



Elmo Lautala

Sisäisen pikapulpperointitestimene- telmän ylösskaalaus tuotannon laa- dunvalvonnan tarpeisiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

28.2.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Elmo Lautala
Otsikko:	Sisäisen pikapulperointitestimenetelmän ylösskaalaus tuotannon laadunvalvonnan tarpeisiin
Sivumäärä:	44 sivua + 4 liitettä
Aika:	28.2.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine:	Kemian prosessitekniikka
Ohjaajat:	Tuotekehitysinsinööri Päivi Ellonen Lehtori Eija Koriseva

Insinööryö tehtiin Paptic Oy:lle, joka valmistaa muoveja korvaavia pakkausmateriaaleja. Tämä insinööryö käsittelee tuotekehityksen pikapulperointitestin ylösskaalausta tuotannon laadunvalvonnan tarpeisiin. Pikapulperointitestillä arvioidaan paperin tai kartongin hajoavuutta lämpimässä vedessä ja voimakkaassa agitaatiossa. Hyvä massan hajoavuus kertoo hyvästä kierrätettävyydestä.

Tavoitteena oli ensimmäisessä osassa luoda uudet arviointikuvat matalammassa sakeudessa, ylösskaalata uusi menetelmä hajotusaikaa optimoimalla ja varmistaa, että uudella menetelmällä tehdyt testit vastasivat arvosanoiltaan vanhaa arviointiasteikkoa. Entinen pikapulperointitestin arviointiasteikko oli harva, ja kuvat olivat vaikeammin luettavissa suuren sakeuden takia. Toisessa osassa tutkittiin, eroavatko eri toimipisteissä tehdyt pikapulperointitestien arvosanat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. Uudella menetelmällä tehtyjen testien erojen tilastollista merkitsevyyttä arvioitiin eri arvioijien osalta Friedman-testillä ja eri toimipaikoissa tehtävien testien osalta Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testillä.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että uudella menetelmällä saadaan vanhan menetelmän mukaisia tuloksia. Menetelmä saatiin ylösskaalattua onnistuneesti. Ylösskaalatun menetelmän toistettavuus todettiin hyväksi. Eri arvioijien samoilta näytteille antamien arvosanojen välillä oli tilastollisesti merkitsevä ero. Tilastollisesti merkitsevää eroa eri toimipaikoissa tehdyille testeille ei löytynyt, mutta tulos ei ole täysin luotettava samasta testin tekijästä ja arvioijasta johtuen. Uusi menetelmä voidaan ottaa käyttöön tuotannon laadunvalvonnassa.

Avainsanat: pulperointi, pulperointitesti, paperiteollisuus, kierrätettävyyys

Abstract

Author: Elmo Lautala
Title: Up-scaling of internal pulping test for the use of quality control in manufacturing
Number of Pages: 44 pages + 4 appendices
Date: 28 February 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major: Chemical Processes
Supervisors: Päivi Ellonen, Product Development Engineer
Eija Koriseva, Senior Lecturer

This thesis work was commissioned by Paptic Ltd which manufactures plastic replacing packing materials. The thesis focuses on up-scaling of pulping test currently used by product development for use in quality control of manufacturing. Pulping test measures how well paper or cardboard do disintegrate to single fibers in rigorous agitation and warm water. Good disintegration of fibers indicates good recyclability.

The aim of the first experiment phase was to develop new evaluation pictures in decreased thickness, up-scaling of the new method by optimizing disintegration time and verification of the grades generated from testing with the novel method equal with the former method. Former grading scale was sparse and interpretation of the pictures was difficult due to the fiber saturation. In the second phase, differences between the grades of pulping tests conducted in different premises were studied with mathematical models. The aim was to determine if there was statistically significant differences between the premises. Friedman test was used to analyze the statistical significance for tests conducted by different assessors and Wilcoxon signed rank test was used to determine the statistical significance of tests conducted in different premises.

Based on the results it can be concluded that the test results of the up-scaled novel method correlates well with the former method. The novel method was up scaled successfully and grade differences generated by different assessors, machines and premises were determined. The novel method was found to be predictable based on the results of the replication tests. The grade differences were found to be statistically significant for the samples analyzed by different assessors. The grade differences were not statistically significant for the tests conducted in different premises but the results are not reliable due to same person conducting and grading the tests. The novel grading scale can be implemented in quality control of manufacturing.

Keywords: Pulping, pulping test, paper industry, recyclability

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Pakkausmateriaalien massan valmistus ja esikäsittely	2
2.1	Kuitumassan valmistusprosessit	2
2.2	Massankäsittelyn tehtävät	3
2.3	Esikäsittely ja massan siirtäminen	4
3	Pulpperointi	5
3.1	Pulpperin toimintaperiaate	5
3.1.1	Pulpperoinnin tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä	7
3.1.2	Pulpperoinnin energian käyttö ja energiatehokkuus	9
3.1.3	Hylyn käsittely	9
3.2	Pulpperityypit	11
3.2.1	Panospulpperi	11
3.2.2	Jatkuvatoiminen pulpperi	13
3.2.3	Rumpupulpperi	14
4	Massan jauhatus ja karkealajittelu	16
4.1	Jauhatus	17
4.2	Karkealajittelu	18
4.2.1	Painesihdit	19
4.2.2	Pyörrepuhdistimet	22
5	Työn suoritus	24
5.1	Pikapulpperointitesti	24
5.1.1	Näytteistä otettujen kuvien arvosanojen määrittäminen	25
5.1.2	Vanha pikapulpperointitestimenetelmä	27
5.2	Työn tavoite	28
5.3	Työssä käytetyt pikapulpperointitestimenetelmät, koelaitteisto ja materiaalit	28
5.4	Arviointikuvien ottaminen uudella ja vanhalla menetelmällä	30
5.5	Uusien arviointikuvien kalibrointi ja uuden arviontiasteikon määrittäminen	31
5.6	Uuden menetelmän ylösskaalaus	32

5.7	Ylösskaalatun menetelmän verifiointi eri toimipaikoissa	32
6	Tulokset	33
6.1	Uusien arviointikuvien määrittäminen ja testimenetelmän ylösskaalaus	33
6.1.1	Näytteiden hajotustulokset 1. vaiheessa	33
6.1.2	Profiilikuva arvioijista	35
6.1.3	Friedman-testi	36
6.1.4	Ylösskaalatun menetelmän hajotusajan määrittämissä	36
6.2	Ylösskaalatun menetelmän testien toistettavuus eri toimipisteissä	38
6.3	Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi	39
6.4	Luotettavuus ja virhelähteet	40
7	Yhteenveto	41
	Lähteet	43

Liitteet

Liite 1: Friedman-testi

Liite 2: Uuden menetelmän optimaalisen hajotusajan määrittämiseksi tehdyt laskelmat

Liite 3: Varmistuskokeiden määrän määrittäminen

Liite 4: Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi

Lyhenteet

HC: *High consistency.* Korkeasakeus.

HW: *High weight.* Raskaspainoinen

MC: *Medium consistency.* Keskisakeus.

ISO: *International Organization for Standardization.* Kansainvälinen standardisoimisjärjestö.

LC: *Low consistency.* Matalasakeus.

LW: *Low weight.* Kevytpainoinen.

1 Johdanto

Tämä työ toteutetaan Paptic Ltd:lle. Paptic on perustettu vuonna 2015, ja pakkausmateriaalien teollisen mittakaavan tuotanto alkoi vuonna 2018. Paptic valmistaa muovipakkauksia korvaavia, biopohjaisia pakkausmateriaaleja, jotka ovat kierrätettäviä ja kestäviä. Pakkausmateriaalit valmistetaan puukuidusta ja materiaaleja on yhteensä viittä erilaista. Pakkausmateriaaleja on käytetty esimerkiksi tavara- ja elintarvikepakkauksissa sekä paperipussien materiaalina. [1.]

Tämän opinnäytetyön aiheena on laadun valvonnan pikapulperointimenetelmän ylöskaalaus tuotannon laadun valvonnan tarpeisiin. Työ sisältää teoreettisen ja kokeellisen osuuden. Teoreettisessa osuudessa käsitellään paperin ja kartongin massan valmistuksen esi- ja käsittelyvaiheita. Pulperoinnin merkitystä paperin ja kartongin hajotuksessa yksittäisiksi kuiduiksi käsitellään kokeellisen osuuden pikapulperointitestejä varten. Pulperoinnilla on tärkeä rooli uusiomassan kierrättämisessä, sillä alkupään prosessina pulperoinnin onnistumisella on merkitystä raaka-aineen hukan määrään. Tavoitteena on muodostaa pohja kokeellisen osuuden pikapulperointitestejä varten.

Kokeellinen osuus toteutettiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä pyrittiin määrittämään uusi, matalamman sakeuden arviointiasteikko pikapulperointitestien tuloksille. Vanhan arviointiasteikon arvosanojen täytyi olla yhteneväisiä uuden menetelmän kanssa. Kun uudet arviointikuvat oli määritelty, alettiin vanhaa menetelmää ylöskaalaamaan suurempaan mittakaavaan hajoamisajaa optimoimalla, säilyttäen kuitenkin hajoamistuloksen paikkaansa pitävyyden. Ylöskaalatun menetelmän hajoamisajan varmistamiseksi tehtiin varmistuskoeket. Toisessa vaiheessa selvitettiin ylöskaalatulla menetelmällä eri toimipaikoissa suoritettujen testien arvosanojen tilastollisen eron merkitsevyys. Kokeellisessa osuudessa arvioitiin myös arvioijasta ja laitteistosta johtuvien virhemarginaalien suuruus sekä erojen tilastollinen merkitsevyys.

2 Pakkausmateriaalien massan valmistus ja esikäsittely

Massankäsittely on pakkausmateriaalin valmistuksen väliprosessi, joka tapahtuu massatehtaan ja paperi- tai kartonkitehtaan välillä. Jos sellu ja paperi- tai kartonkitehdas toimivat integroituna siten, että sulppu johdetaan suoraan sellutehtaalta paperi- tai kartonkitehtaalle, pulperointi- tai käsittelyjärjestelmälle ei ole tarvetta. Prosessissa kuitumassa valmistellaan paperi- tai kartonkikoneelle sopivaksi materiaaliksi. Prosessiin kuuluu muun muassa massojen hajotus, kuidutus, jauhatus, puhdistus ja annostelu. [2.]

2.1 Kuitumassan valmistusprosessit

Pääraaka-aineena käytettäviä massatyyppejä on kolme erilaista: kemiallinen, mekaaninen ja uusiomassa. Lisäksi paperikoneiden hylkypaperia voidaan käyttää kuitumassana. Jokainen paperi- ja kartonkilaji vaatii tietyn kuitukoostumuksensa, täyteaineet, liimat ja lisäaineet. Eri raaka-aineiden tehtävänä on muokata massa haluttuun koostumukseen lopputuotetta varten. [3, s. 14–15.]

Kemiallinen massa valmistetaan keittämällä havu- tai lehtipuuhaketta sulfaatti- tai sulfiittiliemessä. Lehtipuumassalla on paremmat paino-ominaisuudet, kun taas havupuumassalla on paremmat lujuusominaisuudet. Hake kuidutetaan liotamalla sitä ligniiniä sitovassa liemessä korkeassa lämpötilassa, jolloin kuidut vapautuvat. Mekaanisessa massanvalmistuksessa hake kuituuntuu mekaanisen rasituksen, veden ja lämmön vaikutuksesta. Mekaanisen massan ominaisuudet eroavat huomattavasti kemiallisen massan ominaisuuksista suuren hienoainepitoisuuden takia, mistä on etua mekaaniselle massalle paperin pintaominaisuuksia verrattaessa. Toisaalta suuresta ligniinipitoisuudesta on haittaa, koska se edistää paperin kellastumista. [3, s. 15, 31–34.]

Kierrätetystä paperista voidaan valmistaa uusiomassaa, jota voidaan käyttää raaka-aineena esimerkiksi pakkausmateriaalien valmistuksessa. Uusiomassan ominaisuudet poikkeavat kemiallisen ja mekaanisen massan ominaisuuksista perusteellisesti, koska kuivatus aiheuttaa pysyviä vaurioita kuitujen pintaan.

Uusiomassan valmistusprosessi eroaa huomattavasti mekaanisen ja kemiallisen massan valmistusprosesseista, jossa erot ovat pääosin hajotus-, jauhatus- ja siistausvaiheissa prosessia. [3, s. 15, 35.]

Kemiallisen massan koostumukseen vaikuttavat massan käyttökohde, massojen sekoitussuhde ja massojen kemialliset sekä fysikaaliset ominaisuudet. Näitä ominaisuuksia ovat vaaleus, vaaleuden pysyvyys, vetolujuus, repäisyjujuus ja pintaominaisuudet. Massan ominaisuuksiin vaikuttavat myös käytetyt lisäaineet, liimat ja täyteaineet. Valkaisun ja pesun jälkeen sellu muistuttaa pehmeää valkoista pumpulia, joka integroimattomilla tehtailla paalataan kuljettamisen ja varastoinnin helpottamiseksi. [3, s.14–15.]

2.2 Massankäsittelyn tehtävät

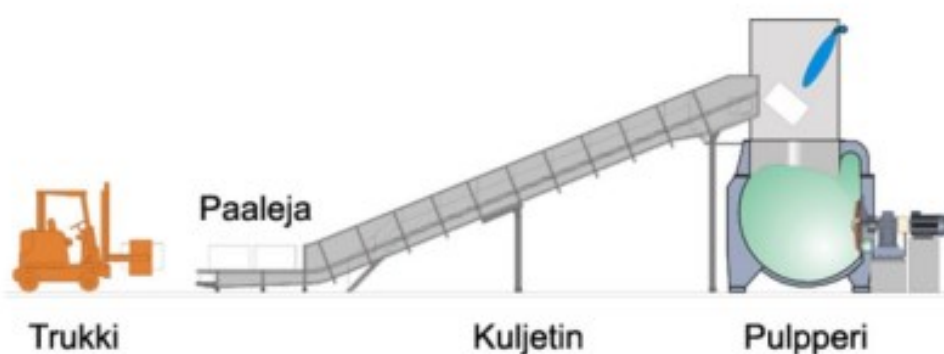
Massankäsittely sisältää tuore- ja hylkymassojen varastoinnin sekä niiden annostelun, muokkauksen, laimentamisen, apu- ja lisäaineiden varastoinnin. Tärkeintä on, että raaka-aineita laimennetaan riittävästi paperi- ja kartonkikoneita varten. Tämän takia massankäsittelyn vaiheilla on tärkeä osuus tehtaan vesikiertojärjestelmässä. Massankäsittelyprosessi jaetaan yleensä seuraaviin osaprosesseihin:

- sellun tai mekaanisen massan hajotus ja jauhatus
- uusiomassan hajotus, puhdistus ja jauhatus
- hyllyn käsittely
- apu- ja lisäaineiden lisääminen ja annostelu
- uusiomassan siistaus eli painoväriin poisto tarvittaessa. [3, s. 112; 3, s.95–96.]

Siistaus on laaja prosessi, johon kuuluu epäpuhtauksien ja painovärien poisto sekä massan valkaisu. Jotkut uusiomassat, kuten kartongit, voidaan siistata ilman massan valkaisua ja painovärien poistoa. [3, s.112.]

