

Jenny Rönkvist

## **Tyhjiöjärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen**

BillerudKorsnäs Finland Oy

Opinnäytetyö

Kevät 2020

SeAMK Tekniikka

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Jenny Rönkvist

Työn nimi: Tyhjiöjärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen

Ohjaaja: Pasi Junell

Vuosi: 2020

Sivumäärä: 48

Liitteiden lukumäärä: 0

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä BillerudKorsnäs Finland Oy:n kanssa. Tehdään päätoimialaa ovat erilaiset voima- ja säkkipaperit, joilta edellytetään muun muassa korkeaa suorituskykyä ja hyvää painettavuutta, mikä asettaa myös käytettävälle laitteistolle tietynlaisia vaatimuksia.

Opinnäytetyön tavoitteena oli parantaa paperinvalmistuksen osana käytettävän tyhjiöjärjestelmän energiatehokkuutta, jossa suurimpana tekijänä ovat paperiradan vedenpoistoon käytettävät tyhjiöpumput. Pumppujen suuresta koosta ja laitteiston iästä johtuen ne aiheuttavat mittavia vuosikustannuksia sähkön- ja vedenkulutuksessa, kun todellisuudessa tuotannon toimivuuden kannalta oikeat imutasot olisi mahdollista saavuttaa pienemmilläkin kustannuksilla. Paperikoneella tapahtuvaa vedenpoistoa tulisi joko hienosäätää kustannustehokkaammaksi paperin laatuvaatimukset sekä prosessin ja nykylaitteiston toiminta huomioon ottaen tai korvata nykyinen tyhjiöjärjestelmä energiatehokkaammalla ratkaisulla, kuten tyhjiöpuhallimilla.

Työn teoriaosuudessa käsitellään tavoitteen kannalta tärkeimpiä aihealueita, kuten paperinvalmistuksen ja tyhjiötekniikan perusteita sekä valmistettavan paperin ominaisuuksien vaikutusta laitteistolta vaadittavaan suorituskykyyn. Tämän jälkeen varsinaisessa tutkimusosuudessa tutkittiin muun muassa pumppujen veden- ja sähkökäyttöä sekä tiivisteveden ominaisuuksia. Lisäksi tutustuttiin prosessin, koneen osien ja eri paperilaatujen kannalta toimivimpiin tyhjiöjärjestelmän alipainetasoihin sekä niiden vaihteluihin. Lopuksi perehdyttiin tyhjiöpuhallintekniikan mahdollisuuksiin.

Tuloksena saatiin luotettavaa tietoa tyhjiöpumppujen toiminnasta, kulutuksesta sekä järjestelmän kunnosta. Tutkimuksen lopuksi myös päätettiin jatkotoimenpiteistä energiatehokkuuden parantamiseksi pitkällä tähtäimellä.

Avainsanat: paperinvalmistus, tyhjiötekniikka, energiatehokkuus, kuivaus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical engineering

Specialisation: Mechanical and production engineering

Author: Jenny Rönkvist

Title of thesis: Vacuum system's energy efficiency improvement

Supervisor: Pasi Junell

Year: 2020

Number of pages: 48

Number of appendices: 0

---

The study was implemented for BillerudKorsnäs Finland Oy, a paper mill located in Pietarsaari. The parent company BillerudKorsnäs AB specializes in packaging papers and, as a part of its operations, this unit produces different kraft and sack papers, of which high performance and good printability are required.

The aim of the thesis was to improve the paper mill's energy efficiency. The vacuum system used in the paper machine's dewatering process had an obsolete pump technology and, due to the size of the vacuum pumps, they caused unnecessary energy and water consumption. The goal was to find a way to implement similar vacuum levels with lower expenses and to optimize the dewatering process relative to paper quality, process functionality and machine parts' lifespan or to develop a better solution to replace the vacuum pumps, such as modern turbo blowers.

The theoretical part of the thesis consisted of the basics of paper and vacuum technology and the effects of paper characteristics on vacuum levels. In the implementation part, the water and electricity usage of the vacuum pumps and the properties of ring-liquid were examined. The goal was also to learn more about machine parts, the most functional vacuum levels for the process and different paper grades. Lastly, the turbo blower technology was examined as a possibility to replace the old vacuum pumps.

The results gave valuable information on the operation and consumption of the vacuum pumps and the condition of the system. The information obtained also helped move forward with improving the energy efficiency in the long run.

Keywords: paper manufacturing, vacuum technology, energy efficiency, dewatering

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuva-, kuvio ja taulukkoluetelo .....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	8
1 JOHDANTO .....	9
1.1 Työn tausta .....	9
1.2 Työn tavoitteet ja rakenne.....	10
1.3 Yritysesittely .....	11
2 PAPERIN VALMISTUSPROSESSI.....	12
2.1 Yleistä .....	12
2.2 Massan otto ja jauhatus .....	13
2.1 Paperikoneen rakenne .....	14
2.2 Rainanmuodostus ja kuivatus .....	14
2.3 Loppukäsittelyt .....	17
3 TYHJIÖTEKNIikka.....	18
3.1 Tyhjiön käyttö paperinvalmistuksessa.....	18
3.2 Tyhjiöpumput.....	18
4 VEDENPOISTOJÄRJESTELMÄ .....	22
4.1 Märkäviira .....	22
4.2 Puristinhuovat .....	22
4.3 Imutelat .....	23
5 NYKYTILANNE .....	24
6 ENERGIATEHOKKUUDEN TUTKIMINEN .....	26
6.1 Pumppujen kierrosnopeudet ja varasilmaventtiilit .....	26
6.2 Tiivistevesijärjestelmä .....	29
6.2.1 Virtausmittaukset .....	31
6.2.2 Tiivisteveden lämpötila ja laatu .....	34
6.3 Alipainetasot .....	36

6.4 Paperilaadut ja ajomallit .....	38
6.4.1 Paperilaatujen erot.....	38
6.4.2 Huokoisuus ja ilmanläpäisykyky.....	39
6.4.3 Paperin lopullinen laatu.....	40
6.5 Tyhjiöpuhaltimet .....	41
6.5.1 Tyhjiöpuhallinkokoonpanon rakenne ja toiminta .....	42
6.5.2 Tyhjiöpuhaltimien ja -pumppujen vertailu .....	44
7 YHTEENVETO.....	46
LÄHTEET .....	47

## Kuva-, kuvio ja taulukkoluetelo

Kuva 1. BillerudKorsnäs Finland Oy ja Alholman teollisuusalue .....	11
Kuva 2. Tehtaan Nash-nesterengaspumput. ....	24
Kuva 3. Nash-pumppujen virtausmittarit. ....	31
Kuva 4. Flexim FLUXUS F601 -virtausmittari.....	32
Kuva 5. Viiraosan tyhjiöpuhallin. ....	42
Kuvio 1. Massan jauhatus .....	13
Kuvio 2. Paperikoneen rakenne. ....	14
Kuvio 3. Viiraosa, jossa perälaatikko sekä imulaatikot.....	15
Kuvio 4. Puristinosa, jossa kolme erilaista nippiä.....	16
Kuvio 5. Kuivatusosa, jossa huuvan sisällä kuivatussylinterit ja -viirat.....	16
Kuvio 6. Pope-osuus, jossa kalanteri ja rullain.....	17
Kuvio 7. Nesterengaspumpun rakenne ja toimintaperiaate.....	20
Kuvio 8. Esimerkki pumppukäyrästä .....	21
Kuvio 9. Imutelanippi ja imutelan toiminta .....	23
Kuvio 10. Kahden nesterengaspumpun käytön etu tehontarpeen kannalta verrattuna yhteen pumppuun .....	29
Kuvio 11. Tyhjiöpumput ja tiivistevesijärjestelmä. ....	30
Kuvio 12. Seurattavat arvot.....	35
Kuvio 13. Raakavesilinjan virtaus. ....	35

