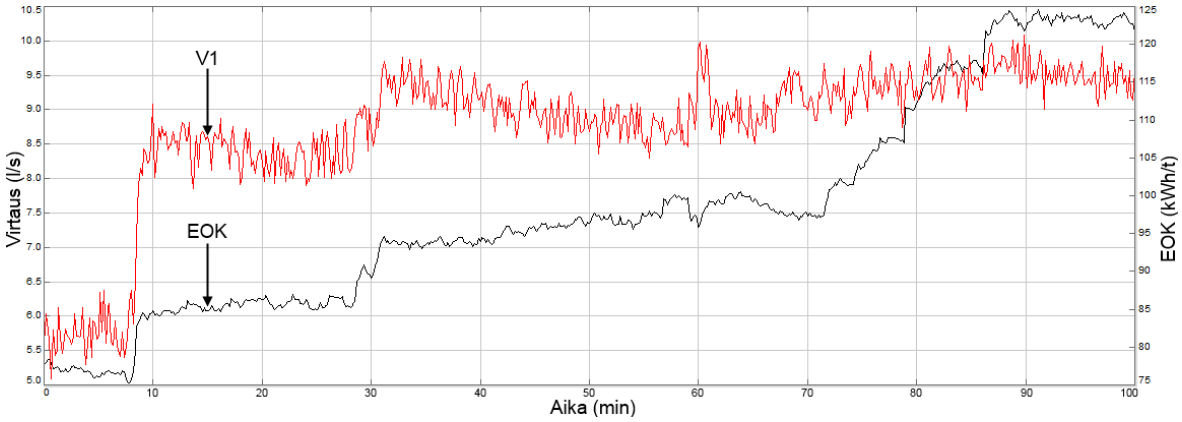
Kaksoiskartiojauhimella suoritettiin kolme ajokoetta, joiden tuloksien perusteella kaksoiskartiojauhimelle luotiin uusi ajotapa kohdepaperikoneen toimintaympäristössä. Ajokokeissa tutkittiin tuotannon aikana säädettävissä olevien jauhatustekijöiden (EOK-taso, massan syöttöpaine ja virtaus) vaikutusta massan kokonaisvirtauksen jakaantumiseen kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueiden välille. Jokaisesta koeajosta tallennettiin mittaustiedot prosessinanalysointijärjestelmään, jonka avulla laskettiin lineaarisen korrelaation korrelaatiokertoimet muutetun jauhatustekijän ja virtauksen jakaantumisen välille. Korrelaatiokertoimista laskettiin korrelaatioiden selitysasteet, joita käytettiin ajokokeiden tuloksien tulkinnan apuna. Ajokokeet toteutettiin normaalin tuotannon aikana siten, että vain tutkittavaa jauhatustekijää muutettiin kerrallaan ja muut jauhatusjärjestelmän jauhatustekijät pidettiin vakiona automaattisen ohjauksen avulla.

Luvun viimeisessä osiossa esitetään ajokokeiden tuloksien perusteella luodun uuden ajotavan vaikutukset massan kokonaisvirtauksen jakaantumiseen eli kaksoiskartiojauhimen toiminnan onnistumiseen. Lisäksi tutkitaan uuden ajotavan vaikutuksia jauhettujen kuitujen rakenteeseen (fibrillaatioaste, kuidun pituus ja sykkyräindeksi) sekä jauhatusjärjestelmän käyttämään jauhatustehoon. Lopuksi arvioidaan lyhyesti kuitujen rakenteen muutoksien vaikutukset valmiin paperin ominaisuuksiin.

8.1 Energian ominaiskulutus -koeajo ja tulokset

Kaksoiskartiojauhimen kuormitusta muutettiin EOK-asetusarvoa nostamalla. Kuitujen liiallisen jauhautumisen estämiseksi ja samanaikaisen paperintuotannon varmistamiseksi jauhatusjärjestelmän kokonaisenergian ominaiskulutus pidettiin normaalilla tuotannon tasolla (110–120 kWh/t) laskemalla samanaikaisesti havupuumassan jauhinlinjan kartiojauhimen EOK-asetusarvoa. Kaksoiskartiojauhimen jauhatustehoa mitattiin jauhimen sähkömoottorista ja jauhimen läpi virtaavan massan kokonaisvirtausta jauhimen jälkeisillä massan annostelun ja takaisinkierrätyksen virtausmittarilla. Kaksoiskartiojauhimen kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen virtausta mitattiin kaksoiskartiojauhimen toisessa syöttöhaarassa sijaitsevalla virtausmittarilla.

Kaksoiskartiojauhimen toteutunut energianominaiskulutus (EOK) laskettiin EOK:n laskentakaavan (5) mukaan massan jauhatustehon, massan virtauksen ja sakeuden avulla. Laskenta suoritettiin kohdepaperikoneen prosessianalysointijärjestelmää (Savcor Wedge) käyttäen. Mitatuista osavirtauksen ja toteutuneen EOK:n arvoista muodostettiin yhdistetty kuvaaja, jossa koeajon mittaustulokset on esitetty ajan suhteen. Koeajossa muutettiin kaksoiskartiojauhimen kuormitustasoa eli EOK-asetusarvoa asteittain aloittaen arvosta 75 kWh/t ja lopettaen arvoon 125 kWh/t. Asetusarvojen välillä pidettiin odotusaikoja jauhettujen kuitujen laatuarvojen seuraamista varten. Koeajon mittaustiheys oli 1/10 s ja mittausaika 100 min. Koeajon aikana prosessianalysointijärjestelmään tallennettiin 600 mittauspistettä, joista muodostettu kuvaaja on esitetty kuvassa 47. Koeajossa mitattiin vain toisen jauhatusalueen osavirtausta, sillä massan kokonaisvirtaus jauhimen läpi pidettiin vakiona, jolloin toisen osavirtauksen muutos tarkoittaa automaattisesti myös toisen osavirtauksen muutosta. Koeajo suoritettiin kokonaisvirtauksella 27 l/s, massan sakeudella 4,1 % ja syöttöpaineella 200kPa.



Kuva 47. Koeajon tulokset, jossa osavirtaus (V1) sekä toteutunut EOK on esitetty ajan suhteen ja osavirtauksen nähdään nousevan EOK:n lisääntyessä.

Koeajossa tallennettujen mittausarvojen välinen lineaarinen korrelaatiokerroin on 0,71, minkä selitysasteeksi muodostuu $0{,}71^2 = 0{,}504$ eli 50 % osavirtauksen muutoksista voidaan selittää EOK:n muutoksien avulla. Osavirtauksen nähdään huojuvan tasaisesti noin 0,5 l/s vaihteluvälillä koko koeajon ajan, mikä osaltaan vaikuttaa muodostuvaan korrelaatiokertoimeen. Kuvan 47 kuvaajista on selkeästi nähtävissä, että osavirtaukseen ja EOK:n välinen korrelaatio on voimakasta aina 95 kWh/t asti, jonka jälkeen osavirtaus ei juurikaan lisäänny EOK:n kasvaessa. Huomattavin muutos osavirtauksen muutos tapahtuu

heti koeajon alussa, jossa toteutunut EOK kohoaa arvon 85 kWh/t lähettyville, minkä seurauksena osavirtaus lisääntyy 2,5 l/s. Seuraavassa 30 min kohdalla tapahtuvassa EOK:n nostossa arvoon 95 kWh/t osavirtaus lisääntyy 1 l/s, jonka jälkeen EOK:n nostamisella ei nähdä olevan vaikutusta osavirtaukseen.

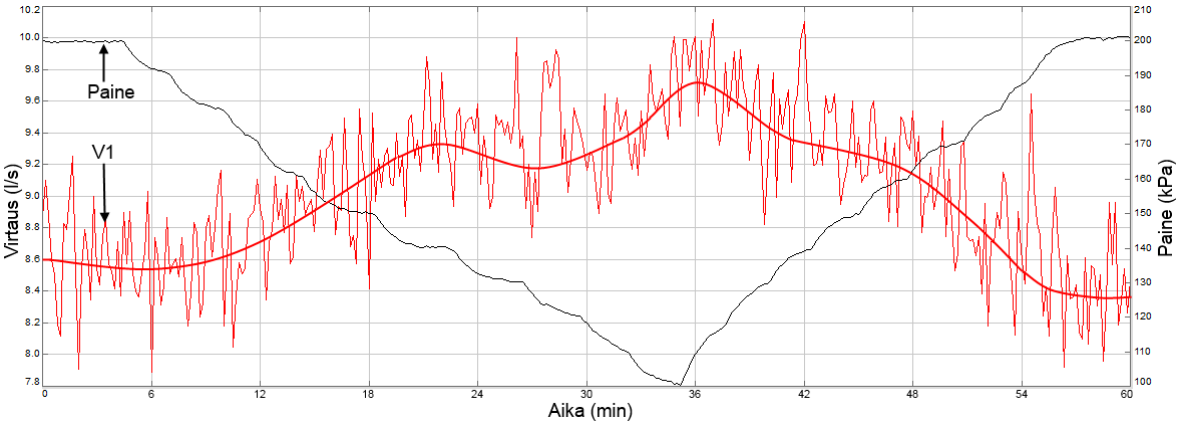
Kaksoiskartiojauhinta kuormitetaan toisen jauhatusalueen staattorin asemaa liikuttamalla. EOK:ta nostettaessa, sakeuden ja kokonaisvirtauksen pysyessä vakiona, jauhin tarvitsee suuremman jauhatustehon korkeamman EOK-tason saavuttamiseksi. Tämän seurauksena jauhin liikuttaa staattorin asemaa kohti roottoria. Seurauksena on liikkuvan staattorin ja roottorin terävälin kaventuminen, mistä seuraa teorian mukaan jauhatusalueen pumppausvaikutuksen voimistuminen. Voimistunut pumppausvaikutus tarkoittaa teorian mukaan suurempaa jauhatusalueen tuottamaa paine-eroa, jonka seurauksena roottoriin kohdistuu suurempi tasapainottava voima. Tällöin roottorin asema liikkuu teorian mukaan kohti kiinteän staattorin omaavaa teräväliä ja jauhatusalueiden väliset jauhatusolosuhteet (terävälit) tasoittuvat, mikä näkyy tässä tutkimuksessa kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen mitattuna 3,5 l/s osavirtauksen kasvuna.