2.3 Esikäsittely ja massan siirtäminen

Massan esikäsittely tapahtuu massatehtaan ja paperitehtaan välissä. Esikäsittely ei kuitenkaan ole tarpeellista, jos tehtaat on integroitu ja sellu voidaan pumppata massatehtaasta paperitehtaaseen. Uusiomassa on aina paaleina, jotka voidaan syöttää hihnakuljettimella pulpperiin. [4, s. 91]. Tyypillinen kuitumassan pulperoinnin esikäsittelylinja (kuva 1) koostuu paalinkuljettimesta, nauhanpoistimesta, paalinhajottajasta, syöttöhihnasta ja tasaajasta [2].



Kuva 1. Kuitumassapaalien esikäsittelylinja ennen pulperointia [2].

Kuitumateriaaleja siirretään paperitehtailla hihnakuljettimien avulla, koska ne ovat tehokkaita ja taloudellisia. Kuljetintyyppi valitaan usein kuljetettavan materiaalin tyypin ja määrän mukaan. Yleisimmät hihnakuljetin tyypit ovat metallinen lamellikuljetin ja kuminen hihnakuljetin. [4, s. 78.]

Kuitupaaleista poistetaan koossa pitävät metallinauhat ja suurimmat paalit hajotetaan pienemmäksi. Kaikkein isommat paalit puretaan pienemmäksi ennen tätä. Hajotettu massa kulkee metallin paljastimen läpi, jossa poistamatta jääneet metallinauhat ja muut suuret metallipartikkelit voidaan poistaa. Viimeisenä vaiheena massaa voidaan esikastella, jolloin pulperointi nopeutuu hieman. [4, s. 78.]

3 Pulpperointi

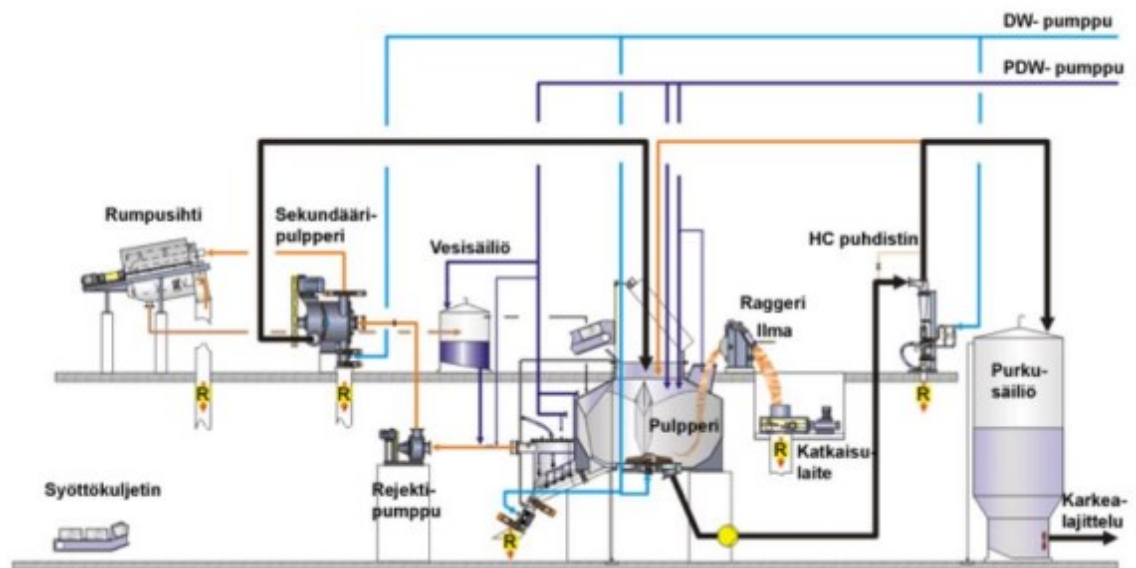
Pulpperointi on massan käsittelyssä alkupään vaihe, jossa massapaalit hajotetaan. Pulpperoinnissa vesi ja kuitumateriaali sekoitetaan keskenään, jolloin kuidut hajoavat mahdollisimman pieniksi partikkeleiksi. Pulpperointiprosessi ei eroa juurikaan sellu- ja uusimassakuitujen välillä. Tavoitteena on suorittaa pulpperointi mahdollisimman nopeasti siihen asti, kunnes haluttu kuidun hajoamistaso on saavutettu ja sulppu on pumpattavissa. Pulpperoinnin aikana myös suurimmat, kiinteät kuitumassassa olleet epäpuhtaudet, kuten metallit ja kivet, pystytään poistamaan. Mikäli hajoamattomia kuituflokkeja jää paljon jäljelle pulpperoinnin jälkeen, sulppu voidaan syöttää kuiduttimeen, jossa massakimput hajoavat. Toinen vaihtoehto kuiduttimelle on toisiopulpperi, johon raskain, hajoamaton rejekti syötetään lajiteltavaksi kevyisiin ja raskaisiin osiin. [4, s. 93–95.]

Sulpun kuituuntumisen saavat aikaan hydrauliset voimat, kun pulpperin roottori saa sulpun pyörivään liikkeeseen, jolloin kuitujen muodostamat kuitukimput hajoavat sisäisten kitkavoimien vaikutuksesta. Myös pulpperin roottorin pyöriminen hajottaa sulpua mekaanisesti. [4, s.96–97.]

3.1 Pulpperin toimintaperiaate

Pulpperointijärjestelmä koostuu usein pulpperin syöttimestä, pulpperista, ragger-laitteesta, mahdollisesta toisiopulpperista ja pulpperin hylyn käsittelijästä [2]. Tavallisesti teollisuudessa käytetyt pulpperit ovat pyöreitä altaita, joiden tilavuus vaihtelee 4–160 m³ [4, s.97]. Parin sadan kilon massapaalin hajottamiseen menee pulpperilla yleensä muutama minuutti, mutta pulpperiin voidaan syöttää myös yli tonnin paaleja. Pulppereiden etuihin kuuluvat suuret kapasiteetit, jopa 1 600 tonnia paalitettua sellua on mahdollista käsitellä päivässä. Pulpperissa on siipipyörämäinen roottori, jonka kierrosnopeus on yleensä 12–20 m/s [4, s. 97]. Roottorin ympärillä on kartiomainen sihtilevy, jossa on reikiä kuitujen hajoamisen tehostamiseksi. Levyn tarkoituksena on päästää jo kuituuntunutta sulpua läpi seuraaviin osiin prosessia. Kuvassa 2 on esiteltyä esimerkki

matalasakeuspulperointiprosessista, johon on sisällytetty myös vesikierron linjat. [2].



Kuva 2. Esimerkki matalasakeuspulperointiprosessista [2].

Raggerilla poistetaan nauhanpoistosta jääneet paalinsidontanauhat ja muut suurikokoiset partikkelit. Raggerin köyden häntä kulkee pulperin läpi, johon suurikokoiset partikkelit tarttuvat kasvattaen köyttä. Köyttä vedetään ylöspäin raggeria kohti, jonka jälkeen jäteköysi hävitetään palasina. Raggerin toiminta heikkenee yli 6 %:n sakeudessa, kun massan pyöriminen pulperissa hidastuu. Raggerin köydenmuodostamisen ihannesakeus on 3,5–5,5 %. Köyden punoutumiseen vaikuttaa myös raggerin ja roottorin sijainti, pulperin rakenne ja syötön paikka. Köyttä on vedettävä sopivalla nopeudella, sillä köysi ei ehdi kasvaa riittävästi ja katkeaa liian nopeasti vedettynä. Liian hitaasti vedettäessä köysi kasvaa liikaa, jolloin se voi sotkeutua roottoriin. Kummassakin virhetapauksessa pulperin toiminta joudutaan väliaikaisesti keskeyttämään. Kuvassa 3 on esiteltyä esimerkki raggerista. [2; 4, s. 104.]



Kuva 3. Ragger-laite [5].

Karkeaa rejektiä voidaan erottaa pulperoinnin jälkeen sekundääripulpperilla tai rumpusihdin avulla. Sekundääripulpperissa sihtilevyn reiät ovat 4–6 mm:n kokoisia, joiden avulla karkea aines saadaan kerättyä rejektin talteenottoa varten. Mikäli pulperointiprosessissa ei ole sekundääripulpperia, käytetään roskasihtiä ja rumpusihtiä. Roskasihdissä on 10–12 mm:n kokoiset reiät, jonka avulla voidaan kerätä pulperin rejektistä kuidut, jotka pestään ja saostetaan rumpusihdissä. Rumpusihdin reiät ovat 8 mm, jonka läpi kuidut kulkevat eteenpäin prosessissa ja rejekti ohjataan hyllyn käsittelyyn. [2.]

3.1.1 Pulperoinnin tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä

Pulperointiin käytetty energia ja aika vaikuttavat huomattavasti kuituuntumiseen. Kuidun hajoaminen tehostuu tietyn verran sakeutta nostettaessa, jonka jälkeen massan pyörimisen hidastumisen seurauksena hajoamisteho heikkenee, kun sakeus nousee yli 6 %:iin. Sen vuoksi optimaalinen sakeustaso on 4–6 %. Toisaalta sakeutta nostettaessa huomattavasti sulpun pumpattavuus ja kuitujen vettyminen heikkenevät. [3, s. 112–117.] Mikäli sakeutta nostetaan yli 8 %, pulpperi vaatii todennäköisesti erikoisrakenteisen roottorin, jotta pulpperi ei

tukkeutuisi. Erikoisrakenteiset roottorit kuitenkin mahdollistavat jopa 15 %:n sa-
keuden. [1.] Liiallinen hajotusvoima johtaa kuitujen rikkoutumiseen ja epäpuh-
tauksien pilkkoutumiseen, mikä tekee massasta hienojakoisempaa ja vaikeuttaa
niiden erotusprosesseja [4, s. 99].

Pulpperin koko ja muoto vaikuttavat kuituuntumiseen oleellisesti. Esimerkiksi,
jos pulpperin halkaisija on liian suuri, laitojen ja pinnan virtausnopeudet tulevat
liian pieniksi, jonka seurauksena pulpperin teho heikkenee. Jos pulpperin kor-
keus kasvaa liian suureksi, verrattuna pulpperin roottorin tehoon, kääntyvät vir-
taukset alaspäin liian aikaisin ja pintavirtaus katoaa lähes täysin. Tätä voidaan
kompensoida tietyn verran roottorin kokoa, muotoa ja pyörimisnopeutta muutta-
malla. [2.]

Veden lämpötila on yleensä 45–60 °C, koska veden korkeampi lämpötila paran-
taa kuituuntumista veden viskositeetin laskiessa, jolloin pulpperin tehokkuus pa-
ranee. Esimerkiksi kuituuntuminen tehostuu n. 25 %, kun lämpötilaa nostetaan
20 °C:sta 60 °C:seen. [1]. Jotkin päällystetyt paperilaadut voivat vaatia jopa 75
°C:n lämpötilan, jotta täyteaineita ja musteita saadaan irrotettua riittävästi kui-
duttamista varten [4, s. 101–102].

Varsinkin uusiomassan pulpperointi voi vaatia kemikaaleja, jotta muste saadaan
irrotettua ja sidottua kemiallisesti. Yleisimmät pulpperoinnissa käytetyt kemikaa-
lit ovat natriumhydroksidi, vetyperoksidi, natriumsilikaatti ja saippua. Kemikaa-
leja lisättäessä täytyy huomioida, että pulpperin olosuhteiden ollessa alkaliset
(pH>7), kuitumassa hajoaa helpommin kuin happamissa olosuhteissa. Alhaisen
pH:n haittana on myös heikentynyt veden kyvykyys kastella kuituja. Sulppu
usein varastoidaan säiliöihin pulpperoinnin jälkeen, koska varastoinnin aikana
kuidut vettyvät enemmän ja niistä tulee joustavampia, jolloin lopputuotteen veto-
lujuus kasvaa. Varastoinnin kuituja parantava vaikutus riippuu varastointiajasta
ja lämpötilasta. [2.]

3.1.2 Pulpperoinnin energian käyttö ja energiatehokkuus

Paperin valmistus on energiaintensiivinen prosessi, jossa energia on yksi suurimpia tekijöitä paperin hinnasta. Energia kattaa tavallisesti 10–20 % kokonaistuotantokustannuksista. Pulpperointi voi kuluttaa integroimattomalla paperi- tai kartonkitehtaalla jopa 30 kWh yhtä kuitumassatonna kohti, kun pulpperointiin sisällytetään myös pumppaamisen vaatima energia. Tyypillinen energian kulutus on kuitenkin vain 15 kWh/t [2, s. 112]. Uuden pulpperin asentamisen hyödyt ovat energian kulutuksen kannalta keskinertaiset vanhoilla tehtailla. [6, s. 689–690.]

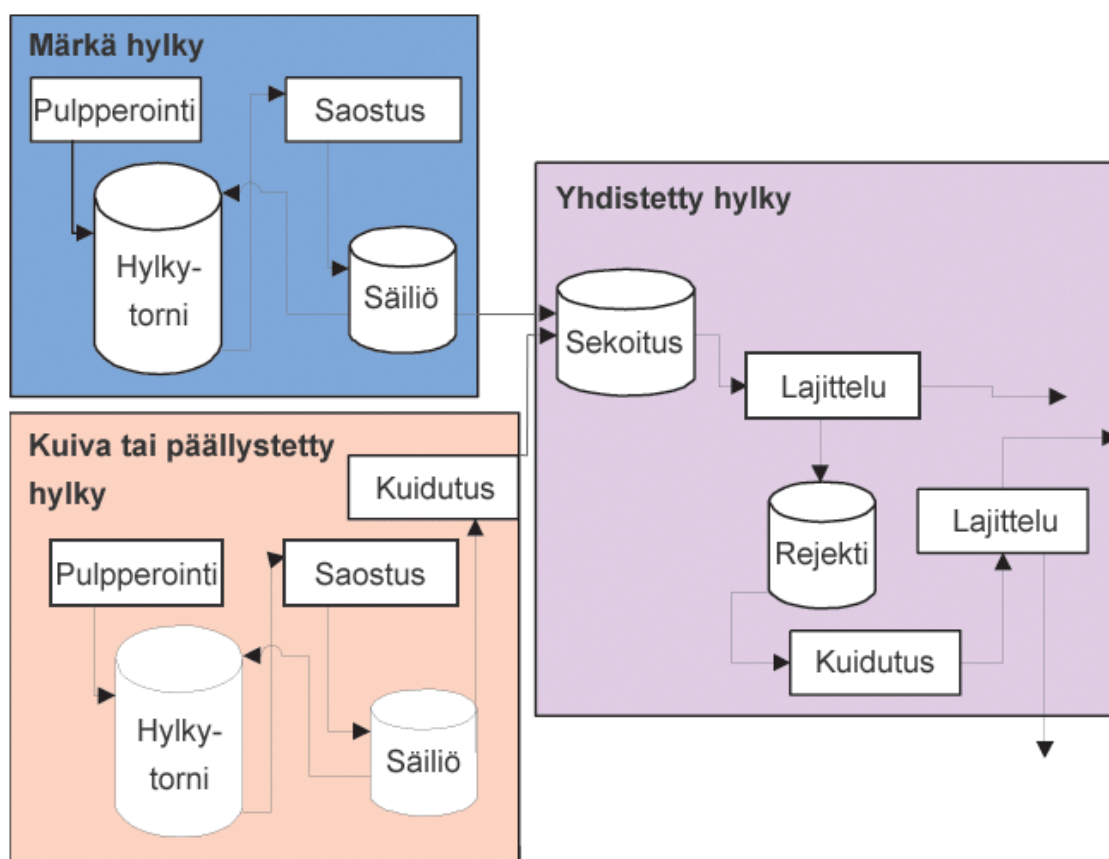
Massan valmistus on toiseksi suurin sähköenergian kuluttaja, kuten eräältä kartonkikoneelta tehdyiltä tutkimukselta voi havaita. Toisaalta lämpöenergiaa kuluu vähän massavalmistuksessa, joten massavalmistuksen kokonaisenergian kulutus jää vähäiseksi. [7, s.21.]