Kuvio 14. Erään pumpun kuormitusarvot prosentteina noin parin viikon ajalta. ....	36
Kuvio 15. Runtech Systems Oy:n valmistaman turbopuhaltimen rakenne.....	43
Kuvio 16. RunTech Systems Oy:n valmistama vedenerotin .....	43
Kuvio 17. Pumppu- ja puhallinkäyrien vertailu .....	44
Taulukko 1. Pumppujen alkuperäistiedot. ....	25
Taulukko 2. Pumppujen tietoja.....	27
Taulukko 3. Varasilmaventtiilien tietoja. ....	28
Taulukko 4. Virtausmittausten tulokset. ....	33
Taulukko 5. Tiivistenesteen viitearvo ja mitattu arvo.....	34
Taulukko 6. Erilaisten paperilaatujen vaatimat alipaine arvot sekä näiden keskiarvot.....	38
Taulukko 7. Laatukohtaiset ilmanläpäisyarvot sekä pumppujen keskimääräiset kuormitukset näillä laaduilla. ....	40
Taulukko 8. Vertailu nesterengaspumppujen ja turbopuhaltimien vuosittaisista energiakustannuksista .....	45

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>Retentio</b>	Viiralla tapahtuva kuitu- ja täyteainehäviön suhde
<b>Nippi</b>	Kahden telan muodostama puristin
<b>Viira</b>	Muovikudoksesta valmistettu matto
<b>Pope</b>	Paperikoneen loppuosa
<b>Tiivistevesi</b>	Nesterengaspumpulla käytettävä rengasvesi
<b>MF</b>	Machine-finished eli kalanteroitu paperilaatu
<b>UG</b>	Unglazed eli käsittelemätön paperilaatu
<b>CL</b>	Clupak eli Clupak-matolla rypytetty paperilaatu



# 1 JOHDANTO

Nykypäivänä kova kilpailu ja ympäristövaikutusten merkityksen korostuminen kannustavat yrityksiä kehittämään toimintaansa ja erityisesti tehtailla panostetaan nyt energiatehokkaaseen ja turvalliseen toimintaan. Kuitenkin vanhemmilla tuotantolaitoksilla tämä muodostaa haasteita johtuen vanhoista laitteistoista ja syvälle juurtuneista tavoista suorittaa erilaisia työtehtäviä. Tästä johtuen energiankulutustutkimuksissa on nykyisen laitteiston huoltamisen ja päivittämisen lisäksi otettava huomioon myös koko järjestelmän mahdollinen uusimistarve, jos vanha laitteisto ei enää toimi tuotannon ja vuosikustannuksien kannalta parhaalla mahdollisella tavalla. Tässä tutkimuksessa perehdyttiin vanhan paperitehtaan toimintaan, jossa suurimpina ongelmina olivat turha energiankulutus sekä tästä johtuva koneen osien ylimääräinen rasitus.

## 1.1 Työn tausta

Työn taustalla on yrityksen tarve säästää vuosittain mahdollisimman paljon energiaa tuotannossaan ja välttää turhaa kulutusta. Tässä tutkimuksessa keskityttiin paperin vedenpoistoprosessissa käytettävien tyhjiöpumppujen osuuteen tehtaan vuosittaisissa kuluissa. Pumpuilla poistetaan ilmaa tyhjiöjärjestelmästä ja luodaan näin järjestelmän eri osiin halutut alipainetasot. Tästä syntyneen imuvirran avulla imeetään vettä paperiradan eri kohdista erilaisilla vedenpoistolaitteilla.

Kyseiset pumput on aikanaan reilusti ylimitoitettu ja asetettu pyörimään tietyllä kierrosnopeusalueella, mistä johtuen ne kuluttavat runsaasti turhaa energiaa. Ne ovat kuitenkin olleet melko huoltovapaita ja varmatoimisia jo yli 20 vuotta, joten niiden toimintaan ei koneen käyntiaikana ole juurikaan puututtu. Tarkoituksenmukainen ylimitoitus johtuu muun muassa siitä, että ennen paperikoneet olivat niin sanotusti katkoherkkiä ja katkoja saattoi koneella tulla useinkin. Toimintavarmalla ja hieman ylimitoitetulla tyhjiöjärjestelmällä saatiin parannettua koneen ajettavuutta ja paperin tasalaatuisuutta.

Järjestelmä ei kuitenkaan enää palvele yrityksen tavoitteita parhaalla mahdollisella tavalla. Siksi pumppujen vaikutusta valmistusprosessiin ja tehtaan energiankulutukseen tulisi nyt tutkia eri näkökulmista ja kehittää ratkaisu, joka parantaisi prosessin energiatehokkuutta vaikuttamatta sen normaaliin toimintaan ja paperin ajettavuuteen.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rakenne

Työn tarkoitus oli siis jatkaa jo aiemmin aloitettuja tutkimuksia aiheeseen liittyen, jolloin tutkittiin pumppujen tilavuusvirtoja, kierrosnopeusalueita ja imutehoja. Tavoitteena oli kartoittaa paperiradan vedenpoistojärjestelmän säästökohteita tutkimalla nykylaitteiston eli tyhjiöpumppujen veden- ja energiankulutusta sekä pyrkiä tällä tavoin parantamaan järjestelmän kustannustehokkuutta häiritsemättä tuotannon normaalia toimintaa. Kuitenkin jos laitteiston vaihtaminen esimerkiksi uuteen tyhjiöpuhallinjärjestelmään todettaisiin tutkimuksen lopuksi nykyisten pumppujen hyötysuhteen parantamisen sijaan järkevämmäksi kustannusten kannalta, keskusteltaisiin puhallintoimittajan kanssa muun muassa investoinnin hinnoista, takaisinmaksuajoista ja energiansäästöpotentiaalista.

Tavoitteena oli myös tutustua tarkemmin paperin valmistukseen sekä tyhjiötekniikkaan ja sen sovelluksiin. Työn teoriaosuudessa käydään pintapuolisesti läpi paperitekniikan teoriaa, tutkimukseen oleellisesti liittyviä paperinvalmistusprosessin osia sekä tyhjiö- ja vedenpoistolaitteiston toimintaa ja tehtäviä prosessissa. Tutkimusosuuden ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin pumppujen käyttämää tiivistevettä laadun, lämpötilan ja kulutusmäärien kannalta. Seuraavaksi tutkittiin erilaisia paperilaatuja ja ajomalleja, jotka vaikuttavat alipainetasojen vaihteluun sekä tuotannon vaatimukseen. Viimeisessä vaiheessa tutustuttiin asiantuntijan avulla tyhjiöpuhallinteknologiaan ja puhallinjärjestelmän käytön etuihin paperinvalmistusprosessissa.

### 1.3 Yritysesittely

Työn toimeksiantaja on nykyisin ruotsalaisyhtiö BillerudKorsnäs AB:n omistama voima- ja säkkipaperin tuotantolaitos Pietarsaassa. BillerudKorsnäsillä on seitsemän tehdasta, joista viisi on Ruotsissa, yksi Iso-Britanniassa ja yksi Suomessa. Voima- ja säkkipaperia käytetään muun muassa jauhojen ja sokerin pakkaamiseen sekä kantokasseihin. Vaativat loppukäyttökohteet asettavat erittäin korkeat vaatimukset paperin lujuudelle, kestävyydelle, joustavuudelle, puhtaudelle ja painettavuudelle. (BillerudKorsnäs Finland Oy [Viitattu 3.1.2020].)