Jauhatuksen kuormituksen ollessa lähtötasolla 75 kWh/t, kaksoiskartiojauhin ei tarvitse riittävästi jauhatustehoa kuormitustason toteuttamiseksi, jotta jauhatusolosuhteet olisivat jauhatusalueiden välillä identtiset kyseisellä massan kokonaisvirtauksella ja sakeudella jauhettaessa. Kuormitusta nostettaessa jauhatusalueiden jauhatusolosuhteet tasoittuvat kuormitukseen 95 kWh/t asti, jonka jälkeen kuormituksen nostaminen eli terävälien kaventaminen ei vaikuta virtauksien jakaantumiseen. Tämän seurauksena voidaan päätellä, että jauhatusalueiden teräväleissä eikä jauhatusalueiden pumppausvaikutuksissa tapahdu huomattavia muutoksia 95 kWh/t jälkeen, vaan jauhatusteho nousee jo maltillisemmalla terävälin muutoksella. Koeajon johtopäätöksenä todetaan, että jauhatuksen kuormituksen nostolla on vaikutus virtauksien jakaantumiseen jauhatusalueiden kesken välillä 75–95kWh/t, jonka jälkeen vaikutus häviää.

8.2 Syöttöpaine -koeajo ja tulokset

Kaksoiskartiojauhimen syöttöpainetta muutettiin syöttöpaineen asetusarvoa muuttamalla. Syöttöpaineen asetusarvoa muutettiin asteittain kohdepaperikoneen normaalista 200 kPa arvosta jauhinvalmistajan asettamaan ehdottomaan alarajaan 100 kPa, jonka jälkeen

syöttöpaine nostettiin takaisin alkuperäiseen asetukseen. Syöttöpainetta mitattiin kaksoiskartiojauhimen syöttöhaarassa sijaitsevan painemittauksen avulla. Lisäksi koeajossa mitattiin kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen virtausta syöttöhaaran virtausmittarilla. Koeajon mittaustiheys oli 1/10s ja mittausaika 60 min. Koeajon aikana prosessinanalysointijärjestelmään tallennettiin 360 mittauspistettä, joista muodostettu kuvaaja on esitetty kuvassa 48. Koeajo suoritettiin massan kokonaisvirtauksella 27 l/s ja sakeudella 4,1 % sekä EOK-tasolla 100 kWh/t.



Kuva 48. Koeajon tulokset, jossa osavirtaus (V1) sekä syöttöpaine on esitetty ajan suhteen ja osavirtauksen trendin nähdään muuttuvan paineen muuttuessa.

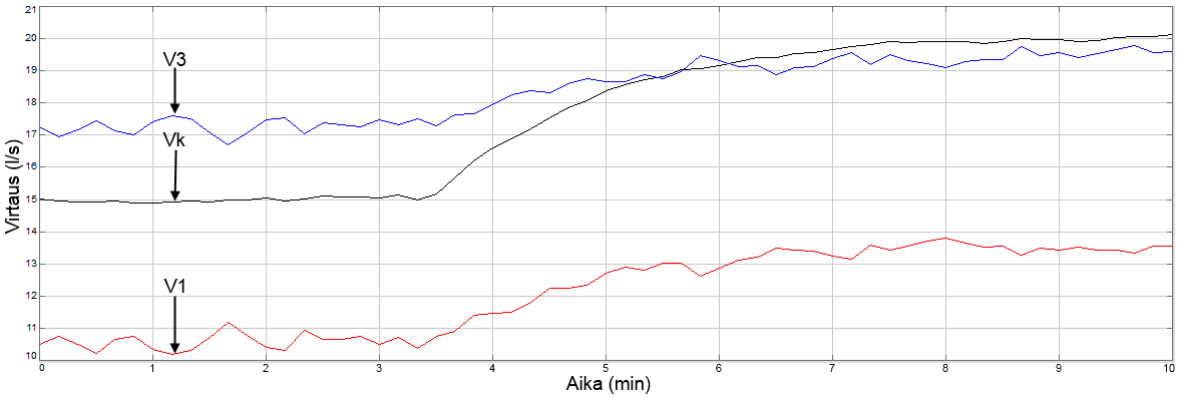
Koeajossa tallennettujen mittausarvojen välinen lineaarinen korrelaatiokerroin on -0,78, minkä selitysasteeksi muodostuu $(-0{,}78)^2 = 0{,}608$ eli 60 % osavirtauksen muutoksista voidaan selittää syöttöpaineen muutoksien avulla. Korrelaatiokertoimen ollessa negatiivinen, huomataan että syöttöpaineen arvon laskiessa osavirtauksen arvo kasvaa ja vastaavasti toisinpäin. Korrelaatiokertoimen perusteella riippuvuutta voidaan pitää voimakkaana.

Kuvasta 48 nähdään, että osavirtaus huojuu voimakkaasti 0,5–1 l/s vaihteluvälillä koko koeajon ajan ja reagoi syöttöpaineen muutoksiin pienellä viiveellä. Viive on nähtävissä käyrien huippukohdista, jotka eivät osu täysin samalle ajanhetkelle. Syöttöpaineen vähentäminen vaikuttaa massan mitattuun osavirtaukseen lisäävästi. Osavirtaus lisääntyy lähtötasosta korkeimmillaan kuitenkin vain 1 l/s, joten muutosta ei voida pitää hyvin merkittävänä. Syöttöpaineen vähentyessä, jauhatusalueen kriittinen halkaisija siirtyy teorian mukaan lähemmäksi jauhatusalueen syöttöyhdettä, jolloin staattorin urissa tapahtuva massan

vastavirtaus lisääntyy. Tällä on teorian mukaan vaikutusta jauhatusalueen pumppausvaikutukseen, mikä muuttaa jauhatusalueella vaikuttavia voimia, joiden seurauksina mitattu osavirtaus muuttuu. Koeajon johtopäätöksenä todetaan, että kaksoiskartiojauhimen syöttöpaineella on vaikutus virtauksien jakaantumiseen jauhatusalueiden kesken, joka on kuitenkin määrällisesti vähäinen (1 l/s).

8.3 Kokonaisvirtaus -koeajo ja tulokset

Kaksoiskartiojauhimen läpi virtaavan massan kokonaisvirtausta muutettiin takaisinkierrätystä lisäämällä. Havupuumassan annosteluvirtaus sekoitustukkiin pidettiin vakiona paperintuotannon varmistamiseksi ja takaisinkierrätyksen virtausta nostettiin 5 l/s. Koeajon aikana mitattiin takaisinkierrätyksen määrää takaisinkierrätysputkistossa sijaitsevalla virtausmittarilla ja kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen virtausta syöttöhaaran virtausmittarilla. Prosessinanalysointijärjestelmän avulla laskettiin liikkuvan staattorin sisältävän jauhatusalueen toteutunut virtaus seuraavasti: sekoitustukkiin annosteltavan annosteluvirtauksen ja takaisinkierrätyksen virtauksen avulla saatiin kokonaisvirtaus kaksoiskartiojauhimen läpi, josta vähennettiin toteutunut mitattu osavirtaus. Koeajossa mittaustiheys oli 1/10s ja mittausaika 10min. Koeajon aikana tallennettiin prosessinanalysointijärjestelmään 60 mittauspistettä, joista muodostettu kuvaaja on esitetty kuvassa 49. Koeajo suoritettiin massan syöttöpaineella 130kPa ja sakeudella 4,1 % sekä EOK-tasolla 100 kWh/t.



Kuva 49. Koeajon tulokset, jossa liikkuvan staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtaus (V3) ja kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtaus (V1) sekä takaisinkierrätyksen virtaus (Vk) on esitetty ajan suhteen. Kuvasta nähdään jauhatusalueiden osavirtauksien lisääntyvän takaisinkierrätyksen virtauksen lisääntyessä.

Koeajossa tallennettujen mittausarvojen lineaarinen korrelaatio liikkuvan staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtauksen ja takaisinkierrätyksen virtauksen välillä on 0,98, minkä selitysasteeksi muodostuu $0{,}98^2 = 0{,}960$ eli 96 %. Kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtauksen ja takaisinkierrätyksen virtauksen välillä lineaarinen korrelaatio on 0,99, minkä selitysasteeksi muodostuu $0{,}99^2 = 0{,}980$ eli 98 %. Selitysasteiden perusteella voidaan sanoa, että käytännössä lähes kaikki osavirtauksissa tapahtuvat muutokset voidaan selittää takaisinkierrätyksen muutoksen avulla. Korrelaatiokertoimien perusteella osavirtauksien ja takaisinkierrätyksen virtauksen välillä vallitsee lähes täydellinen lineaarinen riippuvuus.

Kuvasta 49 nähdään, että takaisinkierrätyksen lisääntyessä molemmat osavirtaukset lisääntyvät. Osavirtauksien muutos on tasaista ja selvästi nähtävissä koko takaisinkierrätyksen lisäämisen ajan. Jauhettavan massan virtausta lisätään koeajossa kokonaisuudessaan 5 l/s, mikä jakaantuu kuvan 49 mukaan siten, että liikkuvan staattorin sisältävän jauhatusalueen virtaus nousee 2 l/s ja kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen virtaus 3 l/s. Tämä tarkoittaa että, kaksoiskartiojauhimen läpi virtaavan massan virtausmuutoksesta 60 % ohjautuu kiinteän staattorin sisältävälle jauhatusalueelle ja 40 % liikkuvan staattorin sisältävälle jauhatusalueelle. Kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtauksen ollessa kohdepaperikoneella jatkuvasti liikkuvan staattorin jauhatusalueen osavirtausta matalampi, voidaan koeajon johtopäätöksenä todeta, että kaksoiskartiojauhimen läpi virtaavan massan kokonaisvirtauksella on positiivinen vaikutus virtauksen jakaantumiseen jauhatusalueiden kesken.