3.1.3 Hylyn käsittely

Paperin- ja kartonginvalmistuksessa syntyy hylkyä 5–20 % tuotannosta, joka uudelleen käytetään tehtailla jälkikäsittelyn avulla. Oikein toteutettu hyllynkäsittelyjärjestelmä tuottaa mahdollisimman puhdasta ja korkealaatuista raaka-ainetta niin, että se ei aiheuttaisi laatu- tai ajettavuusongelmia paperi- ja kartonkikoneille. Hylkyjärjestelmän toinen tarkoitus on toimia puskurivarastona seisakin tapahtuessa tehtaalla, jolloin koko tuotanto ohjataan hyllynkäsittelyjärjestelmään, josta kuidut voidaan uusiokäyttää myöhemmin. Hyllynkäsittelyjärjestelmän rakenne riippuu käsiteltävien massojen koostumuksista ja niiden uudelleen sekoitussuhteesta. Tyypillisimmät prosessin osat ovat pulpperointi, varastointi, kuidutus, lajittelu, suotatus, varastointi ja uudelleen sekoitus. [2; 3, s. 116–117.]

Kuvassa 4 on esitelty eräs yhdistetyn hyllyn pulpperointijärjestelmä, jossa varsinaisen valmistusprosessin märkä- ja kuivahylky johdetaan omiin pulppereihin. Pulppereiden sulppu johdetaan hylkytorneihin, jossa kiintoaineet ja saostumat putoavat altaan pohjalle, josta ne voidaan kerätä. Varastoitu sulppu ja saos

johdetaan varastosäiliöihin, joista vain kuivahyllystä tehty sulppu kuidutetaan säilönnän jälkeen. Sulput johdetaan sekoitusastiaan, jonka jälkeen yhdistetty sulppu lajitellaan karkeuden mukaan. Tarpeeksi hienojakoinen sulppu on valmiasta käytettäväksi massana varsinaisessa prosessissa, kun taas karkea rejekti kuidutetaan hienommaksi ja lajitellaan, ennen kuin se kelpaa varsinaiseen prosessiin. Jälkimmäisen lajittelun rejekti kuidutetaan uudelleen tai poistetaan prosessista. [2.]



Kuva 4. Eräs yhdistetyn hyllyn pulpperointijärjestelmä [2].

Pulppereilla käsitellään valmistuksessa syntynyttä hylkyä uusiokäyttö varten. Kaikkein yksinkertaisimmassa hyllynkäsittelyjärjestelmässä pulpperit hajottavat valmistuksessa tai jälkikäsitelyssä syntynyttä hylkyä takaisin sulpuksi, joka varastoidaan säiliöihin ennen hyllynkäsittelyjärjestelmään pumppaamista. Hyllyn pulpperointisakeus on tyypillisesti 4–5 %. Esimerkiksi erään 40 t/h paperikooneella hylkysäiliön tilavuus vasta neljän tunnin ajoa, jolloin säiliön kooksi tulee 3

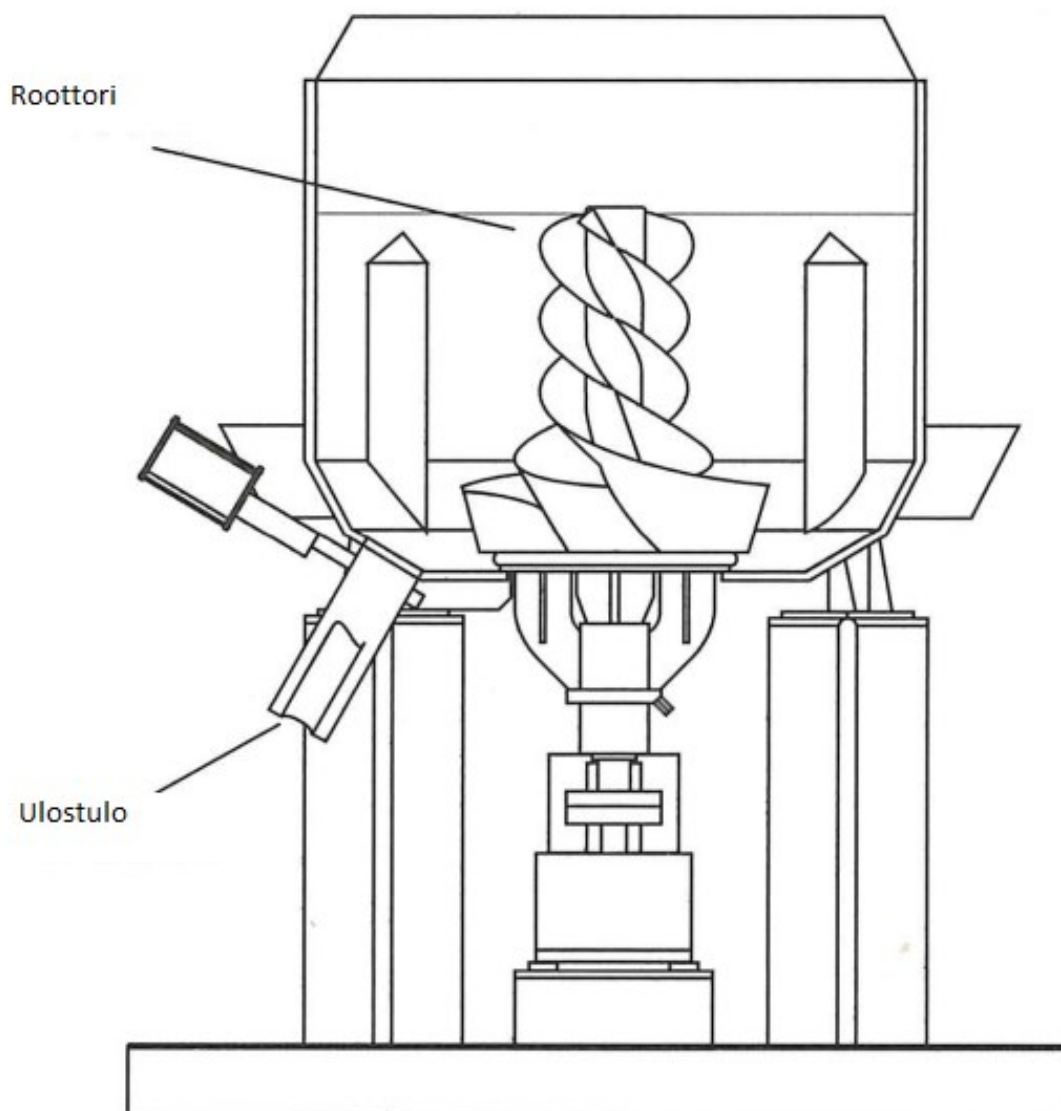
200 m³ [8, s. 117]. Pulpperointijärjestelmän rakenne riippuu siitä, onko kyseessä koneen vai jälkikäsitellyn hyllyn pulpperoinnista. [2.]

3.2 Pulpperityypit

Pulpperointilaitteiston tyyppi riippuu kuitumassan laadusta. Pulpperointilaitteistot jaetaan usein kahteen pääryhmään pysty- ja vaakapulppereihin, joista pystypulpperi on yleensä tehokkaampi. Yleisimmät pulpperityypit jaetaan sakeuden mukaan matala-, keski- ja korkeasakeuspulppereihin, joiden lisäksi myös rum-pupulppereita käytetään. Pulpperit voivat toimia panos- tai jatkuvatoimisena, riippuen halutuista pulpperointiominaisuuksista. [4, s. 94, 98.]

3.2.1 Panospulpperi

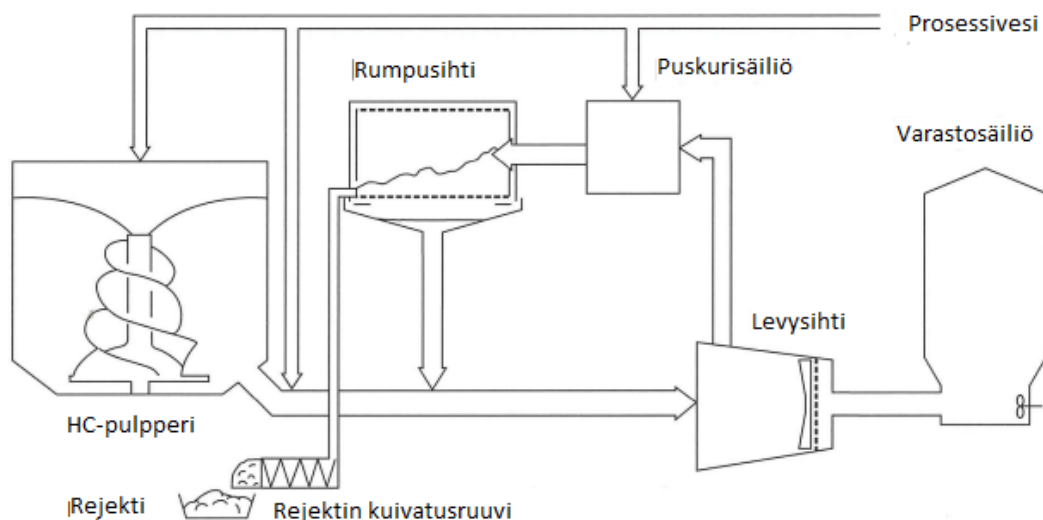
Panospulpperiin syötetään tietty määrä vettä ja kuitumassaa sekä mahdollisesti tarvittavat kemikaalit. Pulpperointisakeutta säädetään punnitun kuitumassan perusteella, mutta panospulpperit ovat usein keski- tai korkeasakeuspulppereita. Pulpperin täytyttyä alkaa ajovaihe, jossa pulpperin ruuvimainen roottori hajottaa kuitumassaa sulpuksi asetetun ajan verran. Sulppu on valmista pumpattavaksi varastosäiliöön, kun tietty aika on kulunut, jonka jälkeen se voidaan pumpata edelleen kuiduttimelle tai jauhimelle. [2; 4, s. 100]. Panospulpperin rakenne on esiteltyinä kuvassa 5.



Kuva 5. Panospulpperin rakenne [4, s.101].

Hajotusaika on pidempi kuin muissa pulpperityypeissä, tyypillisesti 15–25 min, jonka lisäksi pulpperin täyttöön ja tyhjennykseen voi kulua yhteensä 10–15 min. Pulpperointisyklin kokonaiskestoksi tulee tällöin 25–40 min, jolloin kapasiteetti jää pieneksi pitkän pulpperointisyklin takia muihin pulpperityyppeihin verrattuna. Panospulpperi mahdollistaa myös korkeamman pulpperointisakeuden, joka on yleensä 6–15 %, mutta voi olla jopa 19 %. [4, s. 98]. Sulppu on huomattavasti homogeenisempaa muihin pulpperityyppeihin verrattuna. Panospulpperit ovat siis usein korkea- tai keskisakeuspulppereita. Sihtilevyjen reikäkoko on suuri, jonka ansiosta pulpperi kyetään tyhjentämään nopeasti. Panospulpperin etuihin

kuuluu, että epäpuhtauksia hajoaa vähän sulpun sekaan. [2]. Eräs korkeasakeuspanospulpperointijärjestelmä on esiteltyä kuvassa 6.



Kuva 6. Eräs korkeasakeuspanospulpperointijärjestelmä [4, s. 102].

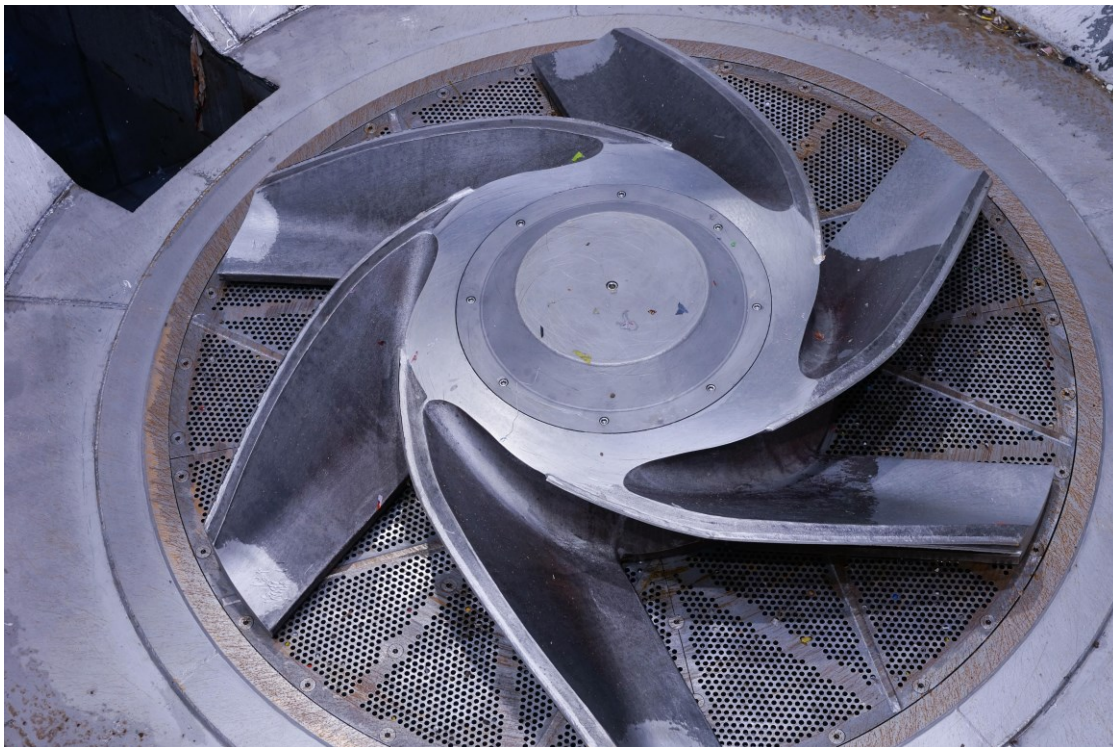
Kuvan 6 erääseen korkeasakeuspanospulpperointijärjestelmään kuuluu HC-pulperi, prosessiveden syöttöjärjestelmä, rumpusihti, levysihti, puskurisäiliö, varastosäiliö ja rejektin kuivatusruuvi. Pulpperointijärjestelmän rakenne on kuitenkin aina tapauskohtainen. [4, s. 102.]

3.2.2 Jatkuvatoinen pulperi

Jatkuvatoinisessa pulpperissa pinnankorkeus ja sakeustaso pidetään vakiona säätämällä syötettävän veden ja massan määrää. Massaa ja prosessivettä syötetään jatkuvasti siten, että sakeus pysyy 2–4 %. Jatkuvatoiniset pulpperit ovat usein matalasakeuspulppereita. Massan viipymäaika on pulperi- ja massatyyppin mukaan 5–40 min, joka vaihtelee suuresti pulperoitavan massan perusteella. Pulperin kapasiteetti on suuri, sillä se voi olla jopa 160 m³. Usein jauhaus on välttämätön osa prosessia, koska pulperoitu massa ei ole tasalaatuista. [2; 4, s. 103.]