Paperin valmistus Pietarsaassa sai alkunsa, kun Wilhelm Schauman perusti alueelle sikuritehtaan vuonna 1883. Schauman laajensi liiketoimintaansa puutavara-kauppaan ja perusti useita sahoja alueelle. Vuonna 1962 rakennettiin sellu- ja paperitehdas, joka on nykyisin lukuisten modernisointien jälkeen kaupungin suurin tuotantolaitos. 1980-luvulla yhtiö sulautettiin UPM-Kymmene Oyj:hin ja vuodesta 2012 paperin tuotantolaitos on ollut osa BillerudKorsnäsiä. Tehdas toimii Alholman teollisuusalueella (kuvassa 1.) yhdessä UPM:n, Walkin ja Alholmens Kraftin kanssa ja sen tuotantokapasiteetti on nykyisin 200 000 t/vuosi ja henkilöstömäärä 120 henkilöä. (BillerudKorsnäs Finland Oy [Viitattu 3.1.2020].)



Kuva 1. BillerudKorsnäs Finland Oy ja Alholman teollisuusalue (Muokattu lähteestä BillerudKorsnäs Finland Oy, [Viitattu 16.1.2020]).

## 2 PAPERIN VALMISTUSPROSESSI

Tutkimuksessa merkittävässä asemassa on paperin valmistusprosessin ymmärtäminen. Kuluneen vuoden aikana on erilaisten työtehtävien ja tutkimustöiden merkeissä ollut aikaa tutustua läheisemmin paperitekniikkaan ja paperin valmistukseen Pietarsaaren tehtaalla sekä teorian että käytännön tasolla. Teoriaosuuden materiaalina toimivat pääosin KnowPap-oppimisjärjestelmä, joka sisältää kaiken tarvittavan tiedon paperitekniikasta, sekä tehtaan omat materiaalit ja muut aihetta tukevat lähteet. Paperinvalmistus on käsitelty tässä teoriaosuudessa pääpiirteittäin keskittyen työn kannalta oleellisiin prosessin osiin.

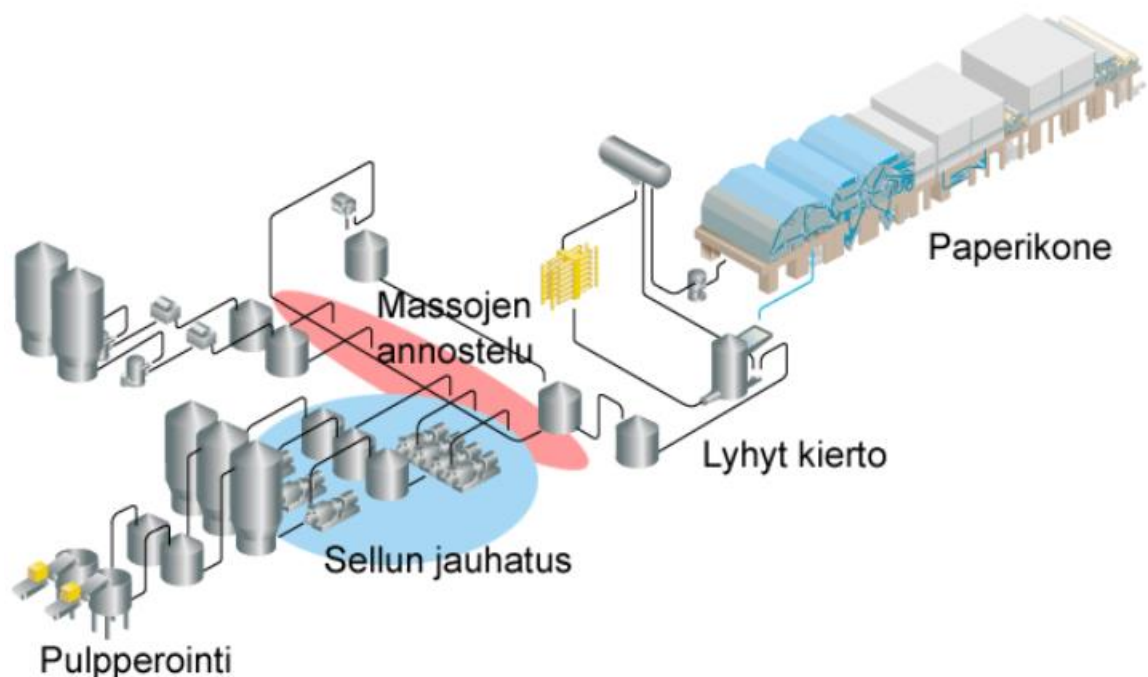
### 2.1 Yleistä

Paperin valmistaminen on monimutkainen prosessi, jonka onnistuminen riippuu monesta tekijästä, sillä lopputuotteen laatuun ja ominaisuuksiin vaikuttavia seikkoja on useita. Näitä pystytään muokkaamaan eri valmistusvaiheissa esimerkiksi lisäainesten, jauhatuksen ja mekaanisen käsittelyn avulla. Yrityksen lopputuotteiden tulee kestää monenlaista kulutusta, sillä voima- ja säkkipaperilta vaaditaan esimerkiksi hyvää veto- ja repäisyjuuutta, sekä joissakin tapauksissa näiden lisäksi myös hyvää ilmanläpäisykykyä. Paperin kuivatusprosessi selluloosamassasta valmiiksi tuotteeksi tulisikin räätälöidä juuri oikeanlaiseksi, jotta koneella saadaan tuotettua parasta mahdollista laatua asiakkaalle tinkimättä tuotannon sujuvuudesta. Merkittävässä osassa tässä on vedenpoistojärjestelmä, jonka avulla paperiradasta poistetaan kuivatusprosessin alussa suurin osa siinä olevasta vedestä. Vedenpoistoprosessin onnistuminen paperin kuivatuksen alussa nimittäin määrittelee hyvin pitkälti sen, onnistuuko kuivatusprosessi ja päästäänkö oikeaan kosteustasoon. Tästä syystä järjestelmä kuluttaa myös paljon erilaisia voimavaroja.

## 2.2 Massan otto ja jauhatus

Tässä tapauksessa puukuiduista valmistettu selluloosamassa otetaan valmiina paperitehtaalle viereiseltä selluloosatehtaalta, jossa massaa valmistetaan puukuiduista erilaisilla keitto-, valkaisu- ja pesuvaiheilla. Paperin valmistuksessa käytetään sekä havu- että lehtipuumassaa. Koivumassaa voidaan lisätä havupuusellun sekaan muun muassa tiheys- ja pintaominaisuuksien parantamiseksi. (KnowPap [Viitattu 16.2.2020].)

Haettu massa laimennetaan ja jauhetaan jauhinterien välissä kuitujen ominaisuuksien muokkaamiseksi. Yleisesti jauhaminen parantaa muun muassa kuitujen sitoutumiskykyä ja katkoo kuituja, mikä taas parantaa valmiin paperin lujuus- ja pintaominaisuuksia. Jauhimia on kuitenkin useampia erilaisia, joilla massaa voidaan jauhaa eri tavoilla lopputuotteelle haluttavien ominaisuuksien mukaan. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 113.)