8.4 Kaksoiskartiojauhimen uusi ajotapa

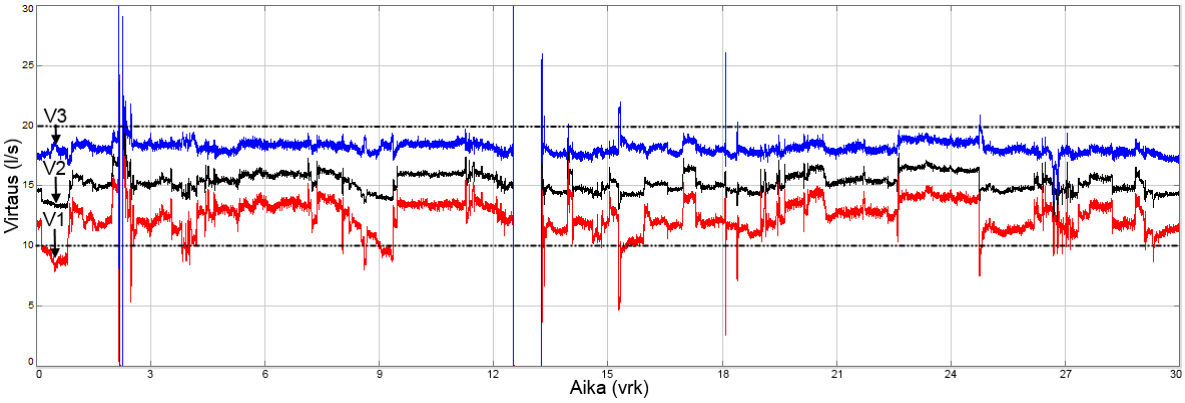
Kaksoiskartiojauhimen koeajoista saatujen tuloksien perusteella kaksoiskartiojauhimelle luotiin uusi ajotapa, jolla tavoiteltiin parempaa ja tasaisempaa kaksoiskartiojauhimen jauhatustapahtuman onnistumista eli symmetrisempää massan kokonaisvirtauksen jakaantumista jauhatusalueiden osavirtauksiin. Jauhatusjärjestelmän jauhatustekijöistä muutettiin jauhimien EOK-asetusarvoja ja massan syöttöpainetta sekä massan takaisinkierrätyksen virtausta. Muut jauhatustekijät, kuten massan sakeus, jauhimien pyörimisnopeudet ja jauhinterät pidettiin alkuperäisenä. Kaksoiskartiojauhimen alkuperäisen ja uuden ajotavan välillä muuttuneet jauhatustekijät on taulukoitu taulukkoon 6.

Taulukko 6. Kaksoiskartiojauhimen ajotavat.

Jauhatustekijä	**Alkup. ajotapa**	**Uusi ajotapa**
EOK-asetus [kWh/t]	72–77	105–110
Syöttöpaine [kPa]	200	130
Takaisinkierrätys [l/s]	15	18

Kaksoiskartiojauhimen energian ominaiskulutus (EOK) -koeajon seurauksena jauhatusjärjestelmän jauhimien kuormitusjakoa muutettiin siten, että uudessa ajotavassa havupuumassa käsitellään pelkällä kaksoiskartiojauhimella eli jauhinlinjan molemmat tavalliset kartiojauhimet ovat ohituksella ja pysähdyksissä. Tämän seurauksena kaksoiskartiojauhimen kuormitustaso on samalla tasolla kuin alkuperäisessä ajotavassa oli koko jauhinlinjan kokonaiskuormitustaso. Syöttöpaine -koeajon seurauksena massan syöttöpaine laskettiin arvoon 130kPa. Syöttöpainetta ei laskettu aivan koeajossa olleen alueen alapäähän, sillä kaksoiskartiojauhimen toimittajan mukaan toimintavarmuuden säilyttämiseksi ehdoton minimi syöttöpaineelle on 100kPa. Kohdepaperikoneen jauhinlinjassa voi esiintyä poikkeustilanteissa pieniä paineheittoja, jolloin jatkuva operointi minimisyöttöpaineella ei ole toiminnan kannalta turvallista. Kaksoiskartiojauhimen EOK-asetusarvon ja syöttöpaineen muutoksen avulla saavutetun virtauksien paremman jakautumisen seurauksena myös takaisinkierrätyksen virtausta nostettiin 3 l/s, jotta molemmille jauhatusalueille varmistettiin riittävä jauhettavan massan määrä.

Kaksoiskartiojauhimen virtaukset uudella ajotavalla on esitetty kuvaajan muodossa kuvassa 50, jossa virtauksia on mitattu kuukauden ajojaksolla. Kuvaajassa sininen käyrä (V3) kuvaa liikkuvan staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtausta, musta käyrä (V2) tavoiteltua osavirtausta ja punainen käyrä (V1) kiinteän staattorin sisältävän jauhatusalueen osavirtausta. Kolmenkymmenen vuorokauden ajojaksolta on kerätty 43200 mittauspistettä, mittaustiheyden ollessa 1/min.



Kuva 50. Kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueiden toteutuneet osavirtaukset (V3 ja V1) ja tavoiteltu osavirtaus (V2) esitettynä ajan suhteen, jossa huomioitavaa on toteutuneiden osavirtauksien (V3 ja V1) alle 10 l/s poikkeama toisistaan (vrt. kuva 39). 10 l/s alueen mittaviivat on havainnollistettu kuvaan katkoviivoin.

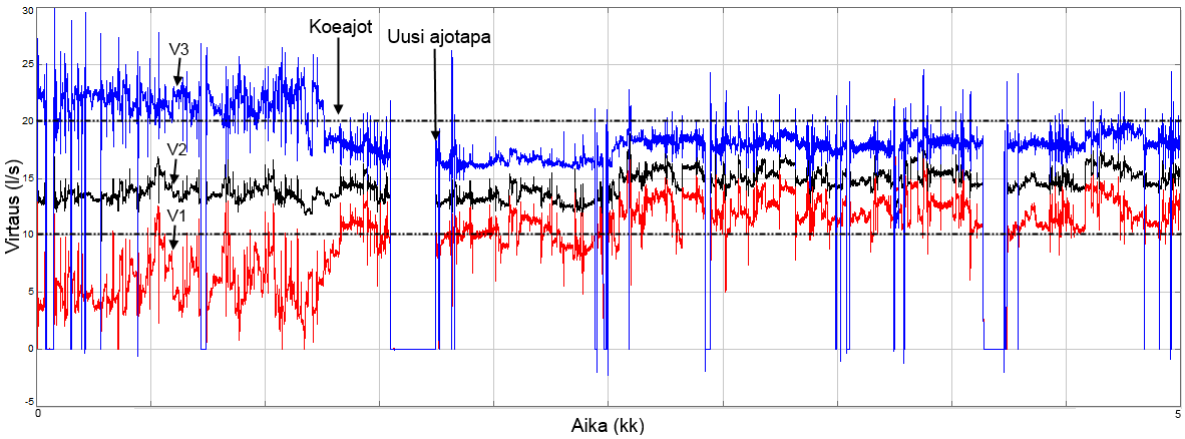
Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että jauhatusalueiden osavirtauksien jakautuminen on parantunut huomattavasti, sillä osavirtaukset ovat mittavirhepiikkejä lukuunottamatta alle 10 l/s sisällä toisistaan koko ajojakson ajan. Tämän seurauksena kaksoiskartiojauhimen molempien jauhatusalueiden jauhatuskapasiteetti on käytössä, mikä mahdollistaa jauhimen toimisen jauhinlinjan ainoana jauhimena. Keskiarvollisesti mittausjakson aikana osavirtaus V3 on 17,62 ±3,05 l/s, tavoiteltu osavirtaus V2 on 14,82 ±2,64 l/s ja osavirtaus V1 on 12,02 ±2,45 l/s. Kokonaisvirtaus jauhimen läpi on keskiarvollisesti 29,64 ±5,28 l/s, joten liikkuvan staattorin jauhatusalueella käsitellään 59 % jauhettavasta massasta ja vastaavasti kiinteän staattorin jauhatusalueella 41 % massasta. Toteutuneet kaksoiskartiojauhimen kokonaisvirtaukset ja osavirtaukset on taulukoitu taulukkoon 7, jossa vertailuarvoina ovat kappaleessa 6 esitellyn vastaavan ennen ajotapamuutosta ajetun ajojakson virtaukset.

Taulukko 7. Kaksoiskartiojauhimen keskiarvolliset virtaukset.

Virtaus [l/s]	**Alkup. ajotapa**	**Uusi ajotapa**
Kokonaisvirtaus	26,54 ±5,10	29,64 ±5,28
Tavoiteltu osavirtaus V2	13,27 ±2,55	14,82 ±2,64
Osavirtaus V1	5,55 ±2,39	12,02 ±2,45
Osavirtaus V3	21,00 ±4,03	17,62 ±3,05

Kolmenkymmenen vuorokauden ajojaksoon perustuen ennen ajotapamuutosta 79 % jauhettavasta massasta käsiteltiin liikkuvan staattorin sisältävällä jauhatusalueella ja vastaavasti kiinteän staattorin jauhatusalueella 21 % massasta. Uudella ajotavalla massan osavirtaukset jakautuvat 40 % paremmin jauhatusalueiden välillä, mutta eivät kuitenkaan täysin identtisesti. Uuden ajotavan mukaiset virtauserot ovat todennäköisesti peräisin jauhatusalueiden erilaisista pumppausominaisuuksista, sillä kaksoiskartiojauhimen sisältämiä teriä on kuormitettu toispuoleisesti alkuperäisellä ajotavalla, joten liikkuvan staattorin sisältävän jauhatusalueen terät ovat kuluneemmat kuin toisen jauhatusalueen terät. Tällöin jauhatusalueiden jauhatusolosuhteet ovat säädettävistä jauhatustekijöistä riippumatta erilaiset jauhatusalueiden välillä, jolloin virtauksien epätasaista jakautumista esiintyy edelleen.