Jatkuvatoinisen pulperin roottori eroaa huomattavasti panostoinen pulperin roottorista (kuva 7). Sihtilevyn reikäkoko on pieni yleensä noin 6–20 mm.

Pienemmät reiät johtavat vain pienempien kuitujen kulkeutumiseen sihdin läpi, jonka takia pulperoitumisaika kasvaa suurien kuitujen tukkiessa sihtilevyn reiät. [2; 4, s. 103–104.]



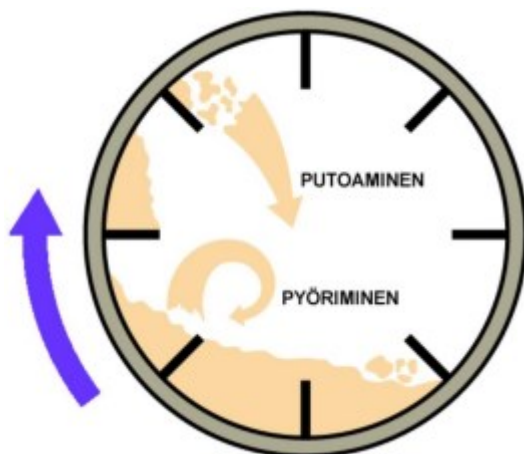
Kuva 7. Jatkuvatoimisen pulperin roottori [8].

Jatkuvatoimista pulperia pitää tyhjentää jatkuvasti, jotteivat epäpuhtaudet tuki sihtilevyä. Pulperoitua massaa pumpataan pulperista rejektin erottimeen, jossa raska epäpuhtausakka putoaa pohjalle ja aksepti jatkaa rumpusihtilevyn läpi varastosäiliöön. Sihtilevyn rejekti ohjataan rumpusihdin läpi, jossa loput raskaasta rejektistä saadaan eroteltua ja aksepti syötetään takaisin pulperiin. [4, s. 103.]

3.2.3 Rumpupulpperi

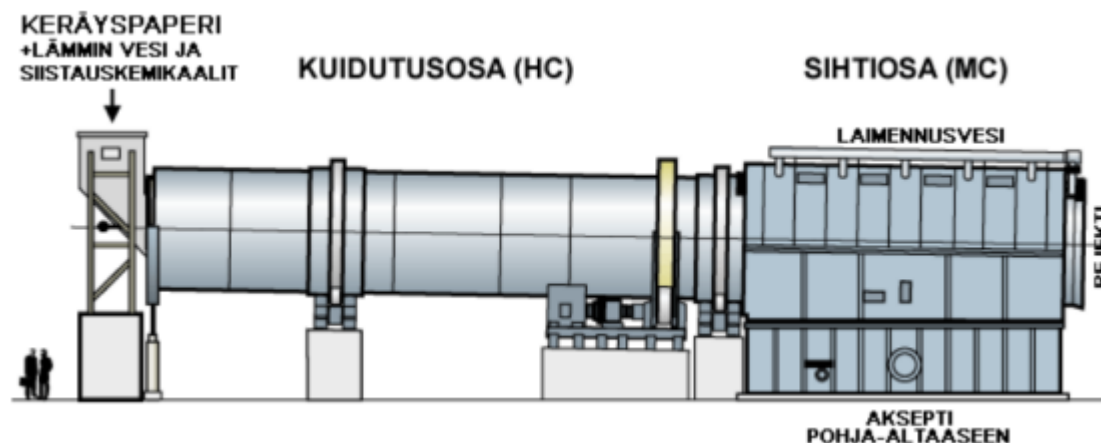
Rumpupulpperissa kuitumassa syötetään rumpuun toisesta päästä lämpimän veden kanssa, jonka lämpötila on yleensä 40–45 astetta. Sen toiminta perustuu siihen, että sulppu kohoaa ensin ylös rummun pyöriessä ympäri ja putoaa sitten

alas, jonka aikana kuitumassa hajoaa hydraulisten voimien luomien pienten pyörteiden ansiosta. Rummussa on laippoja tehostamassa sulpun nousua ylös ja auttamassa pienten pyörteiden muodostumista (kuva 8). [2.]



Kuva 8. Massan liike rumpupulpperin sisällä [2].

Muihin pulpperihin verrattuna rumpupulpperi on huomattavasti hellävaraisempi kuiduille, jolloin liimoja irtoaa vähemmän uusiomassaa käsiteltäessä ja muovit sekä muut kiintoaineet eivät hajoa pienemmiksi. Tämän takia rumpupulpperia käytetään heikompien märkälujuuominaisuuksien massoille, joten rumpupulpperissa voidaan käyttää huonompia massoja. Näitä massoja ovat esimerkiksi sanoma- ja aikakauslehtipaperit sekä ruskeat kuitulaadut. Sulpun sakeus on kuidutusosassa 15–20 %, mikä on korkeampi kuin lajitteluosassa, jossa sulppu laimennetaan 3–5 %. Kuidutusosan korkeampi sakeus tehostaa kuituuntumista, mikä tehostaa painoväriin irtoamista. [2; 4, s. 105]. Erään rumpupulpperin rakenne on esiteltyä kuvassa 9.



Kuva 9. Erään rumpupulperin rakenne [2].

Rumpupulperi toimii jatkuvatoimisena ja koostuu kuidutus- ja lajitteluosista, jotka pyörivät eri suuntiin. Kuidutuspituus on yleensä $2/3$ koko rummun pituudesta. Lajitteluosan siivilän reiät ovat pieniä, yleensä 6–9 mm, jonka läpi sulppu menee kokoomasäiliöön. Pulperin nopeutta voidaan säätää halutun sakeustason ja sulpun koostumuksen perusteella. [2]. Kuvasta 9 voidaan havaita, että rumpupulperi on hieman kallellaan maahan verrattuna. Se pyörii suhteellisen hitaasti, tyypillisesti rumpupulperin kehänopeus on noin 100 m/min. Rummun halkaisija on 2,5–4 m ja pituus on korkeintaan 30 m. Rejekti poistuu pulperista lajitteluosan päästä. [4, s. 104–105].

4 Massan jauhatus ja karkealajittelu

Massan jauhatuksen tarkoituksena on hajottaa pulperissa hajoamattomat kuitukimput yksittäisiksi kuiduiksi. Jauhatuksesta jäljelle jääneet karkeat partikkelit ja epäpuhtaudet ohjataan karkealajitteluun eroteltavaksi yksittäisistä kuiduista. Jauhatuksen ja karkealajittelun osaprosessit riippuvat syötetyn massan koostumuksesta ja epäpuhtauksien määrästä sekä halutun massan loppukoostumuksesta. Näiden prosessien aikana kuidun konsentraation kasvattaminen on mahdollista, mutta kuitujen erottelu lyhyisiin ja pitkiin kuituihin ei ole mahdollista. [4, s. 109.]

4.1 Jauhatus

Jauhatuksella voidaan muokata ja käsitellä sellumassan kuitujen ominaisuuksia mekaanisesti. Jauhatuksella on suuri merkitys kuitujen esikäsitteilyprosessissa, sillä jauhatus parantaa kuitujen sidoskykyä toistensa välillä, millä taataan hyvät paino, tasaisuus ja kestävyys ominaisuudet lopulliselle tuotteelle. Paperin valmistuksessa jauhatus on lähes pakollinen yksikköprosessi, sillä jauhamaton paperi soveltuu vain harvempien laatujen valmistukseen. Jauhatus pilkkoo myös pisimpiä kuituja pienemmiksi, jolloin absorptiokyky, huokoisuus ja optiset ominaisuudet paranevat lopullisessa tuotteessa. Jauhatuksessa tapahtuva fibrillaatio lisää kuitujen vettyneisyyttä. Jauhatus parantaa lopputuotteen repäisyjuutta, mutta heikentää sitä jauhatusta jatkettaessa. [10, s. 87, 89.]

Jauhin koostuu metallisesta, uritetusta roottorista, jonka kiinnitetyt terät pyörivät nopeasti hajottaen jauhimeen pumpattuja kuitukimppuja staattorin ja teräreunojen välissä, missä kuitukimput joutuvat puristuksiin voimakkaiden iskujen seurauksena [10, s. 87]. Kuvassa 10 on kartiojauhimen rakenne, missä sulppu syötetään kapeasta päästä ja jauhettu sulppu poistuu kartion leveämmästä osasta seuraavaan prosessiin [11].



Kuva 10. Kartiojauhimen rakenne [11].

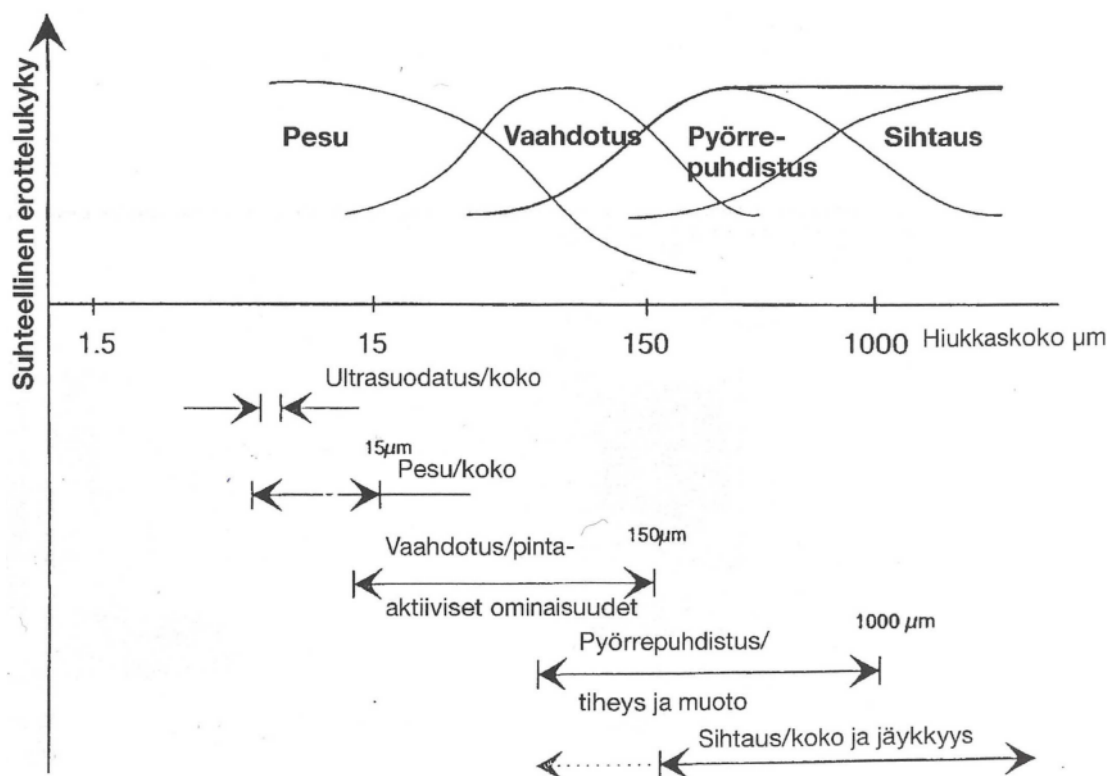
Terien muoto, särmä, väli ja pyörimisnopeus vaikuttavat kimppujen hajoamistulokseen, joten niitä säätämällä voidaan vaikuttaa jauhatuksen lopputulokseen. Niiden optimointi on kuitenkin matemaattisesti haastavaa, koska kuitujen rakenteellisia ominaisuuksia on vaikea ennustaa. [12, s. 94]. Jauhatus toimii matala-, keski- tai korkeasakeudessa, mutta yleisesti jauhatus tapahtuu 3–5 % sakeudessa [9, s.87–88]. Jauhatuksen ominaisenergiankulutus on tyypillisesti 15–25 kWh/t [3, s. 113].

4.2 Karkealajittelu

Karkealajittelun tehtävänä on poistaa massasta epäpuhtauksia ja karkeita partikkeleja. Poistettavat partikkelit ovat jäykät ja taipuisat epäpuhtaudet, jotka eroavat muodoiltaan eri ulottuvuuksissa. Partikkeli voi läpäistä aukon yhdestä suunnasta, mutta sen pitää jäädä kiinni toisesta. Epäpuhtaus jää kiinni, jos se ei kykene läpäisemään reikää ja se ei mahdu läpi edes yhdestä ulottuvuudesta. [4, s. 109.]

Epäpuhtauksia ovat esimerkiksi tahmat, muovit, metallit, kivet ja hiekka. Etenkin uusiomassaa käsiteltäessä muodostuu tahmoja, jotka vaikuttavat negatiivisesti uusiomassan ajettavuuteen ja vaaleuteen. Lajittelumenetelmät ovat usein monivaiheisia prosesseja, koska vain yksi lajitteluaskel ei riitä poistamaan tarpeeksi epäpuhtauksia ja partikkeleja. Lajittelussa käytetään usein erilaisia sihtejä tai korkeasakeuspuhdistimia. [2; 4, s. 134–135.]

Tyypillisiä lajittelulaitteita ovat painelajittimet, pyörrepuhdistimet, flotaatiokennot ja pesurit. Eri lajittelulaitteet sopivat tietyn partikkelikoon lajitteluun ja yleisimmät lajitteluprosessit koostuvat useasti eri lajittelulaitteista, kuten siistausprosessi. Eri lajittelumenetelmien tehokkuudet ovat esiteltynä partikkelikoon funktiona kuvassa 10. [8, s.117.]



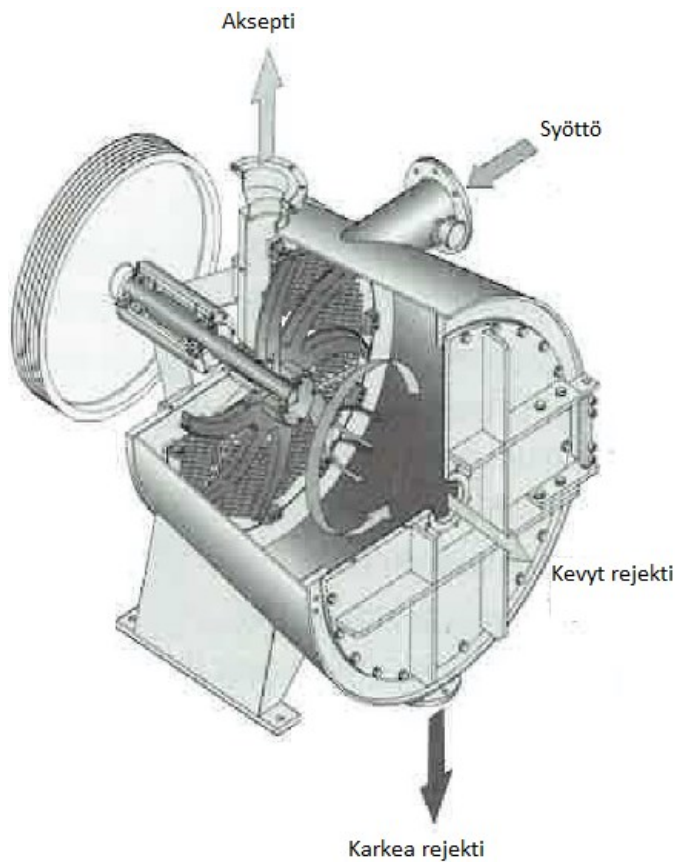
Kuva 10. Lajittelumenetelmien tehokkuus partikkelikokojen funktiona [8, s. 117].