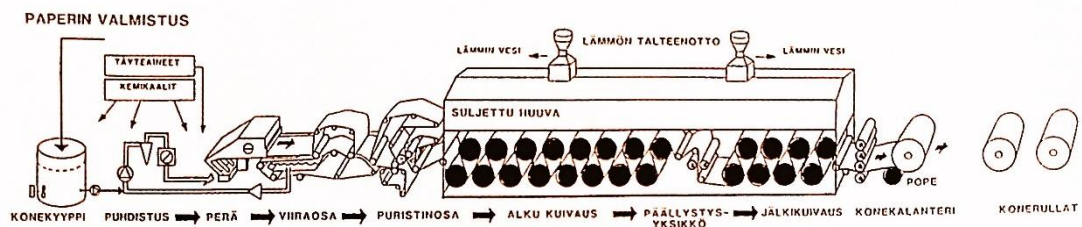
Kuvio 1. Massan jauhatus (Knowpap [Viitattu 16.2.2020]).

Massaan lisätään jokaisessa vaiheessa lisää vettä, jolloin siitä muodostuu tasaisesti viiralle levittyvää laimeaa kuituseosta eli sulppua. Käsitelty massa ohjataan massasäiliöön eli tässä tapauksessa niin sanottuun konekyyppiin ja siihen lisätään eri-

laisia lisäaineita, värejä ja liimaa, joilla pyritään parantamaan lopputuotteen ominaisuuksia, pH:ta sekä paperiaineksen retentoitumista viiralle. Retentiolla tarkoitetaan viiralle jääneen kuitu- ja täyteaineen suhdetta sille syötettyyn aineeseen, sillä osa siitä suotautuu veden mukana viiramaton läpi. Ennen massan syöttämistä perälaatikkoon siitä poistetaan epäpuhtaudet, ilmakuplat ja kuitukimput erilaisten sihtien ja puhdistimien avulla. Lopuksi valmis sulppu syötetään perälaatikosta tasaisesti viiralle. Yllä oleva kuvio 1. kuvaa tätä massankäsittelyprosessia. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 113.)

## 2.1 Paperikoneen rakenne

Paperikoneella valmis paperimassa kuivatetaan erilaisilla menetelmillä. Koneen pääosat ovat perälaatikko, viiraosa, puristinosa ja kuivatusosa. Alla olevassa kuviossa 2. on yksinkertaistettu esimerkki tavallisen paperikoneen rakenteesta. Suurin paperikoneen osista on kuivatusosa, joka koostuu useasta kuivatussylinteriryhmästä. Työn ja valmistusteknisten seikkojen kannalta suurin merkitys on siis kuitenkin koneen alkupäällä eli viira- ja puristinosalla, jossa merkittävin osa vedenpoistosta ja valmiin paperin muodostumisesta tapahtuu.

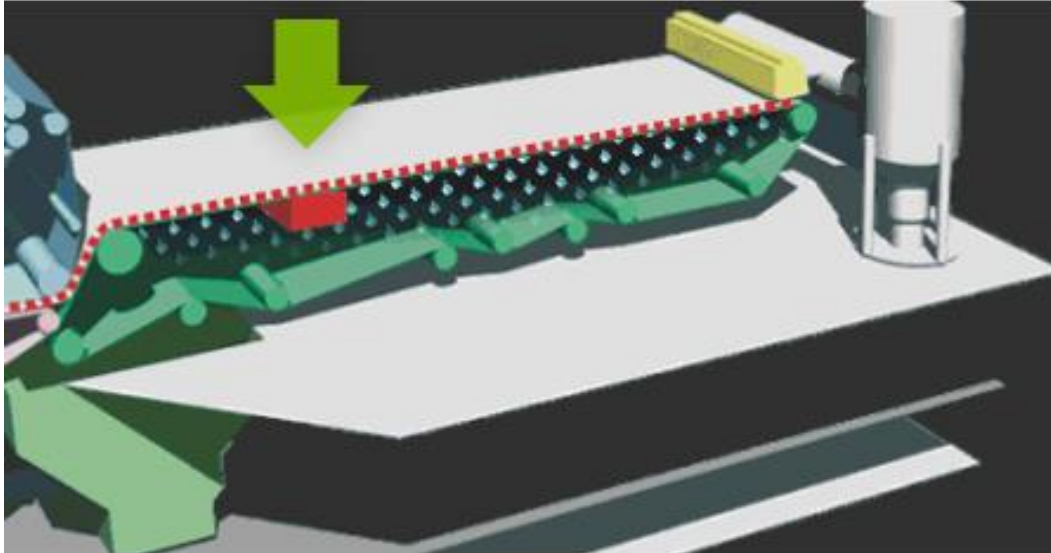


Kuvio 2. Paperikoneen rakenne. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 16.)

## 2.2 Rainanmuodostus ja kuivatus

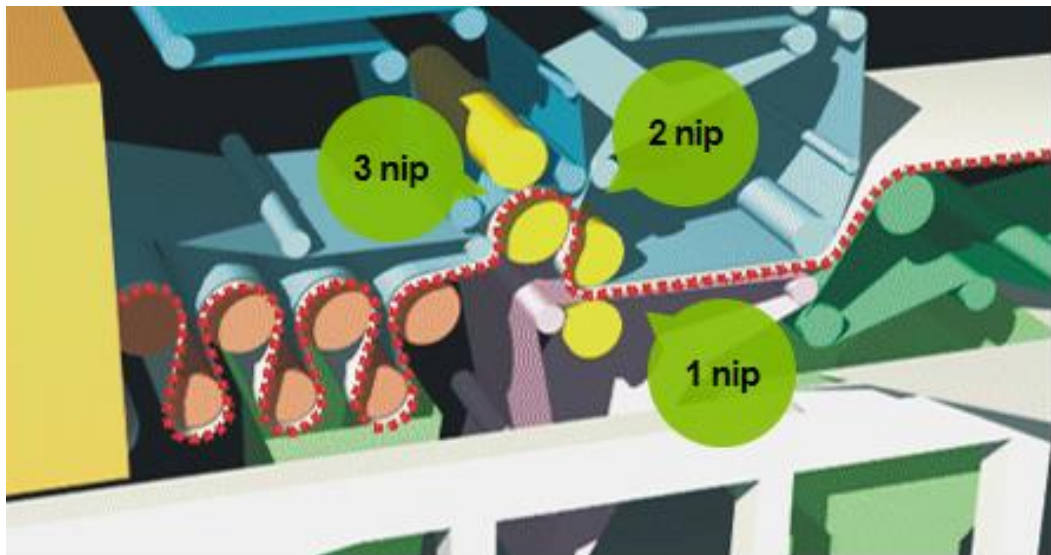
Niin sanottu märkääpää on paperikoneen alkupuoli, jossa paperiraina muodostetaan syöttämällä sulppu perälaatikosta mahdollisimman tasaisesti viiraosalle ja josta se siirtyy edelleen puristinosalle. Viira on muovilangoista kudottu verkkomainen matto, jonka kudosten läpi suotautuu suurin osa sulpun sisältämästä vesimassasta, joka on aluksi yli 95 %. Viiraosan loppupäässä rainan kuiva-ainepitoisuus on kasvanut

15–20 prosenttiin eli vettä on enää vain noin 80 %. Tässä vaiheessa kuiva-ainepitoisuuden tulee olla riittävän suuri, jotta rainan siirto viiralta puristimelle onnistuu. Alla olevassa kuviossa 3. on kuvattu veden suotautumista viiraosalla. (Häggblom-Ahnger & Komulainen 2000, 15.)



Kuvio 3. Viiraosa, jossa perälaatikko sekä imulaatikot (Nylund 2016).