Virtauksien jakaantuminen viiden kuukauden ajalta on esitettu kuvassa 51, jossa mittaustiheytenä on 1/10min. Kuvaan on merkattu koeajojen suoritusajankohta ja ajankohta, jolloin uusi ajotapa otettiin käyttöön. Viiden kuukauden aikana kaksoiskartiojauhimen teriä ei ole vaihdettu ja jauhatusjärjestelmän muut tekijät on pidetty vakiona.



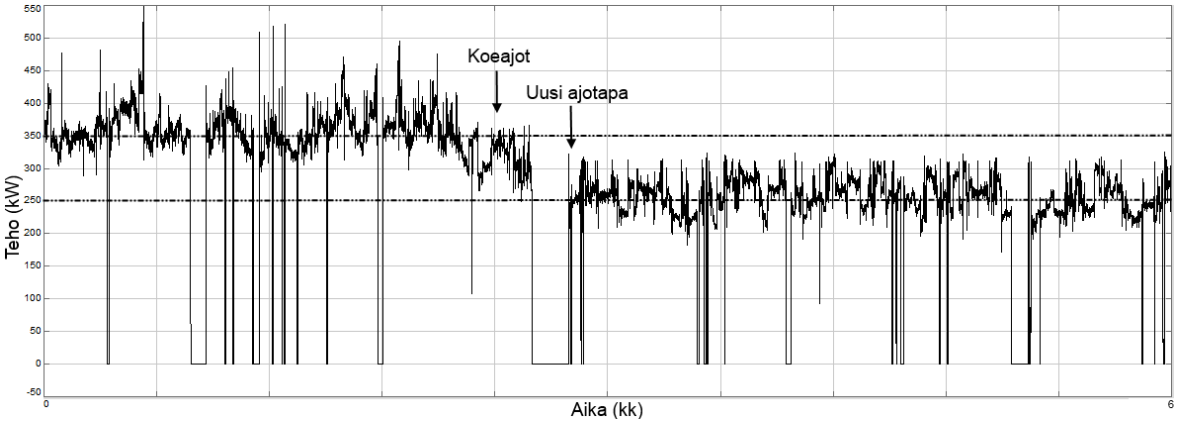
Kuva 51. Kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueiden toteutuneet osavirtaukset (V3 ja V1) ja tavoiteltu osavirtaus (V2) esitettynä ajan suhteen. Koeajot ja uuden ajotavan käyttöönottoajankohta on merkattu kuvaan nuolilla. 10 l/s alueen mittaviivat on havainnollistettu kuvaan katkoviivoin.

Kuvan 51 perusteella voidaan kiistatta sanoa kaksoiskartiojauhimen toiminnan parantuneen havupuumassan jauhatuksessa kohdepaperikoneella. Ennen koeajojen suorittamista massan kokonaisvirtaus jakaantui epätasaisesti jauhatusalueiden kesken, mutta koeajojen

suorittamisen jälkeen tapahtunut kaksoiskartiojauhimen EOK-tason nosto ja lopullinen ajotavan muutos paransi virtausjakaumaa. Optimaalista eli täysin poikkeamatonta virtausjakaumaa ei todennäköisesti voida kohdepaperikoneella saavuttaa, ennen seuraavaa jauhimen terien vaihtoa, jolloin uusien terien kuormittaminen aloitetaan uudella ajotavalla ja jauhatusalueiden olosuhteet ovat alusta alkaen identtiset.

8.4.1 Vaikutukset jauhatusjärjestelmän energiankulutukseen

Kaksoiskartiojauhimen uuden ajotavan vaikutus jauhatusjärjestelmän tehonkulutukseen on esitetty kuvaajan avulla kuvassa 52, jossa ei ole huomioitu jauhinlinjan syöttöpumpun tehonkulutusta. Tehonkulutus on mitattu jauhinlinjan jauhimien sähkömoottoreista ja kerätty prosessinanalysointijärjestelmään, jonka avulla kuvaaja on muodostettu. Mittausjakson pituus on 6 kk ja mittaustiheys 1/min.

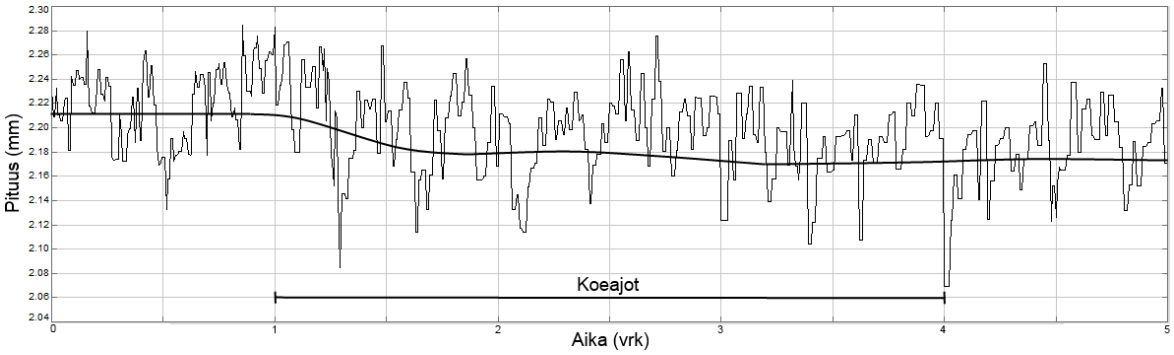


Kuva 52. Jauhatusjärjestelmän jauhimien jauhatusteho esitettynä ajan suhteen, jossa koeajojen ja uuden ajotavan käyttöönottoajankohta on merkattu nuolilla.

Kuvasta 52 nähdään, että jauhatusjärjestelmän jauhatusteho on vähentynyt jo koeajojen suorittamisen aikana, jolloin kaksoiskartiojauhimen EOK-tasoa nostettiin ja tavallisen kartiojauhimen EOK-tasoa laskettiin. Uuden kaksoiskartiojauhimen ajotavan käyttöönottohetkellä jauhinlinjan tavallinen kartiojauhin ohitettiin ja pysäytettiin, jolloin jauhatusteho vähenee vähintään kartiojauhimen häviötehon verran. Keskiarvollisesti jauhatusteho on ennen koeajoja 332,5 ±98,07 kW ja uudella ajotavalla 239,9 ±66,53 kW. Tämä tuotannon pysäytykset huomioimaton jauhatustehon väheneminen (92,6 kW) tarkoittaa vuositasolla 811,2 MWh vähemmän havupuumassan jauhatukseen käytettyä sähköenergiaa, mikäli paperikoneen käyntiasteeksi kuvitellaan 100 %.

8.4.2 Vaikutukset kuitujen ominaisuuksiin

Kaksoiskartiojauhimen ajokokeet suoritettiin kolmen vuorokauden aikana siten, että muut kuin koeajoissa muuttuvat jauhatusjärjestelmän jauhatustekijät pyrittiin pitämään mahdollisimman vakioina. Tällöin jauhatusolosuhteet pysyivät samana koko koeajo -jakson ajan. Koeajojen tuloksien perusteella luotu kaksoiskartiojauhimen uusi ajotapa muodostui suoraan koeajojen jälkeen, mikä viimeisteltiin pysäyttämällä ja ohittamalla havupuumassan jauhinlinjan kartiojauhin seuraavassa paperintuotannon pysäytyksessä. Koeajojen vaikutus kuitujen jauhautuneisuuteen on esitetty seuraavien kuvaajien avulla, joissa jokaisesta mitattavasta kuidun ominaisuudesta (kuidun pituus, sykkyräindeksi ja fibrilloitumisaste) on kerätty mittaustietoa kohdepaperikoneen jatkuvatoimisen optisen mittalaitteen sisältävän massa-analysaattorin avulla. Mittausjakson pituus on jokaisen mitatun kuidun ominaisuuden kohdalla viisi vuorokautta ja mittaustiheys 1/min. Kuidun pituuden muutosta arvioidaan jauhettujen kuitujen pituuspainotetun keskiarvon avulla. Jauhetuista kuiduista otetut pituuden mittaustulokset on esitetty kuvaajan avulla kuvassa 53, jossa koeajojen aloitus- ja lopetusajankohta on havainnollistettu suoran avulla

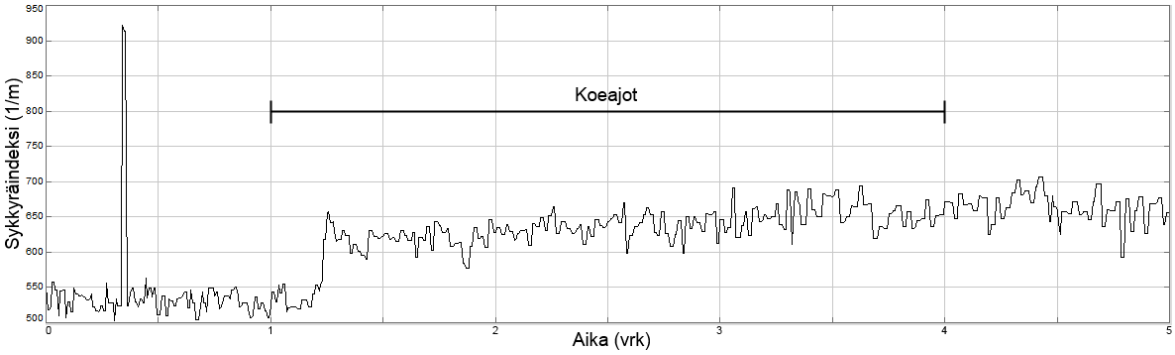


Kuva 53. Kaksoiskartiojauhimen uuden ajotavan vaikutukset jauhettavan havupuumassan kuidun pituuteen ajan suhteen esitettynä, jossa pituuden trendin nähdään laskevan koeajojen aikana.