Eräässä uusiomassan siistausprosessissa jälkilajitteluprosessi koostuu kolmesta eri lajittelujärjestelmästä: pyörrepuhdistimilla erotetaan hiekka ja muut raskaat partikkelit, painelajitteluella pienet muovipartikkelit, tahmat ja viimeisenä kevyen rejektin käänteinen pyörrepuhdistus erottaa kuituja kevyemmät partikkelit. [8, s. 69.]

4.2.1 Painesihdit

Painesihdit jaetaan kahteen luokkaan muodon perusteella sylinteri- ja levymalliin. Levypainesihdeissä on suuret 2–3 mm reiät, joiden avulla suurten partikkelien erottelu onnistuu. Levypainesihdissä on roottori, johon reikien läpäisemättömät liian suuret kuitukimput hajoavat. Roottorin tehtävä on myös pumpata sulpua sihdille. Tukeva rakenne ja suuri reikäkoko mahdollistavat sakeiden sulppujen läpiajamisen. Levyn rakenne ja roottorin malli ovat tärkeimmät parametrit levysihdin toiminnalle. Sihdissä oleva rejekti ohjataan rejektinkäsittelyyn. Kuvassa

11 on tyypillisen levyainesihdin rakenne ja toimintaperiaate. [4, s. 109–111, 127.]

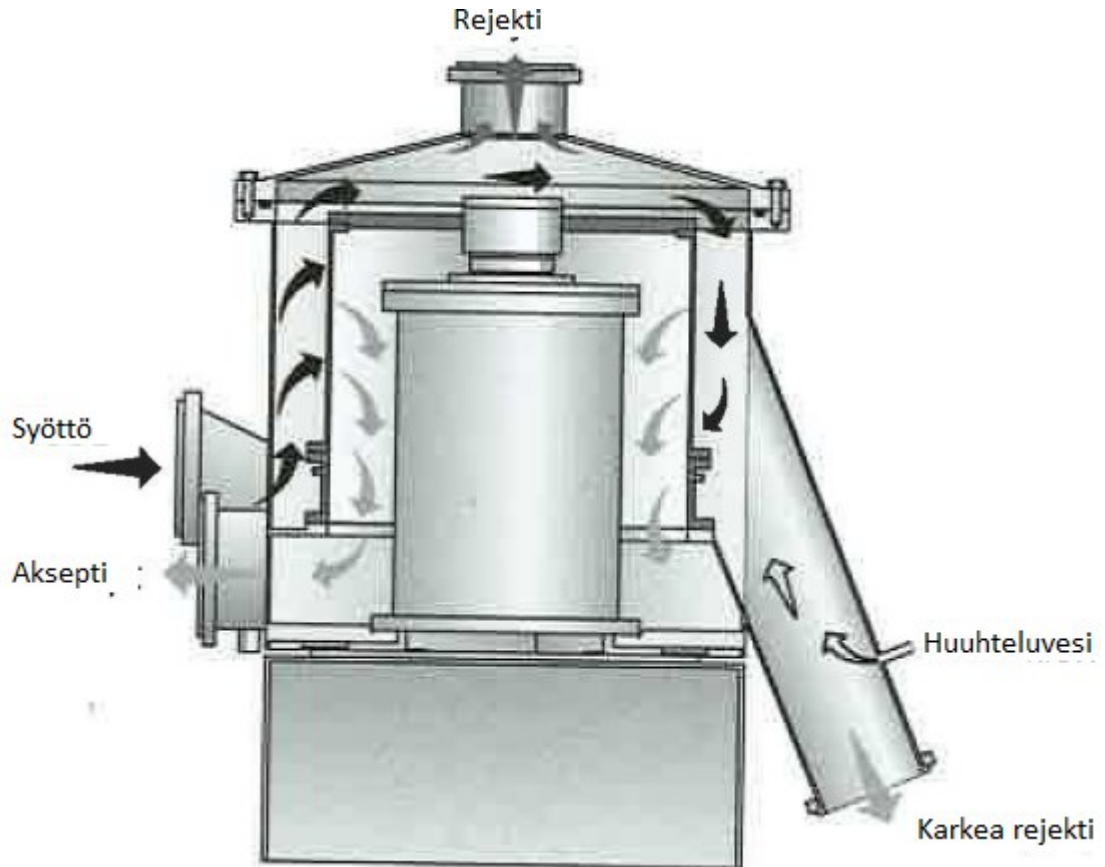


Kuva 11. Tyypillisen levyainesihdin rakenne ja toimintaperiaate [4, s.108].

Sylinteripainesihdeissä on sihtikorit, jonka reiät ovat kooltaan huomattavasti pienempiä. Tyypillisesti halkaisija vaihtelee 0,8–1,5 mm välillä. Pienemmän reikäkoon takia sylinterimäisillä painesihdeillä ei voi käsitellä korkean sakeuden massoja, koska reiät ovat alttiimpia tukkeutumiselle. Sakeus on tyypillisesti alle 5 %, mutta sisältää paljon epäpuhtauksia, jonka takia sensitiiviset sylinteripainesihdit valmistetaan hankausta kestävästä materiaaleista. [4, s. 121–122.]

Sylinteripainesihtejä käytetään usein levyainesihtien jälkeen, koska ne kykenevät hajottamaan isoja kuitukimppuja vain vähän. Roottorin mallilla on suurin vaikutus sylinteripainesihdin toiminnassa. Roottorit jaetaan tyypillisesti kolmeen tyyppiin: Lohkottu, leikattu ja nystymäinen. Roottorin mallilla on suuri vaikutus

sylinteripainesihdin energiankulutukseen. Erään karkelajittelussa käytetyn sylinteripainesihdin toimintaperiaate ja rakenne on esiteltynä kuvassa 12. [4, s. 121–122.]



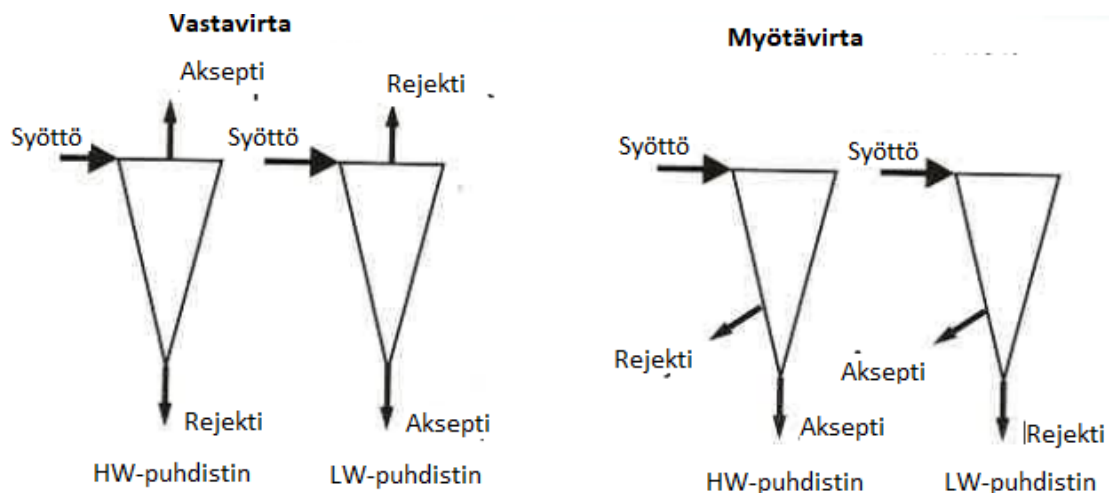
Kuva 12. Eräs karkealajittelussa käytettävän sylinteripainesihdin rakenne ja toimintaperiaate [4, s. 121].

Sulppu syötetään usein sihtikorin sisäpuolelle, josta massa virtaa sihdin läpi ulkopuolelle. Sihti pyörii nopeasti ympäri, jolloin massa pyrkii keskeltä laiduille, tehostaen näin sihdin erotuskykyä. Rejeki kulkeutuu sihdin pohjalle, josta se ohjataan rejektinä pois. Sihdin toiminnan tehokkuuteen vaikuttavat roottorin ja sihtirummun rakenne. [4, s. 121.]

4.2.2 Pyörrepuhdistimet

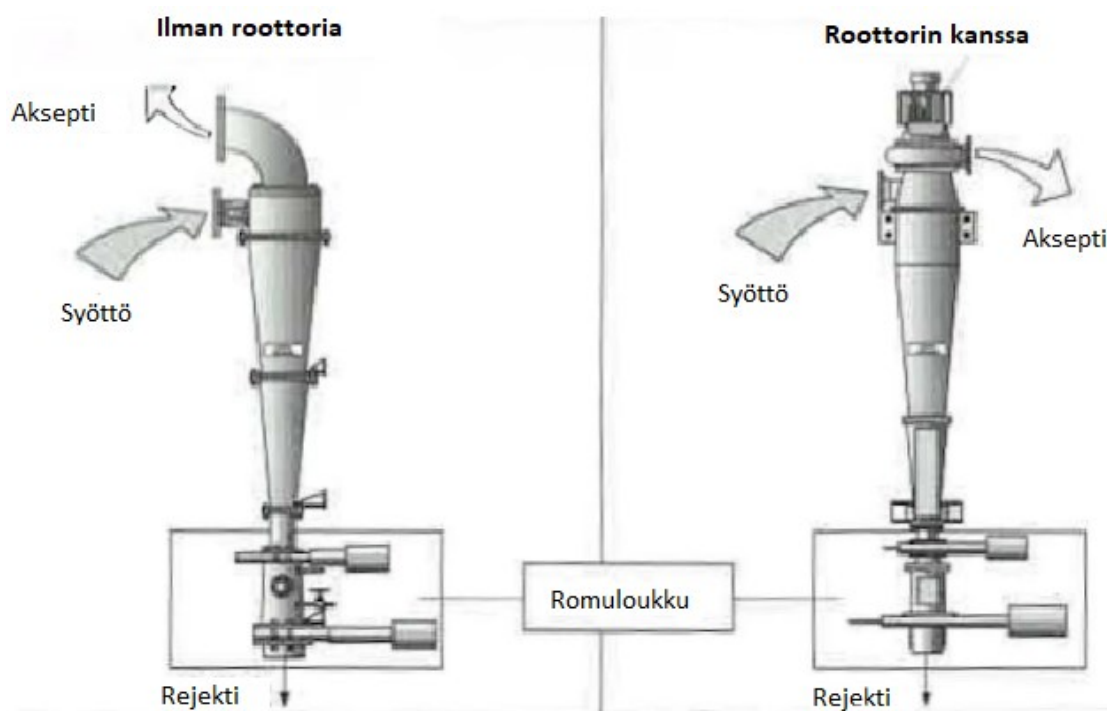
Pyörrepuhdistuksella voidaan poistaa raskaat ja jäykät sekä kevyet ja taipuvat epäpuhtaudet. Näitä voivat olla esimerkiksi hiekka, metalli, vaahtomuovi ja muovi. Erotukseen vaaditaan mahdollisimman suuri tiheysero, jotta se olisi mahdollisimman tehokasta. Pyörrepuhdistimia käytetään usein osana karkealajittelujärjestelmää ja ne on yleensä sijoitettu pulpperoinnin jälkeen. Pyörrepuhdistimet voivat toimia useissa eri sakeuksissa. Pyörrepuhdistimet voidaan jakaa sakeuden perusteella HC-, MC- ja LC-puhdistimiin. [4, s. 134–137, 145.]

Massa syötetään puhdistimen reunalle tangentin suuntaisesti, jotta puhdistimeen muodostuisi pyörivä virtaus. Tällöin kevyet partikkelit jäävät keskelle ja raskaat partikkelit pakkautuvat reunoille. Kevyt keskivirtaus kulkee raskaaseen virtaan nähden vastakkaiseen suuntaan, joka tehostaa partikkeleiden erottamista. Raskaat partikkelit poistuvat rejektinä puhdistimen pohjalta. Kevyt partikkelit nousevat keskellä olevasta aukosta seuraavan osaprosessiin. Puhdistin voi myös joissain tapauksissa toimia myötäväänsä, jolloin kevyet ja raskaat partikkelit ajautuvat puhdistimen alaosaan eroteltavaksi, jossa kevyt virtaama on yhä keskellä ja raskas virtaama yhä laidalla. Myötävirrän etuna on hienompi puhdistamisen tarkkuus, mutta vastavirtapuhdistimiin verrattuna pienempi kapasiteetti, suurempi rejektivirta ja matalampi maksimisakeus. Myötä- ja vastavirtapyörrepuhdistimien toimintaperiaatteet kevyiden ja raskaiden partikkelien poistamiseen ovat esiteltynä kuvassa 13. [4, s. 135–136.]



Kuva 13. Myötä- ja vastavirtapyörrepuhdistimien toimintaperiaatteet kevyiden ja raskaiden partikkelien poistamisessa [4, s. 136].

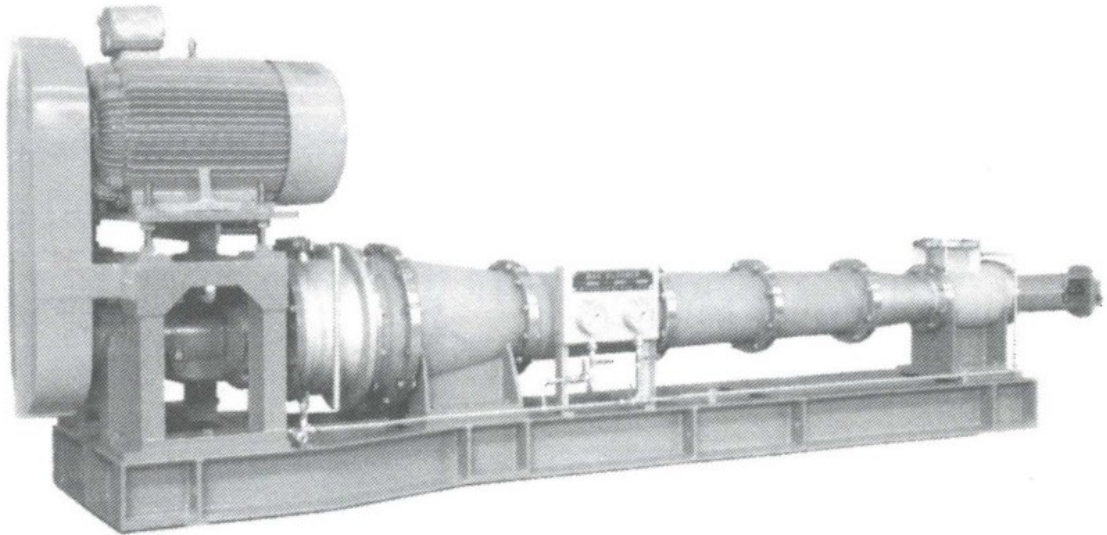
HC-pyörrepuhdistimen käyttötarkoituksena on poistaa selkeästi vettä raskaammat ja yli 1 mm halkaisijaltaan olevat partikkelit. Sitä käytetään usein karkealajittelun esilajittimena. Sakeus on tyypillisesti 2–6 % ja kooltaan pyörrepuhdistimet ovat suuria, jottei rejektiaukko tukkeutuisi. HC-puhdistimet ovat vastavirtapuhdistimia. Roottoreita käytetään syötön vieressä joissain tapauksissa virran pyörimisen kiihdyttämiseksi. Rejektia muodostuu 0,1–1 % syötön massasta, jonka määrä riippuu syötetyn massan ominaisuuksista ja määrästä. HC-puhdistimen toimintaperiaate roottorilla ja ilman on esiteltyinä kuvassa 14. [4, s. 143–144.]