Seuraavaksi raina siirtyy puristinosalle, jossa siitä poistetaan lisää vettä puristamalla se usean kahden telan muodostaman nipin läpi ja imemällä vettä imutelojen avulla (kts. kuvio 4.). Puristaminen toteutetaan vaiheittain varovasti aloittaen joko puristinhuovan ja sileän telan tai kahden puristinhuovan välissä. Puristus vaikuttaa myös rainan rakenteeseen, sillä puristuspaine saa kuidut sitoutumaan toisiinsa tiukemmin. Tässäkin vaiheessa täytyy saavuttaa tarpeeksi suuri märkäluku, jotta paperiradan siirtyminen edelleen kuivatusosalle onnistuu ja höyryn kulutus saadaan minimoitua (kuiva-ainepitoisuus noin 40–60 %). (KnowPap [Viitattu 16.2.2020].)



Kuvio 4. Puristinososa, jossa kolme erilaista nippiä (Nylund 2016).

Puristinosalta paperirata siirtyy kuivatusosalle, jossa siitä poistetaan vettä haihduttamalla, kunnes päästään sopivaan paperin loppukosteuteen (noin 3–10 %). Yleisin tapa tähän on niin sanottu sylinterikuivaus, jossa höyryllä lämmitetyt sylinterit haihuttavat vettä paperiradasta sen kulkiessa niiden välistä kuivatusviirojen avulla. Kuivatusosa on kokonaisuudessaan kaavun eli huuvan sisällä lämmön talteenoton vuoksi (kts. kuvio 5.). (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 16.)



Kuvio 5. Kuivatusosa, jossa huuvan sisällä kuivatussylinterit ja -viirat (Nylund 2016).



### 2.3 Loppukäsittelyt

Kuivatusosan loppupäässä voidaan käyttää erilaisia käsittelylaitteita, joilla voidaan vaikuttaa paperin pintaominaisuuksiin riippuen sen loppukäyttökohteesta. Esimerkkinä tällaisesta on kuminen Clupak-matto, jonka tehtävänä on rypyttää paperi parempien venymäarvojen saavuttamiseksi. Tällainen paperi soveltuu esimerkiksi sementtisäkkeihin, joilta vaaditaan monenlaista kulutuskestävyyttä. Lisäksi kuivatusosan lopussa voi olla liimapuristin, päällystysasemia tai muita pintakäsittelylaitteita. Ennen paperin siirtymistä rullaimelle se voidaan myös kalanteroida eli ajaa se nipin läpi, jossa toinen tela on tavallinen ja toinen pehmeä polymeeripäällystetty tela. Kuuma nippi ikään kuin silittää paperin, jolloin siihen saadaan sileämpi pinta. Tätä koneen loppuosaa, jossa paperi myös rullataan tambuuriraudalle kuvion 6. osoittamalla tavalla, kutsutaan popeksi. Lopuksi valmis paperi leikataan pituusleikkurilla konerullasta tilauksen mukaisiksi rulliksi, jotka pakataan ja toimitetaan asiakkaille. (KnowPap [Viitattu 16.2.2020].)



Kuvio 6. Pope-osuus, jossa kalanteri ja rullain (Nylund 2016).

## 3 TYHJIÖTEKNIikka

### 3.1 Tyhjiön käyttö paperinvalmistuksessa

Tyhjiöllä tarkoitetaan tilavuutta, jossa ei ole ainetta. Tyhjiön luomiseksi on tästä tilavuudesta siis poistettu kaasut ja höyryt niin perusteellisesti, kuin se on tarpeellista tai mahdollista. Niiden poistaminen tyhjiökammioista on aluksi suhteellisen helppoa, mutta ainemäärien vähentyessä se muodostuu vaikeammaksi ja kalliimmaksi. Tämä näkyy käytännössä pumppujen kasvavana tehontarpeena, sillä sitä mukaa kun alipainetaso kasvaa, pumpun läpi virtaava ilman tilavuusvirta pienenee ja jäännöskaasun pumppaaminen käy raskaammaksi. Jäännöskaasuksi kutsutaan siis jäljelle jäävää ainetta, jota käytännössä jokainen tyhjiö sisältää jonkin verran. (Fontell ym. 1986, 15–16.)

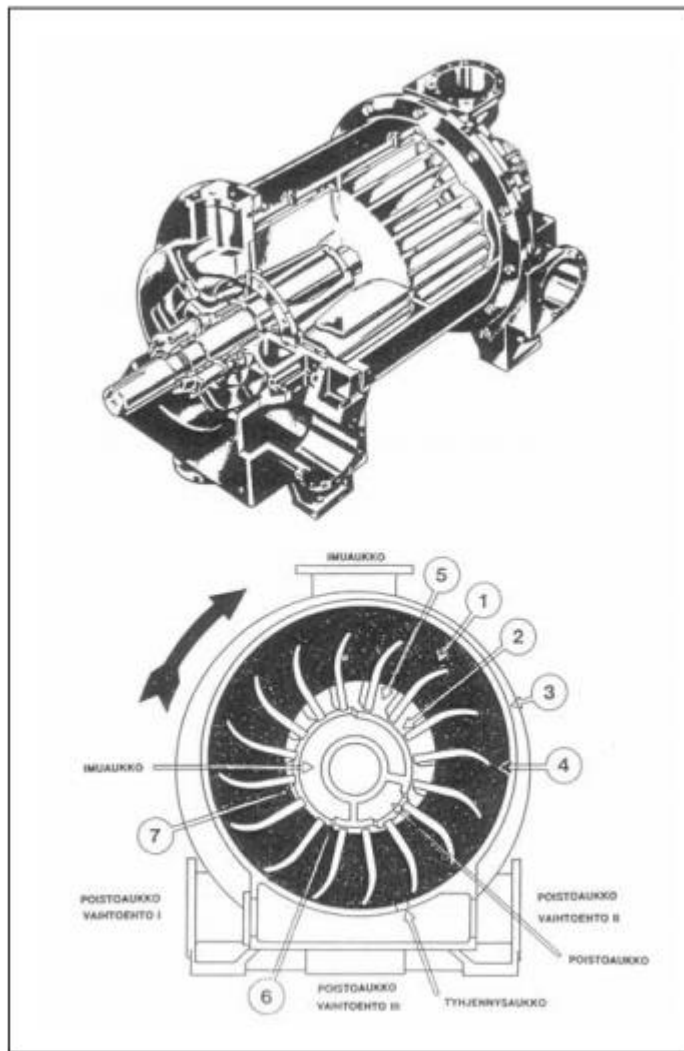
Käytännössä tyhjiösystemin tilavuudessa oleva kaasumäärä ilmaistaan siis usein tietyssä lämpötilassa mitattuna kokonaispaineena. Normaali ilmanpaineen arvo on 101 325 Pa eli noin 1 bar, josta 700 mbaria pienempään eli 300 mbarin paineeseen saakka puhutaan alipaineesta. Tätä pienempien painearvojen kohdalla puhutaan eri tyhjiötasoista (väli-, suur- ja ultrasuurtyhjiöt). Eriasteiset tyhjiöt luokitellaan jäännöskaasun määrän ja koostumuksen perusteella. Tässä tutkimuksessa tyhjiötä käsiteltäessä puhutaan lähinnä eri alipainetasoista, koska paperikoneen tyhjiöjärjestelmässä vallitseva alipaine vaihtelee noin 300–700 mbarin välillä, eikä se siis teoriassa vastaa tyhjiön määritelmää. (Fontell ym. 1986, 20.)