Kuvasta 53 nähdään, että koeajoilla on kuidun pituutta lievästi pienentävä (0,03 mm) vaikutus, mikä on todennäköisesti seurausta koeajojen aikana lisääntyneestä (32 kWh/t) jauhatuksen kuormitustasosta eli EOK-tasosta. Teorian mukaan korkeammalla kuormituksella jauhettaessa kuidut joutuvat suurempien jauhatusvoimien rasittamiksi, jolloin kuidun katkeilu voi lisääntyä. Massa-analysaattorin mittaustulokset heittelevät mittauspisteiden välillä suurimmillaan 0,08 mm, joten tarkkaa pituuden muutosta on

mahdotonta sanoa. Esitettyä kuidun pituuden muutosta voidaan kuitenkin pitää käytännössä merkityksettömänä, sillä mittausjakson aikaisen pituudenvaihtelun nähdään olevan alle 0,1 mm (tavallinen pituudenvaihtelu kohdepaperikoneella), eikä selvää pituuden romahtamista tai kasvamista ole mittaustuloksista nähtävissä.

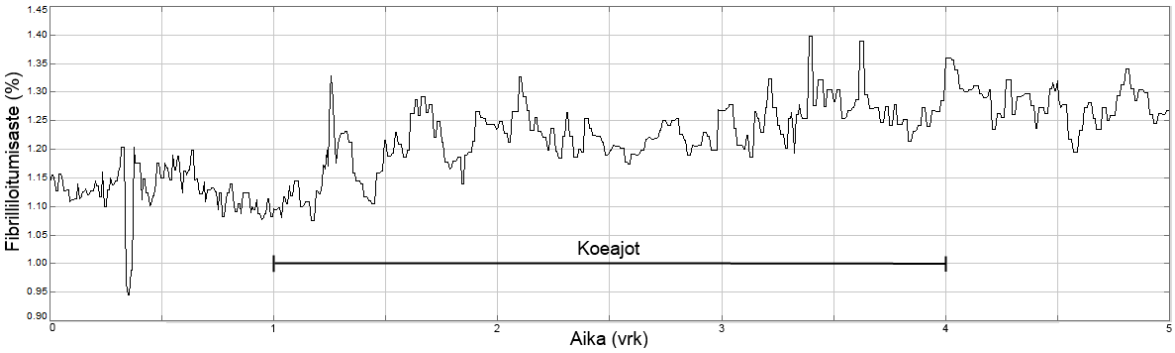
Kuitujen suoruuden muutosta arvioidaan sykkyräindeksin (kink index) avulla. Sykkyräindeksi kertoo näytteessä olevien kulmien lukumäärän suhteessa kuitujen kokonaispituuteen (1/m) eli kuinka tehokkaasti jauhatus suoristaa kuituja. Jauhetuista kuiduista otetut sykkyräindeksin mittaustulokset on esitetty kuvaajan avulla kuvassa 54, jossa koeajojen aloitus- ja lopetusajankohta on havainnollistettu suoran avulla.



Kuva 54. Kaksoiskartiojauhimen uuden ajotavan vaikutukset jauhettavan havupuumassan suoruuteen ajan suhteen esitettynä, jossa sykkyräindeksin nähdään kasvavan koeajojen aikana.

Kuvasta 54 nähdään, että jauhatuksen kyky suoristaa kuitujen taitoksia ja kulmia heikkenee koeajojen alkaessa tai vastaavasti kuitujen sykkyröityminen lisääntyy koeajojen alkaessa. Tuloksissa nähdään yksi yksittäinen selvä sykkyräindeksin kohoaminen, jonka jälkeen indeksi kasvaa tasaisesti koeajojen loppuun asti, jolloin kuiduissa esiintyy noin 125 kulmaa metrille enemmän kuin koeajojen alkaessa. Kuitujen suoristuminen tapahtuu teorian mukaan terävälissä vaikuttavien kuitua venyttävien jauhatusvoimien seurauksena. Koeajojen seurauksena kaksoiskartiojauhimen kuormitus tasoittuu molemmille jauhatusalueille, jolloin jauhatuksen luonne (jauhatusintensiteetti) muuttuu, minkä seurauksena yksittäiseen kuituun kohdistuvat jauhatusvoimat muuttuvat ja jauhetun kuidun sykkyröityneisyydessä havaitaan mitattu muutos.

Kuitujen ulkoista fibrillaatiota ja hienoaineiden syntymisen määrää arvioidaan fibrilloitumisasteen avulla. Jauhetuista kuiduista mitatut fibrilloitumisasteen mittaustulokset on esitetty kuvaajan avulla kuvassa 55, jossa koeajojen aloitus- ja lopetusajankohta on havainnollistettu suoran avulla.



Kuva 55. Kaksoiskartiojauhimen uuden ajotavan vaikutukset jauhettavan havupuumassan fibrilloitumisasteeseen ajan suhteen esitettynä, jossa fibrillaatioasteen nähdään kasvavan koeajojen aikana.

Kuvasta 55 nähdään, että fibrilloitumisaste lisääntyy koeajojen edetessä noin 0,15 % eli jauhettavien kuitujen ulkopinnat löystyvät enemmän ja kuidut halkeavat muodostaen hieman enemmän hienoaineita kuin alkuperäisellä ajotavalla. Fibrilloitumisaste muuttuu teorian mukaan jauhatusvoimien muuttuessa. Koeajojen aikana nostettu jauhatuksen kuormitus vaikuttaa jauhatusalueilla vaikuttaviin jauhatusvoimiin, mikä näkyy mitattuna fibrilloitumisasteen muutoksena. Toisaalta fibrilloitumisasteen koeajojen aikainen muutos voi olla seurausta syöttöpaineen laskun seurauksena tapahtuvasta kriittisen halkaisijan laskusta, jolloin teorian mukaan yksittäisen kuidun todennäköinen jauhautuminen kasvaa.

Kokonaisuudessaan kaksoiskartiojauhimen uuden ajotavan vaikutuksia jauhettujen kuitujen ominaisuuksiin voidaan kuitenkin pitää pieninä, sillä koeajon aikana tuotannossa olleen paperin laatuominaisuuksissa ei havaittu koeajo -jakson aikana merkittäviä muutoksia. Paperin optiset ominaisuudet (opasiteetti, vaaleus ja kiilto) ja rakenteelliset ominaisuudet (formaatio, bulkki, pinnankarheus) pysyivät tavallisella tasolla. Paperin lujuusominaisuuksissa ainoastaan repäisylujuudessa havaittiin paranemista, mikä voi olla seurausta parantuneen fibrilloitumisasteen tarjoamasta kuitujen sidostenmuodostuskyvyn kasvusta ja sykkyräisten kuitujen paremmista venymisominaisuuksista. Valmistettavan

paperin kaupallisuudesta johtuen mitattuja paperin ominaisuuksia ei tässä tutkimuksessa esitetä, vaan kaksoiskartiojauhimen uuden ajotavan katsotaan onnistuneen parantuneen massan virtausjakauman sekä jauhettujen kuitujen ominaisuuksissa tapahtuneiden maltillisten muutoksien ja saavutetun jauhatusjärjestelmän energiasäästön perusteella.

9 YHTEENVETO

Havupuumassan jauhatus on yksi paperin valmistuksen päälähtökohdista, sillä ilman jauhatusta paperin perusraaka-aineena käytettävien havupuukuituja sisältävän havupuumassan ominaisuudet ovat usein riittämättömät halutun laadun omaavan paperin valmistukseen. Havupuumassan jauhatuksen päätavoitteena on havumassan sisältämien havupuukuitujen sidostenmuodostuskyvyn parantaminen, mikä parantaa valmistettavan paperin lujuusominaisuuksia. Sidostenmuodostuskykyä parannetaan jauhamalla kuituja mekaanisesti metallisten jauhinterien välissä, jolloin jauhettaviin kuituihin kohdistuu erilaisia kuituja rasittavia voimia. Rasittavien voimien seurauksena kuitujen kemiallisessa ja fysikaalisessa rakenteessa tapahtuu muutoksia, joita voidaan mitata laboratoriomittausten tai nykyaikaisten jatkuvatoimisten optisten mittalaitteiden avulla. Kemialliset ja fysikaaliset rakenteen muutokset joko parantavat tai heikentävät kuitujen ominaisuuksia, kuten sidostenmuodostamiskykyä ja suotautuvuutta. Paperin valmistusprosessin monimutkaisuudesta johtuen kuitujen rakenteen muutoksien vaikutukset valmistettavan paperin ominaisuuksiin eivät kuitenkaan ole yksiselitteisesti esitettävissä.

Havupuumassan jauhatus tapahtuu paperikoneen jauhatusjärjestelmän avulla, mikä voi koostua jauhettavan massan laadusta, halutusta jauhatustavasta ja tarvittavasta jauhatuskapasiteetista riippuen erilaisista jauhinvariaatioista. Uudemmilla paperikoneilla on suosittu erilliset massakohtaiset jauhinlinjat sisältävää jauhatusjärjestelmää, jolla saavutetaan parempi massakohtainen jauhatuslaatu ja voidaan siten vaikuttaa tarkemmin valmistettavan paperin ominaisuuksiin. Jauhatusjärjestelmät sisältävät vaihtelevan määrän sarjaankytkettyjä erilaisia jauhintyyppejä, joiden valintaan vaikuttavat yllä mainitut tekijät. Yleisimmät jauhintyypit eroavat toisistaan toimintaperiaatteeltaan ja rakenteeltaan, mutta niiden pääsääntöinen tarkoitus on jauhintyypistä riippumatta jauhettavien kuitujen muokkaaminen metallisten jauhinterien avulla. Jauhinterien teräkuviointi määrittää kuinka jauhatusrasitukset välittyvät jauhettaviin kuituihin, joten teräkuviointi on avain-asemassa kuitujen rakenteen muutoksien eli saavutetun jauhatustuloksen kannalta. Lisäksi teräkuvioinnilla on vaikutusta jauhimen virtauksen käsittelyominaisuuksiin eli jauhimen pumppausominaisuuksiin sekä jauhinterien kulutuskestävyyden kautta jauhimen toimintavarmuuteen.