Kuva 14. HC-puhdistimen toimintaperiaate roottorin kanssa ja ilman [4, s. 143].

MC-pyörrepuhdistimessa sakeus on noin 2 %. Erona HC-puhdistimeen on, ettei puhdistimessa ole roottoria ja rejekti poistuu romuloukun kautta. MC-puhdistin operoi tyypillisesti yksivaiheisena. MC-puhdistin ei kykene puhdistamaan kovin hienoa virtausta HC-puhdistimen tavoin. Rejektivirta vaihtelee 0,1–1 % välillä, riippuen massan epäpuhtauksien määrästä. [4, s. 145.]

LC-puhdistimet toimivat selkeästi matalammalla 0,5–1,5 % sakeusalueella ja ne kykenevät erottelamaan raskaat ja kevyet partikkelit toisistaan. Hienomman lajittelutarkkuuden ansiosta LC-puhdistimella voidaan poistaa liimoja, tahmoja, täyteaineita ja muoveja. Eräs suuren kapasiteetin horisontaalinen LC-puhdistin on esiteltynä kuvassa 15. [4, s. 145, 147.]



Kuva 15. Suuren kapasiteetin horisontaalinen LC-pyörrepuhdistin [4, s. 147].

Kapasiteetti on muihin puhdistimiin verrattuna matala, joka laimean sakeuden kanssa nostaa energiantarpeen massatonna kohden korkeaksi. LC-puhdistin on lähes aina jatkuvatoiminen. Rejektin määrä voi olla jopa 30 %, joka on huomattavasti suurempi kuin muissa puhdistintyypeissä. Suuresta rejektimäärästä johtuen LC-puhdistimia tarvitaan useita, josta johtuen yleinen asennusmalli on joko kaskadi tai rinnan. [4, s. 145–146.]

5 Työn suoritus

5.1 Pikapulperointitesti

Paperi- ja kartonkitekiteollisuuden massan arvoketju on ensiluokkaisen hyvä esimerkki massan uusiokäytöstä korkeilla hyötysuhteilla. Uusien paperi- ja kartonkipohjaisten innovaatioiden johdosta paperilla ja kartongilla voidaan korvata

muoveja ja muita perinteisiä pakkausmateriaaleja tulevaisuudessa. Lainsäädäntö asettaa korkeat kierrätysastetavoitteet, joihin yritysten tulee pyrkiä. Korkean kierrätysasteen varmistamiseksi yritysten on varmistuttava erilaisin testimenetelmin massan kierrätettävyydestä, kuten esimerkiksi paperin tai kartongin pulpperointitestillä. [13, s. 2–3.]

Pikapulpperointitestissä paperia hajotetaan kuiduiksi voimakkaassa sekoituksessa desintegraattorissa. Laboratoriomenetelmän on tarkoitus jäljitellä varsinaisia paperin- ja kartonginkierrätysprosesseja mahdollisimman tarkasti, varsinkin hajoamistuloksen mittausparametrien ja kierrätettävyyden arvioinnin varmistuksen tulee vastata varsinaisista prosesseista saatavia tuloksia. Tyypillinen pulpperointitestimenetelmä sisältää seuraavat vaiheet:

- pulpperointi
- sulpun laimennus
- sekoittaminen tasalaatuiseksi
- näytteen kaataminen mittausastiaan
- näytteen kuitujen ja kuitukimppujen määrällinen sekä laadullinen arviointi. [13, s. 6–7.]

Näytteen hajoamisen arviointi tapahtuu arvioimalla näytteestä otettua kuvaa visuaalisesti. Yksittäisten kuitujen ja kuitukimppujen määrää ja laatua arvioidaan referenssikuviiin verraten, minkä perusteella näytteelle annetaan arvosana hajoamistulokselle referenssikuvissa oleviin arvosanoihin perustuen. Hyvä näytteen hajoavuus yksittäisiksi kuiduiksi kertoo hyvästä kierrätettävyydestä, jolloin hyvälaatuisen kierrätyspaperin valmistaminen on mahdollista. Pikapulpperointitestejä suoritetaan laboratorioskaalassa monia eri käyttötarkoituksia varten, kuten tuotannon tai tuotekehityksen laadunvalvontaa varten ja sellunäytteiden valmisteluun kuitunäytteiden ottamista varten. [13, s. 5,7.]

5.1.1 Näytteistä otettujen kuvien arvosanojen määrittäminen

Näytteiden arviointi tapahtuu visuaalisesti jollain sovitulla arvosana-asteikolla. Tässä työssä arviointiasteikko on 1–4. Näytteistä otettuja kuvia verrataan

arvosana-asteikon mukaisiin referenssikuviiin, minkä perusteella näytteelle annetaan referenssikuvaa vastaava arvosana. Arvosanan 1 saa näyte, joka on hajonnut täysin yksittäisiksi, pitkiksi kuiduiksi. Pienet, pistemäiset kuitukimput kertovat, että näyte on hajonnut pääsääntöisesti melko hyvin. Huonosti hajonnut näyte saa arvosanan 3 tai yli, jos näytteessä on isoja, hajoamattomia palasia. Mikäli näyte ei vastaa kuitujen osalta määrällisesti ja laadullisesti mitään referenssikuvista, voidaan näytteelle antaa väliarvosanoja, kuten 1+, 2,5 ja 4-. Arviointiluokat on jaettu pääosin näytteiden kuitujen laadun, ei kuitukimppujen määrän perusteella. Kuvassa 16 on esimerkki pistemäisestä kuitukimpusta, joka on ympyröity kuvassa punaisella värillä. Kuvan näyte on hajonnut melko hyvin, joten näyte on saanut arvosanan 2-.



Kuva 16. Eräs pikapulpperoitu näyte, joka on saanut arvosanan 2-. Esimerkki pistemäisestä kuitukimpusta on ympyröity punaisella värillä.

Kuvassa 17 on esimerkki huonosti hajonneesta näytteestä, joka on saanut arvosanan 3,5. Kuvasta voi selkeästi havaita isoja, hajoamattomia kuitukimppuja, mistä esimerkiksi yksi on ympyröity punaisella värillä.



Kuva 17. Eräs huonosti hajonnut näyte, joka on saanut arvosanan 3,5. Esi-merkki huonosti hajonneesta kuitukimpusta on ympäröity punaisella.

Käytännössä lähes kaikki näytteet sisältävät kaikkia kuitutyyppejä: pistemäisiä, huonosti hajonneita kuitukimppuja ja yksittäisiä kuituja. Lisäksi astian seinään jääneet, hajoamattomat palaset lisäävät arviointituloksen epävarmuutta. Tarkan arvosanan määrittäminen vaikeutuu näissä tapauksissa ja arvosana painottuu huonompien kuitutyypin perusteella.

5.1.2 Vanha pikapulperointitestimenetelmä

Vanhassa pikapulperointitestimenetelmässä 10 g näytettä hajotetaan 10 min ajan brittiläisessä desintegraattorissa litran vesimäärässä, jossa veden lämpötila on 40 °C. Näyte laimennetaan pulperoinnin jälkeen 0,25 % sakeuteen lisäämällä 3 litraa vettä. Näytettä sekoitetaan 3 min ajan, minkä jälkeen sulpusta otetaan 0,4 l tummapohjaiseen astiaan kuvan ottamista varten. Kuvan ottaminen tapahtuu vakioituissa olosuhteissa valaistuksen, kameran ja näyteastian suhteen.

Vanhan menetelmän mukaisen pikapulpperointitestin ongelmana on korkea sakeus näytteestä otetussa kuvassa, mikä johtaa liian korkeaan kuitujen saturaatioon. Tällöin kuvia on haastava tulkita, koska vaaleita kuituja on vaikea erottaa toisistaan. Vanhan menetelmän pulpperointisakeus on myös matala, mikä ei vastaa tuotannossa tapahtuvaa pulpperointia, jossa sakeus on selkeästi korkeampi. Vanha menetelmä täytyy ylösskaalata vastaamaan paremmin tuotannon sakeutta, koska kuitujen hajoaminen on parempaa korkeammassa sakeudessa. Lisäksi vanha arviointiasteikko on epätarkka arvosanaväleissä, koska vanhat arviointikuvat sisältävät vain arvosanoja 1, 2, 3 ja 4 vastaavat kuvat.

5.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena oli tehdä uusi pikapulpperointitestien arviointiasteikko ja selvittää eri toimipisteissä sekä eri arvioijien toimesta tehtyjen pikapulpperointitestien tuloksien erojen tilastollisten merkitsevyys. Työn suoritus jakautui kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa kehitettiin nykyisestä, tuotekehityksessä käytössä olevasta pulpperointitestistä sellainen, että se voitiin ottaa käyttöön tuotannon laadun valvonnassa eri toimipaikoissa ja ylösskaalattiin pikapulpperointitesti siten, että vanha arviointiasteikko on yhteneväinen uuden kanssa. Ensimmäinen vaihe sisälsi kolme välivaihetta: seitsemän näytteen pikapulpperointi kalibrointikuvia varten, uusien luokittelukuvien kalibrointi vanhalla menetelmällä tehtyjen kuvien perusteella ja ylösskaalatun testin optimaalisen hajoamisajan määrittäminen. Toisessa vaiheessa tutkittiin eri toimipisteissä suoritettujen testien tulosten eroja.

5.3 Työssä käytetyt pikapulpperointitestimenetelmät, koelaitteisto ja materiaalit

Työssä käytettiin yhteensä kolmea eri pikapulpperointitestimenetelmää kokeellisen osuuden kummassakin vaiheessa. Työssä käytettiin vanhaa, korkean laimennussakeuden menetelmää, uutta, matalan laimennussakeuden menetelmää ja uudesta menetelmästä ylösskaalattua menetelmää. Työssä käytettyjen pikapulpperointitestimenetelmien parametrit ovat esiteltyinä taulukossa 1.

Taulukko 1. Työssä käytettyjen pikapulperointitestimenelmien pulperointiajat, veden lämpötilat, näytteiden massat, pulperointitilavuudet ja näytteen laimennussakeudet.

Menetelmä	Vanha	Uusi	Uusi, ylöskaalattu
Pulperointiaika (min)	10	10	8
Veden lämpötila (°C)	40	40	40
Näytteen massa (g)	10	10	50
Pulperointitilavuus (l)	1	1	2
Näytteen laimennussakeus (%)	0,25	0,1	0,1

Näytteiden pulperointiin käytettiin toimipaikassa A brittiläistä desintegraattoria, jonka malli oli Lorentzen & Wettre 260 (kuva 18). Desintegraattori täyttää standardi ISO 5263-1 mukaiset vaatimukset laboratorioskaalan märkähajotukseen. Desintegraattori koostuu kahdesta osasta: vertikaalisesti siirtyvästä yläosasta ja tukevasta alaosasta, johon pulperointiastia laitetaan. [14]. Toimipaikassa B käytettiin Mavis Engineering Ltd valmistamaa British Pulp Evaluation Apparatus –mallista desintegraattoria, joka on rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan paikassa A käytettyä desintegraattoria vastaava.



Kuva 18. Toimipaikassa A oleva brittiläinen desintegraattori Lorentzen & Wettre 260.

Kaikki 15 näytettä olivat satunnaisesti valittuja paperilaatuja, joilla oli erilaiset ominaisuudet ja käyttökohteet. Kaikki näytteet leikattiin 2x2 cm paloiksi vakioituissa olosuhteissa lämpötilan ja ilmankosteuden osilta, jonka jälkeen näytteet pakattiin Minigrip-pusseihin näytteiden kosteuden pitämiseksi vakiona. Kuvien ottamiseen käytetyt välineistöt olivat vakioituja paikoissa A ja B, valaistusta lukuun ottamatta. Pulppereissa käytettiin pulpperointivetenä yhdyskuntavettä.

5.4 Arviointikuvien ottaminen uudella ja vanhalla menetelmällä

Uusien arviointikuvien määrittystä varten suoritettiin pikapulpperointitestit seitsemälle erilaiselle 10 g näytteelle vanhalla testimenetelmällä. Massaa hajotettiin

10 min ajan desintegraattorissa litran vesimäärässä, jonka jälkeen sulppu laimentettiin 0,25 % sakeuteen. Laimentamisen jälkeen sulpusta otettiin näyte kuvan ottamista varten.

Samoille seitsemälle näytteelle suoritettiin pikapulpperoointitestit myös uudella menetelmällä ja otettiin kuvat vertailua varten. Näytteet valittiin siten, että saataisiin mahdollisimman erilaisia arviontikuvia. Uuden menetelmän mukainen, laimeampi sakeus (0,1 %) säädettiin sekoitusvaiheen aikana, jossa vanhan menetelmän mukaista pulpperoinnin jälkeistä sulpua sekoitettiin ensin kolmen minuutin ajan, jonka jälkeen sakeus säädettiin halutulle tasolle lisäämällä vettä. Tällöin tilavuus pysyi lähes vakiona vanhaan menetelmään verrattuna (4 l ja 3,75 l), jonka ansiosta sekoittamisen geometria muuttui vain hieman. Sekoitusgeometrian vakioimisella sulpun koostumus pysyi lähes vakiona vanhaan menetelmään verrattuna. Näytteitä sekoitettiin laimentamisen jälkeen 3 min ajan, jonka jälkeen otettiin kuvat näytteistä.

5.5 Uusien arviontikuvien kalibrointi ja uuden arviontiasteikon määrittäminen

Arvioijat arvioivat vanhalla menetelmällä tehtyjen testien kuvat. Arvioijiin kuului neljä työntekijää ja insinööriä. Arvioinnit suoritettiin niin, että arvioijat eivät olleet tietoisia toistensa arvioinneista tai näytekoostumuksista. Arviointien tuloksien avulla määritettiin eri arvioijista johtuva arvosanoerojen tilastollinen merkitsevyys. Uudella menetelmällä tehtyjen testien kuvia verrattiin vanhalla menetelmällä tehtyjen testien kuviin, jotta varmistettiin menetelmien kuvien olevan yhteneväisiä keskenään. Vanhalla menetelmällä tehtyjen testien arvosanoista määritetään myös arvioijista johtuvaa hajontaa työn toista vaihetta varten.

Uuden menetelmän testien seitsemästä kuvasta muodostettiin uusi arviontiasteikko. Uusien kuvien arvosanojen oletettiin vastaavan vanhalla menetelmällä tehtyjä kuvia, mutta niiden vastaavuuden vanhalla menetelmällä otettuihin kuviin arvioi insinööri ja yksi työntekijä. Uuteen arviontiasteikkoon oli tarkoitus saada enemmän arviontikuvia kuin vanhassa menetelmässä oli, jotta

asteikon välejä esim. 1+, 2,5 ja 4- voidaan hyödyntää arvioinnissa paremmin. Uusien arviointikuvien arvosanat määritettiin uusien kuvien arviointien keskiarvon perusteella. Uutta arviointiasteikkoa on tarkoitus hyödyntää jatkossa pulpperoointitestien arvioinneissa sekä työn myöhemmissä vaiheissa.