### 3.2 Tyhjiöpumput

Pumppu on tyhjiötekniikan tärkein komponentti ja niitä onkin saatavilla lukuisia erilaisia käyttötarkoituksesta riippuen. Tässä tutkimuksessa puhuttaessa tyhjiöpumpuista tarkoitetaan tehtaalla käytettäviä tyhjiöpumppuja, jotka ovat niin sanottuja nesterengaspumppuja (Nash-pumppuja). Tällaisia pumppuja käytetään etenkin teollisuudessa pumppausprosessin puhtauden ja suurten höyrymäärien pumppauskyvyn vuoksi. Mekaanisiin pumppuihin kuuluvat nesterengaspumput toimivat kuitenkin vain niin sanotuilla karkea- ja välityhjiöalueilla, joten ne soveltuvat parhaiten

suurten kaasumäärien pumppaamiseen vain silloin, kun vaadittava loppupaine on vaatimaton. Tyhjiöpumppujen lisäksi markkinoilla on saatavilla myös tyhjiöpuhaltimia, joista tarkempaa tutkimustietoa löytyy raportin kohdasta 6.5. Todellisuudessa myös termi tyhjiöpumppu käsittää paljon laajemman kokoelman erilaisia tyhjiön luomiseen tarkoitettuja pumppuja. (Fontell ym. 1986, 107.)

Kuviossa 7. on esitetty tavallisen nesterengaspumpun rakenne ja toimintaperiaate. Pumppu muodostuu kahdesta keskenään samanlaisesta pesästä, joissa on pesiin nähden epäkeskeisesti sijoitetut siipipyörät, joita pyöritetään tavallisesti sähkömoottorilla. Pesät täytetään osittain vedellä tai muulla nesteellä, tässä tapauksessa puhutaan tiivistevedestä. Siipipyörän pyöriessä keskipakovoima pakottaa nesteen renkaaksi pesän reunoille, jolloin se toimii tiivisteenä ja eristää imettävän kaasun siipipyörän ympärille sirpin muotoiselle alueelle kuvion 7. osoittamalla tavalla. Kaasu imetään imuaukon kautta pumpulle, jossa se sijoittuu pyörimissuuntaan taivutettujen siipien välisiin lokeroihin ja puristuu siipipyörän pyöriessä poistoaukkoon. Poistoaukkovaihtoehtoja on yhteensä 3 kappaletta, jotta pumpun asentaminen helpottuu. Pumpun pumppausnopeuteen taas vaikuttavat sen koko sekä pyörimisnopeus. (Hulkkonen 2006.)

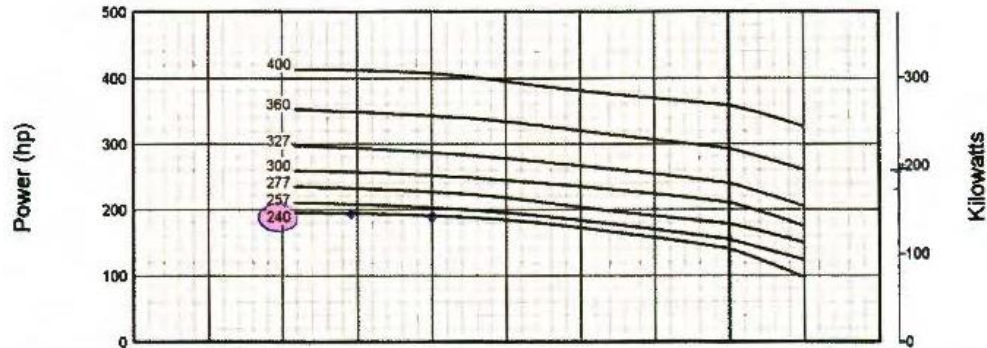
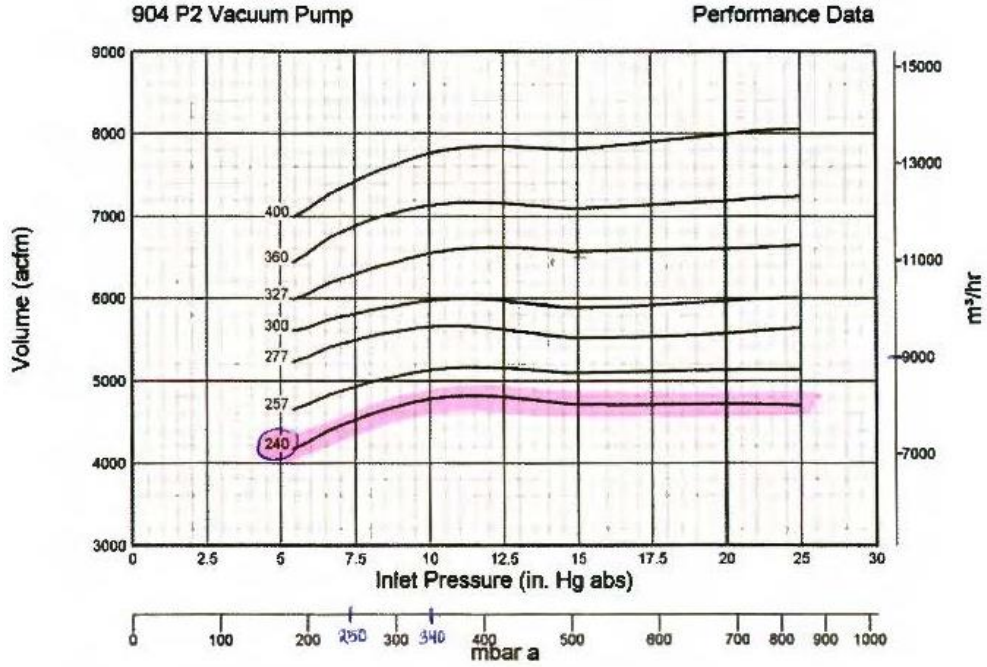


Kuva 19. Nesterengaspumppu. 1. neste, 2. päätykartio, 3. pesä, 4. siipipyörä, 5. poistovaiheen alku, 6. imuvaiheen alku, 7. imuvaihe (Nash)

Kuvio 7. Nesterengaspumpun rakenne ja toimintaperiaate (Hulkkonen 2006).

Pumppujen tehontarpeen suhdetta haluttavaan loppupaineeseen kuvataan pumpukäyrillä. Alla olevassa kuviossa 8. on esimerkki erään nesterengaspumpun pumpukäyrästä, jonka ylemmällä käyrällä kuvataan haluttavan loppupaineen suhdetta pumpun läpi kulkevaan ilman tilavuusvirtaan yksikössä  $\text{m}^3/\text{h}$ . Käyrien päissä olevat numerot kuvaavat pumppujen kierrosnopeusalueita. Kaavion perusteella esimerkiksi arviolta 180 mbarin suuruisen tyhjiön muodostamiseksi kierrosnopeusalueella 240 rpm on tämän tyyppin nesterengaspumpun tehontarve arviolta noin 150 kW. Kierrosnopeuden tulee olla riittävä halutun alipaineen ylläpitämiseen, mutta liian suurtakaan kierrosnopeutta ei ole järkevä ylläpitää kustannusten ja pumpun eliniän lyhentymisen vuoksi.

Pumppu F: Keski-imitela korkea  
 pyörimisnopeus 236 rpm  
 max tilavuusvirta 9000 m<sup>3</sup>/hr  
 ulapainevalue 250-340 mbar



1. Performance curves are based on operating conditions with saturated air at a temperature of 88° F (20° C), operating water at a temperature of 60° F (15° C) and a discharge pressure of 29.92 in. HgA (1013 mbar).
2. Tolerance to HIEI / Pneurop standards.
3. Operating conditions other than those stated above may result in different capacities or power. Please contact the home office for details.
4. Reference Curve No. EN1278-002 E

*pumpun kierrosnopeutta ei voi alentaa  
 teho 140-150kW*

Kuvio 8. Esimerkki pumppukäyrästä (Gardner Denver Nash LLC 2005).