Tutkimuksessa tutkitun harvinaisemman rinnakkaiset jauhatusalueet sisältävän kaksoiskartiojauhimen toimintaperiaate on hyvin samankaltainen kuin perinteisen kaksoislevyjauhimen. Toimintaperiaate perustuu jauhatusalueiden välissä pyörivän kelluvan roottorin toimintaan, mikä tasapainottuu jauhatusalueilla muodostuvien pumppausvaikutuksesta syntyvien tasapainottavien voimien seurauksena. Jauhatusalueet ovat rakenteeltaan samanlaiset kun perinteisen kartiojauhimen jauhatusalue, jossa teräväli muodostuu kartiomaisten terien teräparin väliin. Kartiomaisen teräparin seurauksena kaksoiskartiojauhimesta on saatu perinteistä kaksoislevyjauhinta energiatehokkaampi. Kaksoiskartiojauhimen toimintaperiaatteen ja kahden jauhatusalueen sisältävän rakenteen seurauksena sen kuormituksen säätäminen on kuitenkin yksinkertaista perinteistä kartiojauhinta haastavampaa, sillä vain toisen jauhatusalueen teräparin teräväliä voidaan säätää sähkömekaanisesti, jolloin toisen jauhatusalueen teräparin teräväli säätyy muuttuvien jauhatusvoimien vaikutuksesta. Tämän seurauksena kaksoiskartiojauhin on perinteistä yhden jauhatusalueen sisältävää jauhinta tarkempi vallitsevien jauhatusolosuhteiden ja jauhinterien suhteen, jotta jauhatustapahtuma onnistuu eli massa jakaantuu tasaisesti kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueiden kesken.

Tutkittavalla kohdepaperikoneella kaksoiskartiojauhin sisältyy jauhatusjärjestelmän erillisenä toimivaan takaisinkierrätyksen sisältävään havupuumassan jauhinlinjaan, mikä muodostuu kaksoiskartiojauhimen lisäksi kahdesta perinteisestä kartiojauhimesta, joista toinen on ohitettu vara-jauhimeksi kaksoiskartiojauhimen asentamisen jälkeen. Havupuumassan jauhinlinjalla on saavutettu riittävät muutokset havupuukuitujen rakenteeseen, jotta halutut ominaisuudet omaavan paperin valmistaminen on kohdepaperikoneella mahdollista. Kaksoiskartiojauhimen toiminnassa on havaittu kahdentyyppisiä ongelmia, joita ovat jauhettavan massan epätasainen jakautuminen kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueiden kesken sekä vain toisen kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueen teräparissa havaitut jatkuvat terävauriot, joiden on katsottu olevan peräisin terien fyysisestä teräkosketuksesta. Jauhettavan massan epätasainen jakautuminen on osoitettu jauhatusalueiden osavirtauksia mittaamalla ja terävauriot vanhoja jauhinteriä valokuvaamalla.

Kaksoiskartiojauhimen toiminnassa havaittujen ongelmien selvittämiseksi tutkittiin kaksoiskartiojauhimen pysäytys- ja käynnistysvaihetta sekä suoritettiin koeajoja

säädettävissä olevia jauhatustekijöitä muuttaen. Pysäytys- ja käynnistysvaihetta tutkimalla löydettiin mahdollisia fyysisiä teräkosketuksia kaksoiskartiojauhimen käynnistysvaiheesta, johon tehtiin muutoksia tutkimuksen tuloksien perusteella. Tehtyjen muutoksien tulokset ovat kuitenkin kiistatta osoitettavissa vasta seuraavan kaksoiskartiojauhimen terien vaihdon yhteydessä. Suoritettujen koeajojen avulla tutkittiin säädettävissä olevien jauhatustekijöiden vaikutusta kaksoiskartiojauhimen jauhatusalueiden väliseen epätasaiseen virtausjakaumaan. Koeajojen tuloksena saatiin säädettävien jauhatustekijöiden vaikutukset jauhatusalueiden väliseen virtausjakaumaan, joiden perusteella kaksoiskartiojauhimen ajotapaa muutettiin kohdepaperikoneella. Ajotavan muutoksen seurauksena kaksoiskartiojauhimen jauhatustapahtuman onnistuminen parantui eli jauhatusalueiden välinen epätasainen virtausjakauma väheni huomattavasti. Lisäksi kaksoiskartiojauhimen uudella ajotavalla saavutettiin vähintään perinteisen kartiojauhimen häviötehon verran säästöjä jauhatusjärjestelmän sähköenergiankulutuksessa.

Tutkimuksen johdannossa esitettiin kaksi tutkimuskysymystä, joiden ratkaisemiseksi tutkittiin kohdepaperikoneelle investoitua kaksoiskartiojauhinta. Tutkimuskysymysten vastaukset rakentuivat pääosin tutkimuksen kokeellisen osuuden perusteella ja tarvittavat toimenpiteet kaksoiskartiojauhimen toiminnan parantamiseksi suoritettiin kohdepaperikoneen toimintaympäristössä tutkimuksen edetessä.

1) Mitkä jauhatustekijät vaikuttavat kaksoiskartiojauhimen jauhatustapahtuman onnistumiseen?

Tärkein tuotannon aikana säädettävissä oleva kaksoiskartiojauhimen jauhatustapahtuman onnistumiseen vaikuttava jauhatustekijä on jauhatuksen kuormitustaso eli EOK-taso, jonka kasvaessa saavutetaan selvä jauhatustapahtuman onnistumisen paraneminen. Myös massan syöttöpaineella ja kokonaisvirtauksen määrällä on vaikutus jauhatustapahtuman onnistumiseen, näiden jauhatustekijöiden kohdalla vaikutus on kuitenkin jauhatuksen kuormitustason vaikutukseen verrattaen vähäinen. Teorian mukaan jauhatustapahtuman onnistuminen on riippuvainen myös jauhinterien terägeometrioista ja massan sakeudesta sekä kaksoiskartiojauhimen rakenteen aiheuttamista roottorin tasapainottumista vastustavista kitkavoimista. Lisäksi jauhinterien kunto vaikuttaa jauhatusalueelle muodostuvaan pumppausvaikutukseen ja täten myös jauhatustapahtuman onnistumiseen.

2) Miten jauhimen pysäytys- ja käynnistysvaiheita voidaan muuttaa, jotta mahdollisilta fyysisten teräkosketuksen aiheuttamilta terävaurioilta vältytään?

Kaksoiskartiojauhimen pysäytysvaiheesta ei löydetty ajankohtia, jolloin terien fyysinen teräkosketus olisi mahdollinen, sillä pysäytysvaiheessa jauhinterät aukaistaan ennen havumassan syöttöpumpun pysäyttämistä, jolloin kaksoiskartiojauhimen siirtyessä vesikuormalle terien keskinäinen sijainti on riittävän kaukana toisistaan. Käynnistysvaiheessa on oleellista, että teriä ei ajeta kiinni ennen kuin jauhimen terävälit ovat täyttyneet riittävän sakeuden omaavalla jauhettavalla massalla eli kaksoiskartiojauhimen käynnistysvaihetta ei voida suorittaa kuten tavallisen kartiojauhimen kohdalla. Tämän seurauksena kaksoiskartiojauhimen käynnistysvaiheen terien kiinniajo -käskyn sisältämää terien ohjelmallista kiinnirajaa sekä jauhimen tehosäädöllä tavoittelemaa jauhatustehon arvoa muutettiin siten, että jauhinterät pysyvät riittävän kaukana toisistaan myös näiden käskyjen jälkeen. Muutoksien seurauksena kaksoiskartiojauhin säätää terien asemia lähemmäksi toisiaan vasta EOK-säädöllä, jolloin havumassan syöttöpumppu on jo käynnissä. Fyysisten teräkosketusten tarkempi tutkiminen vaatii kohdepaperikoneen mittausjärjestelmän päivittämistä sekä investointia kaksoiskartiojauhimeen asennettaviin tärinämittareihin.

Tutkimuksen aikana tunnistettiin jatkotutkimuskohteita muun muassa kaksoiskartiojauhimen jauhinterien terägeometrioita koskien. Terägeometrioiden dimensioiden huomattiin poikkeavan merkittävästi kirjallisuudesta löytyvistä tyypillisistä terägeometrioiden dimensioista, jolloin kohdepaperikoneella olisi hyvä tutkia terägeometrioiden vaikutukset jauhetun massan laatutekijöihin. Jauhetun massan laatutekijöiden kautta voitaisiin parantaa paperikoneelta valmistuvan paperin laatuominaisuuksia, mikä luo kilpailuetua ja lisää paperin loppukäyttöä. Massan laatutekijöiden tutkimisen jälkeen olisi hyvä tarkastella kohdepaperikoneella käytössä olevan jatkuvatoimisen massa-analysaattorin hyödyntämismahdollisuudet jauhatuksen ohjauksessa.

LÄHTEET

Aikawa Fiber Technologies. 2001. Introduction to Stock Prep [verkkodokumentti]. Päivitetty 6/2013. [Viitattu 22.2.2016]. 63 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.aikawagroup.com/downloads/Training_Manual.pdf

Aikawa Iron Works. 2008. Double confiner model ADC-26. Toimintakäsikirja. 45 s.

Batchelor, W., Lundin, T. & Fardim, P. 2006. A Method to estimate fiber trapping in low-consistency refining. Tappi Journal, 5: 8. S. 31−36.

Demmel, M & Törnqvist, P-E. 2000. Mechanical seals in dead-end service in the pulp and paper industry [verkkodokumentti]. Päivitetty 7/2013 [Viitattu 27.3.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://turbolab.tamu.edu/proc/pumpproc/P17/P1781-86.pdf

Ebeling, K. 1983. Jauhatuksen vaikutus puukuituihin. Teoksessa: Arjas, A. Suomen Paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja, toinen täysin uudistettu painos, III Paperin valmistus osa 1. Turku: Turun Sanomat Oy. S. 67–99.

El-Sharkawy, K., Haavisto, S., Koskenhely, K. & Paulapuro, H. 2008. Effect of fiber flocculation and filling design on refiner loadability and refining characteristics. BioResources, 3: 2. S. 403−424.

Heikkurinen, A. 1999. Single fiber properties. Teoksessa: Levlin, J-E. & Söderhjelm, L. Papermaking Science and Technology: Pulp and Paper Testing. Jyväskylä: Gummerus Printing. S. 19−37.