5.6 Uuden menetelmän ylösskaalaus

Ylösskaalattua menetelmää varten pikapulpperoointitestin hajotusaikaa ja tilavuutta piti muokata, jotta ylösskaalatussa tulos vastaisi kunkin näytteen tulosta edellisestä vaiheesta. Ylösskaalatussa menetelmässä näytteen koko kasvatettiin 50 g:aan ja edellisestä vaiheesta valittiin kaksi näytettä käytettäväksi ylösskaalausvaiheeseen edellisen vaiheen hajoamistuloksen perusteella. Vedен lämpötila pidettiin vakiona, mutta tilavuus nostettiin 2 l ja hajotusaikoina olivat 5, 8 ja 11 min. Toiselle näytteistä tehtiin kolme toistokoetta 8 min ajalla, jotta samalla laitteella tehtävien kokeiden toistettavuus saatiin määritettyä. Optimaalinen hajotusaika määritettiin laskennallisesti, jotta se vastaisi samaa tulosta kuin uudella menetelmällä. Hajotusajan paikkansapitävyys varmistettiin varmistuskoekiden avulla lasketussa hajotusajassa, jossa ajassa suoritettiin viisi toistokoetta.

5.7 Ylösskaalatun menetelmän verifiointi eri toimipaikoissa

Työn toisessa osassa oli tavoitteena selvittää eri toimipaikoissa suoritettujen testien eroavaisuuksia, koska eri toimipaikoissa on eri laitteet ja arvioijat. Tällä oli tarkoitus simuloida eri tehtailta tehtäviä tuotannon laadunvalvonnan pikapulpperoointitestejä. Apuna käytettiin aiemmista vaiheissa saatuja tuloksia ja tunnuslukuja, kuten arvioijasta ja toistoista johtuvat hajonnat. Ylösskaalattulla menetelmällä tehtiin testit kahdessa eri paikassa 12 näytteellä, joista neljä näytettä olivat samoja kuin ensimmäisessä vaiheessa. Toinen koepaikoista oli sama kuin ensimmäisessä vaiheessa käytetty. Saadut tulokset analysoitiin tilastollisten menetelmien avulla.

6 Tulokset

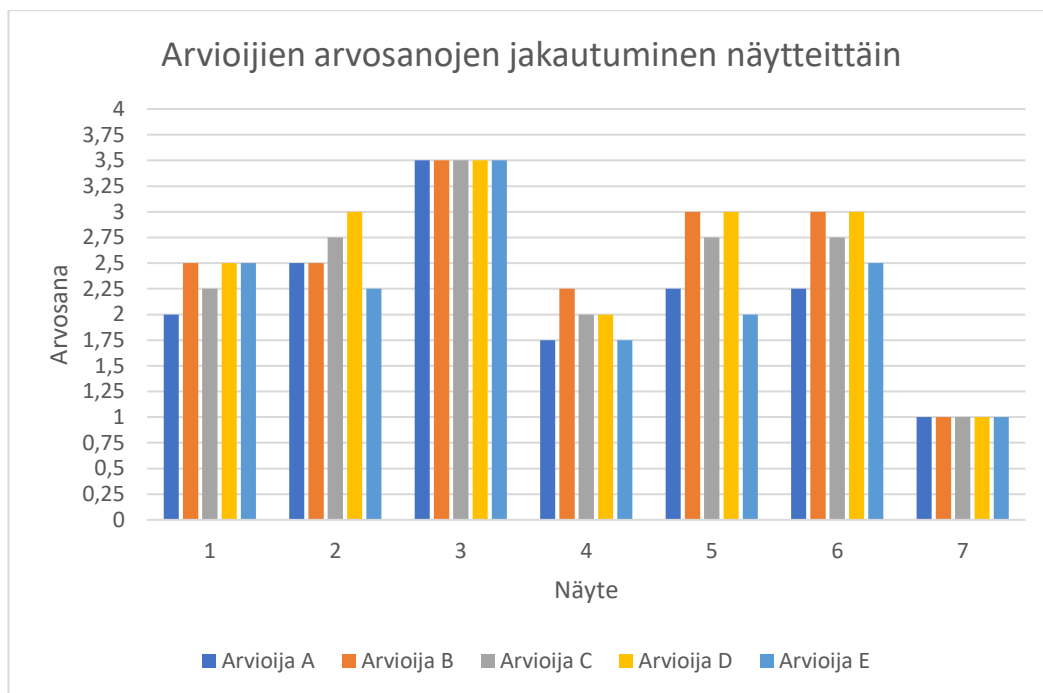
Tässä luvussa on esitelty ensimmäisen vaiheen eli uusien arviointikuvien määrittämisen tulokset, jotka oli tehty uudella menetelmällä, ja uuden menetelmän ylösskaalauksen tulokset optimaikaa määrittämällä siten, että hajotuksen arvosana pysyy samana. Toisen vaiheen eli eri toimipaikoissa suorittujen testien tulokset ovat myös esitelty tässä luvussa. Ensimmäisen ja toisen vaiheen tuloksia tarkasteltiin tilastollisilla menetelmillä tilastollisesti merkitsevien erojen selvittämiseksi eri arvioijista, toistokokeista ja eri toimipaikoista.

6.1 Uusien arviointikuvien määrittäminen ja testimenetelmän ylösskaalaus

Ensimmäisenä suoritettiin pikapulpperoointitestit vanhalla menetelmällä seitsemälle näytteelle. Samat seitsemän näytettä pikapulperoitettiin myös uuden menetelmän laimeampaan sakeuteen. Uudella menetelmällä tehdyissä kuvissa havaittiin enemmän heijastuksia, mutta yksittäiset kuidut olivat selkeämmin havaittavissa eikä kuitujen suuri määrä tehnyt kuvista liian saturoituja.

6.1.1 Näytteiden hajoamistulokset 1. vaiheessa

Uusien kuvien kalibrointi-arviot tehtiin korkeammassa sakeudessa vanhalla menetelmällä. Arvioijien antamat arvosanat vanhalla menetelmällä tehdyille luokitelukuville ovat esiteltyinä kuvassa 19.



Kuva 19. Arvioijien antamien arvosanojen jakautuminen näytteittäin.

Arviointien keskiarvoista muodostettiin uusi arviointiasteikko, jota on tarkoitus käyttää työn muissa vaiheissa ja pulpperointitestien arvioinnissa jatkossakin. Arvosanojen keskiarvon perusteella muodostetun uuden arviointiasteikon arvot ovat järjesteltyinä taulukossa 2 hyvin hajoavasta heikommin hajoavaan.

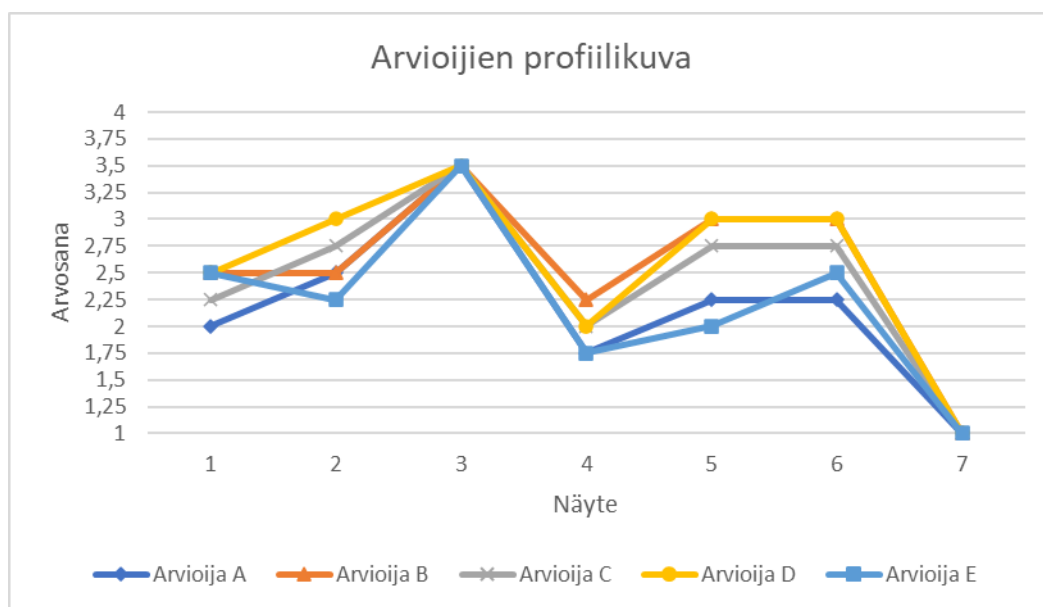
Taulukko 2. Arviointien keskiarvon perusteella muodostettu uusi arviointiasteikko

Näyte	Keskiarvo	Arviointiasteikon luokitus
7	1	1
4	1,95	2
1	2,35	2+
2	2,6	2,5
5	2,6	2,5
6	2,7	3–
3	3,5	3,5

Asteikolla on vaihtelevia arvosanoja välillä 1–3,5. Näytteet 2 ja 5 saivat kummatkin 2,5 luokituksen. Näyte 6 päätettiin poistaa lopullisesta arviointias- teikosta, koska sen hajoamistulos on lähes identtinen näytteiden 2 ja 5 kanssa, vaikka kuva ja arvosana olivat lähes samoja ja enempää kuvia samasta arvosa- nasta eri tarvittu. Syynä näytteiden 2 ja 5 samaan arvosanaan voi olla kuitujen laadun ja määrän eroaminen ennen kokeita oletuista tasoista tai eri arvioijien antamien arvosanojen epäluotettavuus.

6.1.2 Profiilikuva arvioijista

Profiilikuvan avulla voitiin havaita arvioijien välisiä eroja helpommin. Arvioijien arvosanoista piirrettiin profiilikuva, josta voidaan havaita, onko arvioijien linja yh- tenäinen vai ei. Profiilikuva arvioijien arvioinneista on esiteltyä kuvassa 20.



Kuva 20. Profiilikuva kuvien arvioinneista.

Kuvien arvioinneista tehdystä pylväskuvaajasta (kuva 20) ei voi havaita selke- ästi, että eroaako jokin arvioija huomattavasti linjasta arvosanojen osalta. Linja on täysin yhtenäinen näytteiden 3 ja 7 osalta, mutta muiden näytteiden osalta hajontaa arvosanoissa löytyy. Suurin ero on näytteessä 5, jossa arvosanat ovat jakautuneet arvosanojen 2 ja 3 välille.

6.1.3 Friedman-testi

Friedman-analyysi soveltuu järjestysasteikollisille koetuloksille eikä vaadi normaalijakautuneisuutta. Testin avulla saadaan selville, onko arvioijien välillä tilastollisesti merkitsevää eroa. [15]. Tätä varten määritettiin tutkimushypoteesit, jotka ovat esiteltynä taulukossa 3. Nollahypoteesi (H_0) on, että arvioijien välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa.

Taulukko 3. Friedman-testin hypoteesit

Hypoteesit	
H_0	Arvioijien välillä ei ole eroa.
H_1	Ainakin yhden arvioijan arviot eroavat muiden arvioijien arvioista.

Friedman-testi suoritettiin IBM SPSS –taulukkolaskentaohjelmalla ja testin tulokset ovat esiteltynä liitteessä 1. Friedman-testin p-arvoksi saatiin 0,010, joten nollahypoteesi hylätään jopa 95 % luottamustasolla. Tuloksesta voidaan päätellä, että arvioijien välillä on tilastollisesti merkitsevää eroa.

6.1.4 Ylösskaalatun menetelmän hajotusajan määrittäykokeet

Arvosanan 2 alue on pulperoitumiselle ja massan hajoamisen tulkinnalle kriittistä aluetta, koska hyvin hajonneita kuituja ja pieniä kuitukimppuja voidaan havaita runsaasti. Tämän takia kaksi näytettä valittiin kuvien perusteella annettujen arvioiden keskiarvon perusteella tähän vaiheeseen, koska tässä vaiheessa oli tarkoitus arvioida hajoamistulosten toistettavuutta ylösskaalatulla pulperointimenetelmällä. Näytteet 1 (arvosana 2+) ja 6 (arvosana 3–) soveltuivat tähän parhaimmin aiemmista kuvista, koska niiden arvosanat olivat lähellä arvosanaa 2, mutta eivät liian lähellä toisiaan arvosanojen perusteella. Hajotusajan ja laitteesta johtuvan hajonnan selvittämiseksi suoritettiin taulukon 4 mukaiset kokeet ylösskaalatulla 50 g menetelmällä:

Taulukko 4. Ylösskaalatun menetelmän hajotusajan määrityskokeet

Aika, min	Näyte	Arvosana
11 min	1	2
	6	2,5
8 min	1	2+
	1	2+
	1	2+
	6	3–
5 min	1	2,5
	6	3

Oletettiin, että arvosanojen ja hajotusajan välillä on lineaarinen yhteys. Taulukon 4 ylösskaalaukokeiden arvosanat esitettiin ajan funktiona graafisesti, jolloin voitiin määrittää optimaalinen hajotusaika kummallekin näytteelle käyttäen hyväksi lineaarisuutta. Optimaalinen hajotusaika valittiin siten, että arvosanoiksi tuli sama kuin 10 g näytteillä. Kummallekin näytteelle saatiin optimaaliseksi hajotusajaksi 8 min. Optimaalisen hajotusajan määrittämiseksi käytetty kuvaaja on esiteltyä liitteessä 2.

Hajotusajan varmituskokeet suoritettiin näytteelle 6, koska näytteelle 1 oli jo tehty samassa 8 min ajassa kolmen toistokokeen sarja, jolloin näytteiden 1 ja 6 hajoamistuloksia voi verrata keskenään samoissa olosuhteissa tarkemmin. Toistokokeiden optimaalinen määrä laskettiin power t -testin avulla R-ohjelmassa, jonka tulokset ovat esiteltyä liitteessä 3. Näytteen 1 (taulukko 4) mukaista 8 min ajalla suoritettujen toistojen keskihajontaa ei power t-testissä käytetty, koska arvosanat ovat järjestysasteikollisia, jolloin todellinen hajonta ei välttämättä käy ilmi. Tästä johtuen keskihajonnaksi valittiin neljännesarvosana eli 0,25. Power t-testin oletuksena on, että arvosanojen jakautumisen pitää noudattaa normaalijakaumaa. Power t -testistä saatiin toistokokeiden määräksi 4,2, joka pyöristettiin viiteen kokeeseen. Varmistuskokeiden arvosanat ovat esiteltyä taulukossa 4.

Taulukko 5. Varmistuskokeiden arvosanat

Varmistuskokeiden arvosanat	
Näyte	Arvosana
6A	2+
6B	2+
6C	2+
6D	2+
6E	2+

Taulukosta 5 voidaan havaita, että näytteiden saamat arvosanat varmistuskokeissa ovat hyvin toistettavia. Varmistuskokeiden tulokset arvioi vain yksi arvioija, mikä johtaa subjektiivisiin arvosanatuloksiin. Tuloksista voidaan silti päätellä, että tulokset ovat hyvin toistettavissa. Varmistuskokeista otetuissa näyte kuvissa oli hieman eroja, mutta erot eivät olleet niin suuria, että toisenlaisia arvosanoja olisi pitänyt antaa.