## 4 VEDENPOISTOJÄRJESTELMÄ

Paperikoneen vedenpoistoon vaikuttavat tyhjiöjärjestelmän toiminnan lisäksi myös monet muut vedenpoistojärjestelmän osat, kuten viirat, huovat ja imutelat. Kulunut tai muutoin vioittunut vedenpoistoelin vaikuttaa huomattavasti paperikoneen alkupään vedenpoistokykyyn, mikä taas laskee rainan kuiva-ainepitoisuutta puristinosan jälkeen. Tyhjiölaitteiston imutasot vaikuttavat märkäviiran, huopien ja imutelejen käyttöikään, sillä liian suuri alipaine rasittaa niiden rakenteita.

### 4.1 Märkäviira

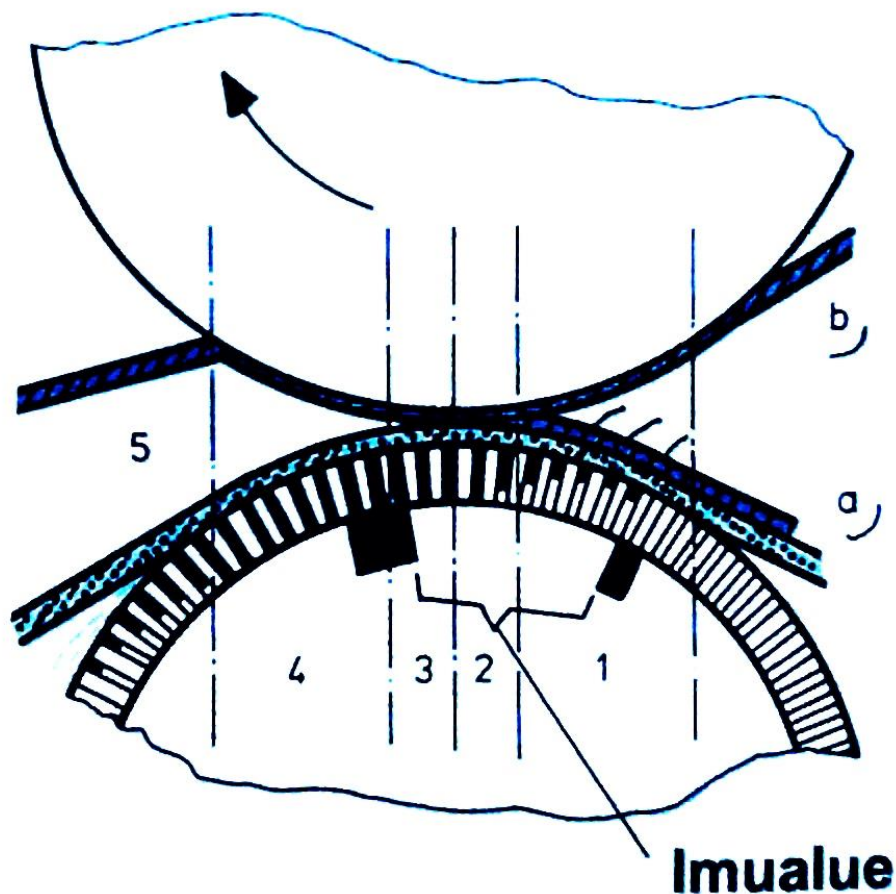
Viiraosalla olevan märkäviiran yhtenä tehtävänä on poistaa paperirainasta vettä mahdollisimman tehokkaasti hyvä retentio säilyttäen. Viiran läpäisy kuvaa parhaiten sen vedenpoistokapasiteettia ja se vaihtelee viiramaton rakenteen mukaan 4 000–12 000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h:n välillä. Läpäisyyn vaikuttaa rakenteen lisäksi kuitenkin myös viiramaton ikä, sillä esimerkiksi paperissa olevat täyteaineet kuluttavat ja tukkivat viiraa ja huonontavat siten sen läpäisykykyä. Myös vialliset telat ja vedenpoistoelimien pinnat aiheuttavat viiramaton nopean tuhoutumisen. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 173–174.)

### 4.2 Puristinhuovat

Puristinosalla rainasta poistetaan vettä puristinhuopiin niin sanottujen nippien avulla, joissa rainaa puristetaan huopaa vasten kahden telan välissä ja vesi siirtyy rainasta huopaan. Ylimääräinen vesi poistetaan prosessista imutelejen ja -laatikoiden avulla. Imutasojen tulisi olla optimaaliset myös huopien turhan kulumisen välttämiseksi, sillä kulunut huopa jättää helposti jälkiä eli markkeerausta paperiin. Huovan tulisi olla erittäin kestävä ja sen vedenpoistokykyyn on oltava hyvä johtuen koneen kovista nopeuksista. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 175.)

### 4.3 Imutelat

Niin sanotussa imutelaripuristimessa eli imutelanipissä on huovan sisäpuolella kumi- tai polyuretaanipinnoitettu imutela, jonka imureiät muodostavat puristettavalle vedelle poistumistilan (kts. kuvio 9.). Telassa oleva imu lisää painegradienttia, mikä tehostaa vedenpoistoa. Kuitenkin tärkeämpi syy käyttää alipainetta on se, että alipaineen avulla paperi saadaan kiinnitettyä hyvin huopaan eikä ennen nippiä synny puhallusta. Imun vaikutuksesta vesi myös siirtyy huovasta telan suuntaan. Vettä ei kuitenkaan juuri siirry telan sisään, sillä telan pyörimisestä aiheutuva keskipakovoima on suurempi kuin alipaineen aiheuttama imu, joten vesi poistuu imurei'istä ulospäin telan pyöriessä. Käytännössä imuteloissa käytetään mahdollisimman suurta eli noin 60–70 kPa:n suuruista alipainetta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 157.)



Kuvio 9. Imutelanippi ja imutelan toiminta (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 157).

## 5 NYKYTILANNE

Tehtaalla on yhteensä 10 kpl tyhjiöpumppuja (kuvasa 2.), joista jokaisella on omat käyttökohteensa. Imut suunnataan puristinosan imuteloille ja imulaatikoille, sekä viiraosan imulaatikoille, joiden tehtävänä on poistaa tehokkaasti vettä prosessista. Pumppujen tämänhetkiset tehontarpeet on laskettu keskimääräisen kuormituksen avulla, joka vaihtelee 70–80 %:n välillä pumpun kokonaistehosta. Näiden arvojen perusteella kukin pumppu kuluttaa keskimäärin noin 8–19 kWh energiaa yhtä paperitonnia kohden, eli yhteensä kaikkien pumppujen kulutus on arviolta reilu 90 kWh/t. Koska tehtaan vuosittainen kapasiteetti on noin 200 000 t, kuluttavat pumput siis vuosittain jopa 18 000 MWh energiaa. Puhutaan siis useiden satojen tuhansien eurojen vuosittaisista energiakustannuksista, johon lisätään vielä tiivisteveden käytöstä aiheutuvat kulut.



Kuva 2. Tehtaan Nash-nesterengaspumput.