Hiltunen, E. 1999. Papermaking properties of pulp. Teoksessa: Levlin, J-E. & Söderhjelm, L. Papermaking Science and Technology: Pulp and Paper Testing. Jyväskylä: Gummerus Printing. S. 39–63.

Horo, K., Koistinen, T., Kujala J. & Niskanen, T. 1983. Massan pumppaus. III Painos. Kotka: Ahlström Karhula pumpputehdas. 81 s.

Häggblom-Ahnger, U & Komulainen, P. 2003. Paperin ja kartongin valmistus. 3-1.painos. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy. 279 s.

Jokisalo, H & Salomäki, K. 1983. Matalasakeusjauhatus. Teoksessa: Arjas, A. Suomen Paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja, toinen täysin uudistettu painos, III Paperin valmistus osa 1. Turku: Turun Sanomat Oy. S. 421−468.

Joy, E., Rintamäki, J., Weckroth, R. & Tuomela, P. 2004. Ultra-low intensity refining of short fibered pulps [verkkodokumentti]. Julkaistu 2004. [Viitattu 24.1.2017]. Saatavissa: http://tappsa.co.za/archive2/APPW_2004/Title2004/Ultra-low_intensity_refining/ultra-low_intensity_refining.html

J&L Fiber Services. 1999a. Optimization Of Low Consistency Disc Refiners [verkkodokumentti]. Päivitetty 3/2007. [Viitattu 22.2.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.jlfiberservices.com/pdf/vol2_no1.pdf

J&L Fiber Services. 1999b. Low Consistency Plate Design Considerations [Verkkodokumentti]. Päivitetty 3/2007. [Viitattu 21.3.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.jlfiberservices.com/pdf/vol4_no1.pdf

Kang, T. & Paulapuro, H. 2006. Effect of External Fibrillation on Paper Strength. Pulp & Paper Canada, 107: 7/8. S. 51-54.

Kereks, R.J. 2014. A theoretical analysis of recirculation in pulp refiners. Tappi Journal, 18: 4. S. 29−32.

Kereks, R.J. & Senger, J.J. 2006. Characterizing refining Action in Low-Consistency Refiners by Forces on Fibres. Journal of pulp and paper science, 32: 1. S. 1−8.

Kinnunen, J. 2017. Aluemyyntipäällikkö, Tiivistetekniikka Oy. Haastattelu 23.3.2017 klo: 8.47 (GMT +0200) Jämsänkoski. Haastattelijana Jaakko Joensuu. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Kinnunen, J. 2016. Aluemyyntipäällikkö, Tiivistetekniikka Oy. Pitkäkuitujauhimen tiiviste [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jaakko Joensuu, lähetetty 24.10.2016 klo 8.53 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”2595-K-M2.pdf”.

KnowPap. 2015. KnowPap-oppimisympäristö. Versio 18.0. Päivitetty 11/2015 [Viitattu 12/2016]. Proledge Oy, AEL. Saatavissa: http://www.knowpap.com/suomi. Palvelu on maksullinen ja vaatii käyttäjälisenssin.

Koskenhely, K. 2007. Refining of chemical pulp fibres. Teoksessa: Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology: Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Second Edition. Jyväskylä: Gummerus Oy S. 94–139.

Koskenhely, K., Nieminen, K. & Paulapuro, H. 2007. Edge form profile of refiner filling bars and its impact on softwood fibre shortening. Paperi ja Puu, 89: 4. S. 1−6.

Lankford A. 2001. Updated conical refiner design offers better energy, maintenance effiency. Pulp & Paper, 75: 2. S. 49-53.

Lumiainen, J. 2000. Refining of chemical pulp. Teoksessa: Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology: Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Jyväskylä: Gummerus Printing. s. 87–123.

Nurminen, K. 2016a. Tuotepäällikkö, AFT Oy. ADC jauhimen materiaalia [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jaakko Joensuu. Lähetetty 7.10.2016 klo 12.15 (GMT +0200). Liitetiedosto:” Short basic ADC presentation.pdf”.

Nurminen, K. 2016b. Tuotepäällikkö, AFT Oy. Jauhimen pumppaus [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jaakko Joensuu. Lähetetty 13.12.2016 klo 11.25 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”Jauhimen pumppaus 12_2016_KN.pptx”.

Retulainen, E., Niskanen, K. & Nilsen, N. 1998. Fibers and bonds. Teoksessa: Niskanen K. Papermaking Science and Technology: Paper Physics. Jyväskylä: Gummerus Printing. S. 55–87.

Rihs, J. & Josephson, W. E. 1997. Refining systems with flow recirculation. PIRA Int. Refin. Conf. 4th. Smithers Pira. Leatherhead, UK, 8 S.

Ryti, N. 1970. Paperitekniikan perusteet. Kahdeksas muuttumaton painos. Espoo: Otapaino. 169 s.

Sepsilva Ltd Oy. 1997. M-504 Hienopaperin valmistus. 2. Muunnettu painos. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy. 140 s.

Seth, R.S. 2006. The importance of fibre straightness for pulp strength. Pulp & Paper Canada, 107: 1. S. 34–42.

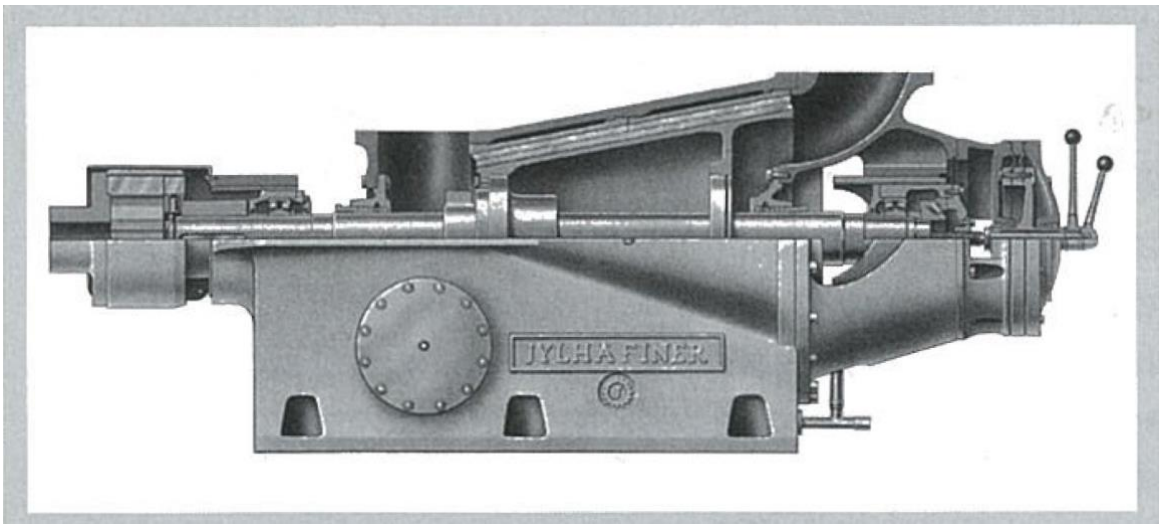
Syrjänen, A & Oivanen, S. 1983. Jauhimet. Teoksessa: Arjas, A. Suomen Paperi-insinööriyhdistyksen oppi- ja käsikirja, toinen täysin uudistettu painos, III Paperin valmistus osa 1. Turku: Turun Sanomat Oy, S. 453−468.

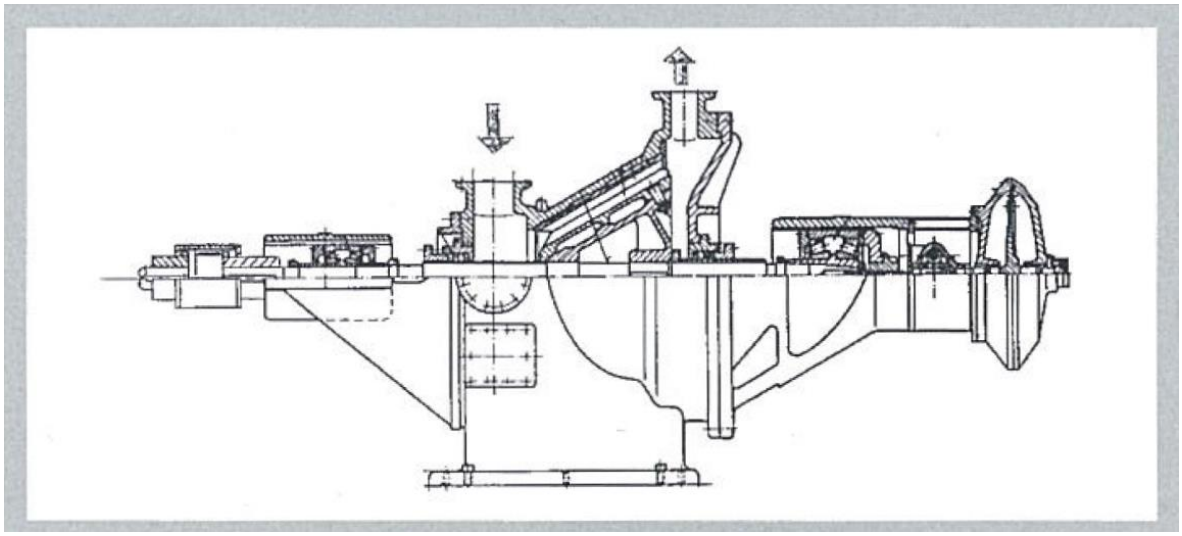
Voith Paper. 2013. TwinFlo [verkkodokumentti]. Julkaistu 2013 [Viitattu 16.1.2017]. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.voith.com/en/1145_en_03_P07_TwinFlo.pdf

Wang, X., Maloney, T.C. & Paulapuro, H. 2007. Fibre fibrillation and its impact on sheet properties. Paperi ja Puu 89: 3. S. 148–151.