6.2 Ylösskaalatun menetelmän testien toistettavuus eri toimipisteissä

Eri toimipaikoissa suoritettujen testien toistettavuuden selvittämiseksi suoritettiin 12 näytteen pikapulpperointitestit kahdessa eri toimipaikassa ylösskaalatulla menetelmällä. Näytteistä otetut kuvat arvioi sama arvioija ja testit suoritti sama tekijä kummassakin toimipaikassa, mutta laitteet olivat erilaisia. Neljä näytteistä olivat samoja kuin ensimmäisessä vaiheessa. Tavoitteena oli selvittää eri toimipaikasta johtuvien arvosanaerojen tilastollinen merkitsevyys. Kahdessa eri toimipaikassa ylösskaalatulla menetelmällä suoritettujen testien tuloksiksi saatiin taulukon 6 mukaiset tulokset.

Taulukko 6. Kahdessa eri paikassa ylösskaalatulla menetelmällä suoritettujen testien arvosanat.

Näyte	Arvosana	
	Paikka A	Paikka B

1	2+	2+
2	3–	3–
4	2+	2
6	2,5	2,5
8	2	2+
9	1	1+
10	2+	2,5
11	3	3+
12	3,5	3,5
13	2,5	3–
14	1	1
15	4–	4–

Taulukosta 5 voidaan havaita, että eri toimipaikoissa tehtyjen testien tuloksilla oli vain hieman eroavaisuuksia. Arvosanat eroavat näytteillä 4, 8, 9, 10, 11 ja 13, joiden kaikkien arvosanaero on 0,25. Paikassa B saatiin korkeammat arvosanat näytteille ja näyte 4 oli suurempi paikassa A. Hajoamattomia paloja oli paikassa A näytteillä 2, 9 ja 10 noin 20–50 palan verran sekä näytteillä 12 ja 15 oli paikassa B hajoamattomia palasia 30 ja 40 kappaletta.

6.3 Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi

Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi on parametriton, kaksisuuntainen, parillisen t-testin vastine, jossa havaintojen ei tarvitse olla normaalisti jakautuneita ja otoskoko voi olla pieni, tyypillisesti $n < 30$. Otosten on kuitenkin oltava riippuvaisia. Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi soveltuu hyvin järjestysasteikollisille muuttujille. Testillä voidaan selvittää, eroavatko kahdessa eri toimipaikassa suoritettujen pulpperointitestien arvosanat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. [16, s. 19–20]. Testin hypoteesit ovat esiteltynä taulukossa 7.

Taulukko 7. Wilcoxonin testin hypoteesit

Hypoteesit	
H ₀	Kahden toimipaikan pulpperointitestien arvosanoilla ei ole eroa.
H ₁	Kahden toimipaikan pulpperointitestien arvosit eroavat toisistaan.

Testin p-arvoksi saadaan 0,1025 (liite 4), jolloin 95 % luottamustasolla nollahypoteesiä ei hylätä. Kahdessa eri toimipaikassa suoritettujen uuden menetelmän mukaisten pikapulpperointitestien tulosten välillä ei ole tilastollisesti merkitsevää eroa.

6.4 Luotettavuus ja virhelähteet

Kaikkien näytteiden oletetaan olevan yhtä toistettavia uuden menetelmän ylöskaalausvaiheen varmistuskokeissa, jolloin optimiajan määrittämisessä vain yhdeltä arvosanalukalta otetut näytteet antavat tietyn optimiajan, mutta optimaalinen hajotusaika ei välttämättä päde lähellä arvosanaa 4. Toimipaikassa A valaistus oli huomattavasti kirkkaampi, mikä johti paikan A kuvien kuitujen olevan helpommin luettavissa.

Osa näytteistä ei hajonnut täysin, mikä oli huomattavaa varsinkin ylöskaalattulla menetelmällä tehdyissä kokeissa, joissa saattoi jäädä jopa 50 kappaletta hajoamattomia palasia desintegraattorin astian seinille. Teoriassa kuitujen pitäisi hajota paremmin sakeuden kasvaessa. Ylöskaalatun menetelmän näytteet olivat 5-kertaa suurempia paperimäärältään kuin alkuperäisessä menetelmässä, joten hajoamattomien palasien absoluuttisesti suurempi määrä vaikuttaa vain vähän annettuihin arvosanoihin. Näytteistä otettuihin kuviin tällä ei ollut suurta merkitystä, koska kuvista havaitaan laadullisesti, miten hyvin näyte on hajonnut yksittäisiksi kuiduiksi.

Toistokokeiden luotettavuutta olisi voinut parantaa siten, että testit olisi suorittanut eri tekijä kuin arvioija. Toistokokeiden luotettavuutta heikensi arvioija tietoisuus näytteen aiemmasta arvostuksesta. Arvioijan tietoisuus aiemmasta

arvosanasta ja testin tekijän ollessa sama kuin arvioija jää todellinen vaikutus toistokokeiden arvosanoihin määrittelemättömäksi.

Myös eri toimipaikoissa suoritettujen testien tuloksien riippumattomuutta heikentävät seuraavat tekijät: näytteet valmisti ja arvioi sama tekijä, joten vain laitteisto erosi eri toimipaikkojen välillä. Näillä tekijöillä suuri merkitys tulosten luotettavuuden kannalta, koska eri arvioijista johtuva arvosanaero voi olla ensimmäisen vaiheen tuloksien perusteella jopa yhden arvosanan verran. Tuloksien riippumattomuutta olisi voitu parantaa sillä, että testit olisivat tehneet eri tekijät eri toimipisteissä ja useampi arvioija olisi arvioinut kuvat.

7 Yhteenveto

Tämän oppinäytetyön kokeellisessa osuudessa saatiin määritettyä uusi arviointiasteikko laimeammasta sulpusta otetuilla näytteillä ja varmistettua sen paikkaansa pitävyyttä vanhaan menetelmään verrattuna. Uusi menetelmä saatiin ylöskaalattua optimaalista hajotusaikaa muuttamalla, jotta hajoamistulokset olisivat yhteneväisiä vanhan menetelmän kanssa. Ylöskaalatun menetelmän hyvä toistettavuus saatiin todennettua ja ylöskaalatun menetelmän testien tulosten luotettavuus saatiin määritettyä.

Eri arvioijista johtuva ero oli tilastollisesti merkitsevä Friedman-testin tuloksen perusteella, p -arvo 0,010. Syitä tilastollisesti merkitsevään eroon voi olla useita, mutta suuri vaikutus on ainakin vanhojen arviointikuvien pienellä määrällä. Arvioijien arvosanaeroja samalle näytteelle voisi vähentää esimerkiksi kouluttamalla arvioijia arvioimaan yhdenmukaisemmin. Toistokokeiden hajonta on arvosanojen perusteella lähes olematonta, mutta kuvien perusteella hajontaa oli hieman. Ylöskaalatun menetelmän testien tulokset eivät eronneet toisistaan merkitsevästi eri toimipaikoissa, koska Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa, koska eri toimipaikoissa samat henkilöt suorittivat testit, joten toimipaikoissa erosivat lähinnä vain laitteisto.

Uuden arviointiasteikon kattavuutta voisi parantaa lisäämällä siihen arviointikuvia, joiden arvosanat olisivat yhden ja kahden välillä sekä kolmen ja neljän välillä. Arviointiasteikon täydentäminen ei kuitenkaan ole välttämätöntä, koska arvosanat 1–2 välillä ovat helposti tunnistettavissa ja arvosanat 3–4 ovat erittäin epätoivottuja pakkausmateriaalilta.

Työssä päästiin sille asetettuihin tavoitteisiin ja ylösskaalattua menetelmää sekä uutta arviointiasteikkoa voidaan käyttää jatkossa tuotannon laadunvalvonnassa pikapulpperointitestien hajoamistulosten arvioimiseen.

Lähteet

- 1 About us. Verkkoaineisto. Paptic, Inc. <<https://paptic.com/company/>>. Luettu 19.9.2022.
- 2 KnowPap Oy. Paperin ja kartongin valmistus – tiivistelmä. Verkkoaineisto. Luettu 19.7.2022.
- 3 Häggblom-Ahnger, Ulla & Komulainen, Pekka. 2003. Paperin ja kartongin valmistus. 3., uudistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.
- 4 Göttshching, Lothar & Pakarinen, Heikki. 2000. Papermaking Science and Technology: Book 7: Recycled Fiber and Deinking. 1st ed. Jyväskylä: Gummerus Printing.
- 5 Ragger Grapple Cutting Machine for Continuous Pulping System. Verkkoaineisto. Weifang Greatland Machinery Co. Ltd. <<https://glmachinery.en.made-in-china.com/product/hKBEujlOEnYX/China-Ragger-Grapple-Cutting-Machine-for-Continuous-Pulping-System.html>>. Luettu 29.7.2022.
- 6 Delgado Sancho, Luis; Giner Santonja, German; Klein, Gabriele; Kourti, Ioanna; Rodrigo Gonzalo, Miguel; Roudier, Serge & Suhr, Michael. 2015. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. 1st ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- 7 Karlsson, Markku. 2000. Papermaking Science and Technology: Book 9. 1st ed. Jyväskylä: Gummerus Printing.
- 8 Klemetti, Ursula; Kortelainen, Veli-Antti; Lyytikäinen, Jorma; Siitonen, Heikki & Sironen, Raimo. 1999. Paperimassan valmistus. 2. uudistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.
- 9 Low-consistency pulping. Verkkoaineisto. Andritz Oy. <<https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/paper-production/stock-preparation/low-consistency-pulping>>. Luettu 13.9.2022.
- 10 Paulapuro, Hannu. 2000. Papermaking Science and Technology: Book 8: Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. 2nd ed. Jyväskylä: Gummerus.
- 11 Valmet Conical Refiner Conflo. Verkkoaineisto. Valmet Oyj. <<https://www.valmet.com/board-and-paper/stock-preparation/refining/refining/axial-flow-refiners/>>. Luettu 21.9.2022.

- 12 Koskenhely, K; Nieminen K & Paulapuro H. 2007. Edge form profile of refiner filling bars and its impact on softwood fibre shortening. Paperi ja Puu – Paper and Timber. Vol. 8, s. 236–241.
- 13 Harmonised European laboratory test method to produce parameters enabling the assessment of the recyclability of paper and board products in standard paper and board recycling mills. 2020. Verkkoaineisto. Cepi. <<https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2021/02/REC-21-002.pdf>>. Luettu 2.10.2022.
- 14 L & W Pulp Disintegrator. 2016. Verkkoaineisto. ABB, Inc. <https://library.e.abb.com/public/9a1ff59510854ccb97c5a93b3d2028cb/260_LW_Pulp_Disintegrator_v1.0.pdf>. Luettu 2.10.2022.
- 15 SPSS: Friedman-testi. Verkkoaineisto. Akin menetelmäblogi. <<https://tilastoapu.wordpress.com/tag/friedman-testi/>>. Luettu 30.8.2022.
- 16 Taanila, Aki. 2016. Tilastollinen päättely. Luentomoniste. Haaga-Helia ammattikorkeakoulu.

Friedman-testin tulokset

VANHA MENETELMÄ 0,25 %					
Näyte	Arvioija A	Arvioija B	Arvioija C	Arvioija D	Arvioija E
1	2	2,5	2,25	2,5	2,5
2	2,5	2,5	2,75	3	2,25
3	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
4	1,75	2,25	2	2	1,75
5	2,25	3	2,75	3	2
6	2,25	3	2,75	3	2,5
7	1	1	1	1	1

*Nonparametric Tests: Related Samples.
 NPTESTS
 /RELATED TEST(A B C D E)
 /MISSING SCOPE=ANALYSIS USERMISSING=EXCLUDE
 /CRITERIA ALPHA=0.05 CILEVEL=95.

➔ Nonparametric Tests

Hypothesis Test Summary				
	Null Hypothesis	Test	Sig. ^{a,b}	Decision
1	The distributions of A, B, C, D and E are the same.	Related-Samples Friedman's Two-Way Analysis of Variance by Ranks	,010	Reject the null hypothesis.
a. The significance level is ,050.				
b. Asymptotic significance is displayed.				

Related-Samples Friedman's Two-Way Analysis of Variance by Ranks

A, B, C, D, E

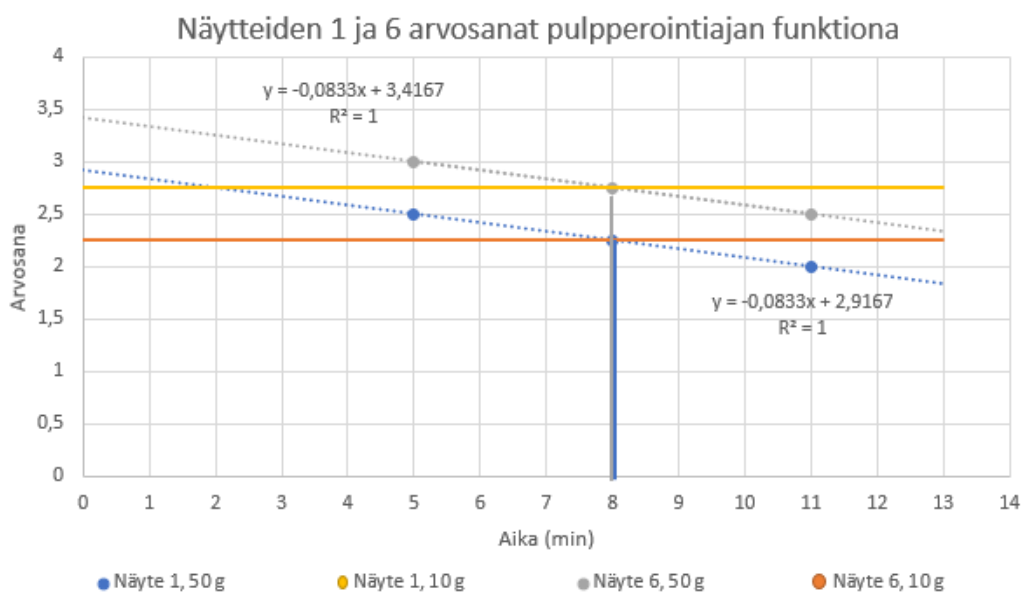
Related-Samples Friedman's Two-Way Analysis of Variance by Ranks Summary

Total N	7
Test Statistic	13,363
Degree Of Freedom	4
Asymptotic Sig.(2-sided test)	,010

Uuden menetelmän optimaalisen hajotusajan määrittämiseksi tehdyt laskelmat

Näyte 1	Näyte 1, 50 g	Näyte 1, 10 g
Aika (min)	Arvosana	
11	2	2,25
8	2,25	2,25
5	2,5	2,25

Näyte 6	Näyte 6, 50 g	Näyte 6, 10 g
Aika (min)	Arvosana	
11	2,5	2,75
8	2,75	2,75
5	3	2,75



Varmistuskokeiden määrän määrittäminen

```
> power.t.test(n = NULL, delta = 0.5, sd = 0.25, sig.level = 0.05,  
+             power = 0.8,  
+             type = c("one.sample"),  
+             alternative = c("two.sided"),  
+             strict = FALSE, tol = .Machine$double.eps^0.25)
```

One-sample t test power calculation

```
      n = 4.220731  
delta = 0.5  
  sd = 0.25  
sig.level = 0.05  
  power = 0.8  
alternative = two.sided
```

Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi

```
> x1<-c(2.25,2.75,2.25,2.5,2,1,2.25,3,3.5,2.5,1,3.75)
> x2<-c(2.25,2.75,2,2.5,2.25,1.25,2.5,3.25,3.5,2.75,1,3.75)
> wilcox.test(x1, x2, alternative = "two.sided", paired = TRUE, exact = FALSE,
correct = FALSE)
```

Wilcoxon signed rank test

data: x1 and x2

V = 3.5, p-value = 0.1025

alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0