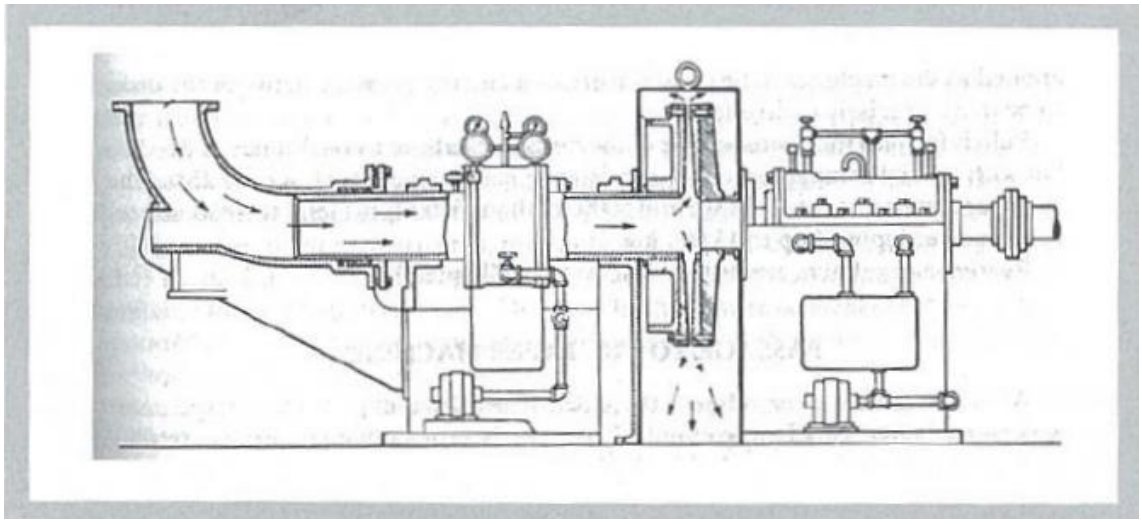
Wittberg, L., Björkman, M., Khokhar, G., Mohlin, U-B & Dahlkild, A. 2012. Flow conditions in the grooves of a Low-Consistency refiner. Nordic Pulp and Paper Research Journal, 27: 2. S. 173−183.

Jauhimien ensimmäiset kehitysversiot.



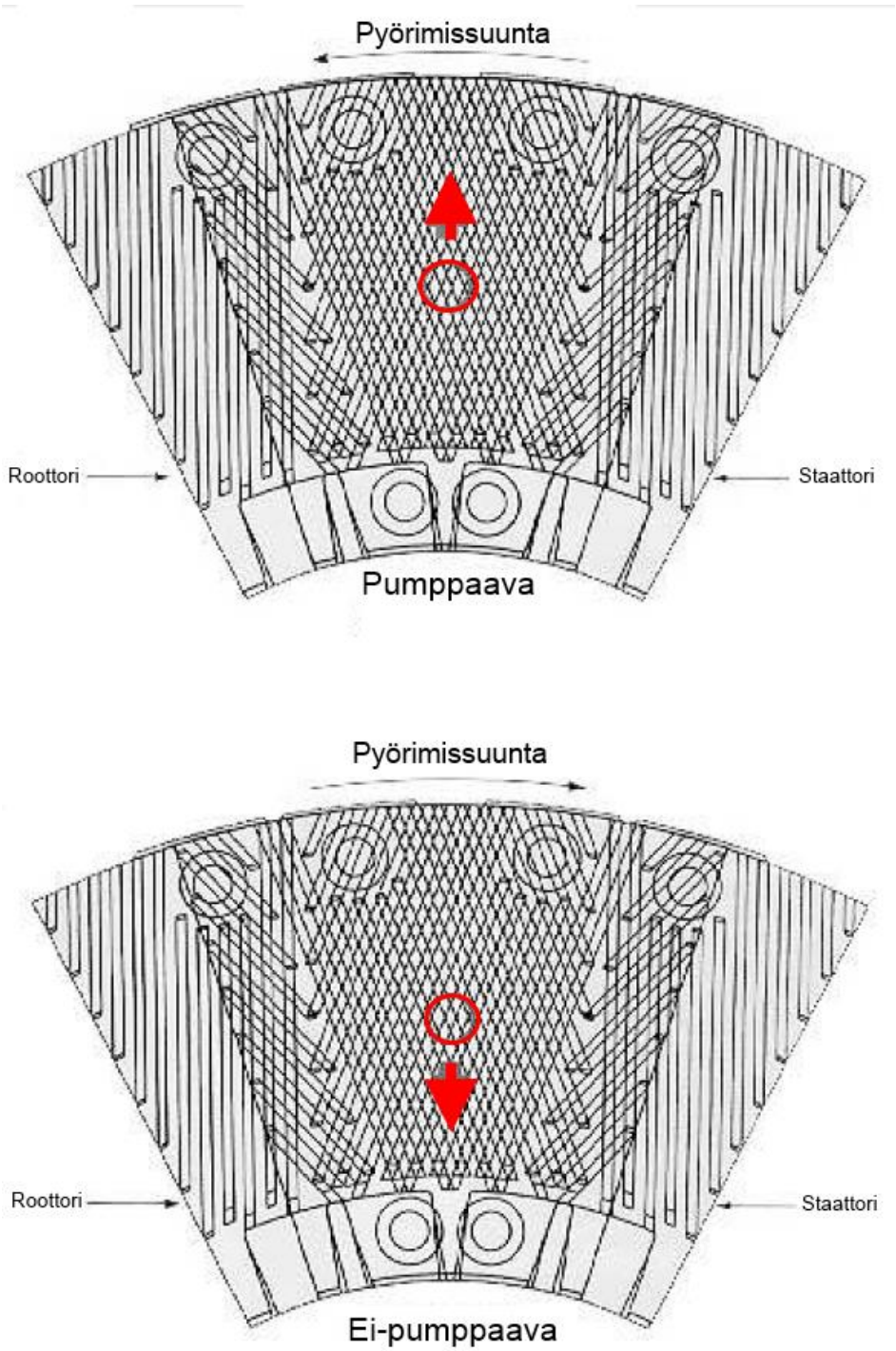


Kuva 1. Jordan- ja Claflin kartiojauhin (Koskenhely 2007, s. 110–111).



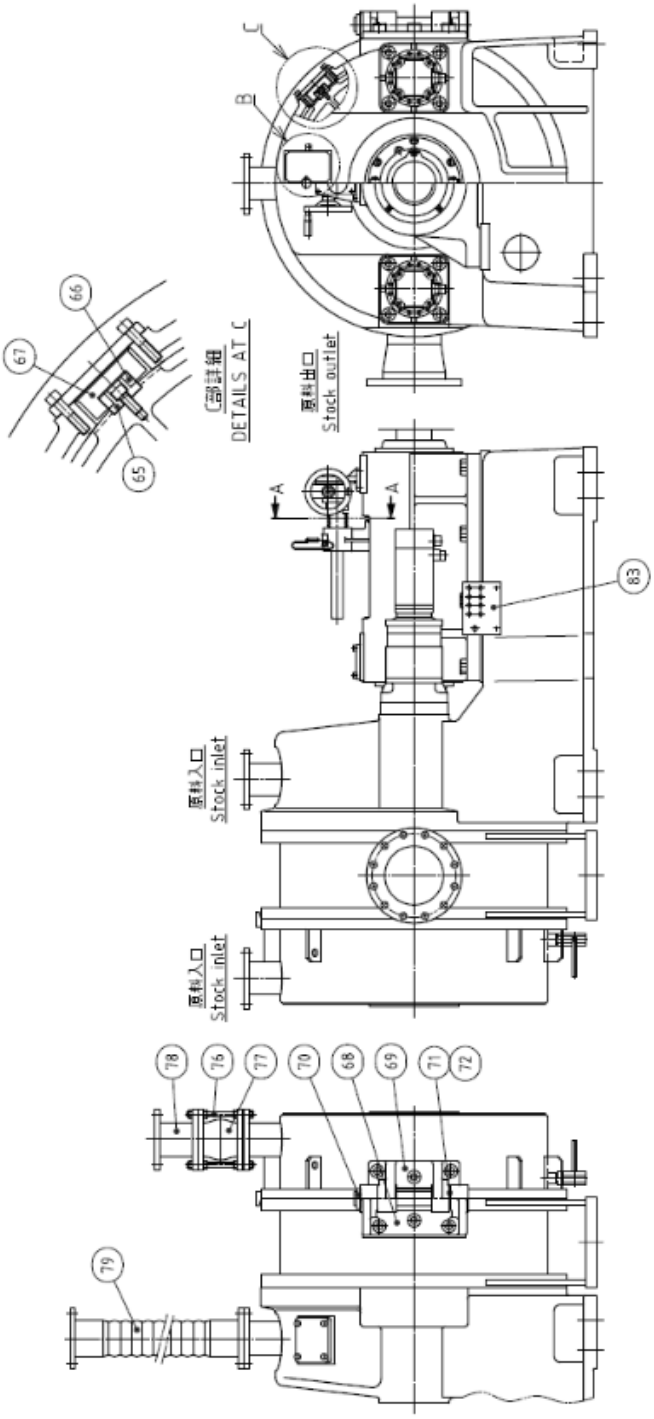
Kuva 2. Sutherland levyjauhin (Koskenhely 2007, s. 112).

Teräkuvioinnin leikkauskulman eteneminen.



Kuva 3. Teräkuvioinnin leikkauskulman eteneminen jauhimen pumppaavassa ja ei-pumppaavassa tilassa, jossa leikkauskulman etenemisen suunta näkyy eri pumppaustilojen välillä (muok. J&L Fiber Servises 1999a).

Kaksoiskartiojauhimen sivuprofiilit.



Kuva 4. Kaksoiskartiojauhimen sivuprofiilit sähkömoottorin päästä ja molemmilta sivuilta (Aikawa Iron Works 2008, s. 44)

Kohdepaperikoneella havaittu jauhinterävaurio.

Kuva 5. Kohdepaperikoneella vaurioitunut kaksoiskartiojauhimen roottorin terä, jossa rengasmainen terävaurio näkyy kuvan ylälaidassa.

Kuva 6. Kohdepaperikoneella vaurioitunut kaksoiskartiojauhimen roottorin terä, jossa rengasmainen terävaurio terän alareunassa.