Järjestelmän nykytilannetta tarkastellessa oli siis huomattu tarve tutkia perusteellisesti pumppujen toimintaa ja niiden kuluttamia voimavaroja, koska helpoin tapa hillitä energiakustannuksia olisi parantaa pumppujen hyötysuhdetta. Alla olevaan taulukkoon 1. on listattu kunkin pumpun käyttökohde, kokonaistehontarve sekä laskennallinen toteutuva tehontarve yhtä paperitonnia kohden, pyörimisnopeusalue, maksimityhjiö ja -tilavuusvirta sekä vaadittava tiivistenesteen määrä. Pumppu 8 on tällä hetkellä poistettu käytöstä ja puristinhuopien vedenpoiston hoitaa kokonaisuudessaan pumppu 10. Esimerkiksi pumpun 4 tehontarve on noin 183 kW, jolloin se kuluttaa energiaa 183 kWh tunnissa. Paperitonnia kohden se tarkoittaa tällä pumpulla noin 8,221 kW:n tehontarvetta. Tämä on laskettu keskimääräisen tuntituotannon perusteella tehontarpeen ollessa 80 % pumpun kokonaistehontarpeesta.

Taulukko 1. Pumppujen alkuperäistiedot.

Pumppu	Käyttökohde	Pumpun tehontarve (kW)	Pumpun tehontarve / tonni (kW)	Pyörimisnopeus (RPM)	Tyhjiö (kPa)	Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /min)	Tiivisteneste (L/min)
1	PICK-UP IMUTELA	200	8,985	269	68	220	300
2	VIIRAN IMUTELA	180	8,086	244	68	200	300
3	VIIRAN IMUTELA	223	10,018	244	45	270	210
4	TYHJÖFOIILILAATIKKO	183	8,221	297	12/35	15/200	170
5	PICK-UP IMUTELA	162	7,278	269	34/40	100/100	170
6	PUR. IMUTELA/1	225	10,108	244	40	280	210
7	PUR. IMUTELA/2	140	6,289	236	60	150	265
8	1. PUR. HUOPA	190	8,535	269	55	220	0
9	PICK-UP HUOPA	290	13,028	244	55	315	435
10	3. PUR. HUOPA	425	19,092	297	55	380	435
			<b>91,104</b>				<b>2495</b>

## 6 ENERGIATEHOKKUUDEN TUTKIMINEN

Työn aluksi tehtiin karkea suunnitelma eri tutkimusvaiheista ja -kohteista, joita olisi tarpeen tarkastella. Pumppujen energiankulutusongelman suurimpana tekijänä lie-nee se, ettei tehonottoa ole optimoitu ottaen huomioon prosessin nykyiset todelliset tarpeet, vaan tekniikka on vanhentunut. Pumput ovat siis ylimitoitettuja ja prosessin kannalta ne toimivat turhankin tehokkaasti, koska on haluttu parantaa prosessin toi-mintavarmuutta.

Pumppujen optimaalisia imutasoja on tutkittu aikaisemmin ja nykyiset asetetut ali-painearvot vaikuttavat toimivan hyvin koneen ajettavuuden ja paperin laadun kan-nalta, joten niitä ei lähdetty muuttamaan. Kuitenkin näiden imutasojen tuottamiseen vaadittaisiin vain murto-osa niistä tehoista, jotka säätökyvyttömät pumput tällä het-kellä vaativat toimiakseen, mistä johtuen osalla pumpuista alipainetasot pyrkivät jat-kuvasti nousemaan liian suuriksi ja painetta joudutaan tasaamaan niin sanottujen varasilmaventtiilien avulla. Pumpulla 7 tällaista venttiiliä ei ole ja tästä johtuen ali-painetaso imutelalla, jolle imu kohdistetaan, nousee aika-ajoin liian suureksi. Tämä taas rasittaa telan rakenteita. Tehon- ja vedentarpeen optimointi käyttökohteen mu-kaan voisi siis säästää sekä laitteistoa että energiaa.

### 6.1 Pumppujen kierrosnopeudet ja varasilmaventtiilit

Ensimmäinen vaihtoehto pumppujen energiankulutuksen hillitsemiseksi oli kierros-nopeuksien alentaminen, joka onnistuisi taajuusmuuttajien avulla. Aiempien tutki-musten aikana selvitettiin varasilmaventtiilien käyttöastetta sekä pumppujen nykyi-siä kierrosnopeuksia, jotta voitaisiin arvioida taajuusmuuttajien investointikannatta-vuutta. Kyseisessä tutkimuksessa saatiin selville, ettei pumppujen kierrosnopeuk-sien laskeminen ole tuotannon toimivuuden ja energiansäästön kannalta järkevää johtuen siitä, että koneelta imettävä ilman tilavuusvirta on parhaimmillaan niin suuri, että nykyisten alipainetasojen ylläpitämiseksi pumppujen tulee pyöriä niille alun pe-rinkin asetetulla kierrosnopeusalueella. Lisäksi osalla pumpuista kierrosnopeus on jo valmiiksi niin matala, ettei sen alentaminen ole mahdollista häiritsemättä pumpun

oikeanlaista toimintaa ja vesirenkaan muodostumista. Täten pumppuille aluksi kaa-  
vailtuihin taajuusmuuttajiin investoiminen ei ole kannattavaa, vaan energiankulutuk-  
sen hillitsemiseksi on keksittävä jokin toinen ratkaisu, joka on pitkällä tähtäimellä  
kustannuksellisesti järkevää.

Alla olevaan taulukkoon 2. on koottu kaikkien pumppujen kierrosnopeudet ja niiden  
läpi kulkevat viitteelliset tilavuusvirrat, sekä suuntaa antavat alipainetasojen seuran-  
tatiedoista saadut maksimi- ja minimiarvot. Seuraavassa taulukossa 3. ovat näiden  
pumppujen venttiilitiedot sekä hieman tilavuusvirtalaskentaa. Pumpun 10 kohdalta  
puuttuvat venttiilin käyttötiedot, koska tällä pumpulla on jo taajuusmuuttaja, eikä  
venttiilin pitänyt olla käytössä. Näissä taulukoissa on mukana myös käytöstä pois-  
tettu pumppu 8, koska haluttiin tutkia taajuusmuuttajan sopivuutta kaikille olemassa  
oleville pumppuille.

Taulukko 2. Pumppujen tietoja.

Pumppu	Tyyppi	RPM	Alipaine 30 päivää (bar)		Max. Tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)
			Pienin arvo	Suurin arvo	
P1	R2	269	-0,3	-0,47	13200
P4	R1	297	-0,2	-0,45	12000
P5	R1	269	-0,4	-0,44	12000
P6	S1	244	-0,44	-0,46	16800
P7	P2	236	-0,66	-0,75	9000
P8	R2	269	-0,31	-0,43	13200
P9	T2	244	-0,4	-0,43	18900
P10	T2	297	-0,3	-0,44	-

Varasilmaventtiilien aukioloosenttien seurantatiedoista on otanta vain kuukauden  
ajalta, joten ne ovat tässä tapauksessa vain suuntaa antavia. Myöhemmin tutkitta-  
essa paperilaadun vaikutusta alipainetasoihin ja siten varasilmaventtiilien käyttöas-  
teeseen oli myös noita prosenttiarvoja tutkittava vielä uudelleen pidemmältä aika-  
väliltä, koska todellisuudessa varsinkin tiiviillä paperilaaduilla luvut kasvavat suu-  
remmiksi. Venttiilien käyttöaste tulisi kuitenkin olla reilusti suurempi, jotta niiden  
poissulkeminen prosessista olisi kustannustehokasta ja prosessin toimivuuden kan-  
nalta mahdollista.

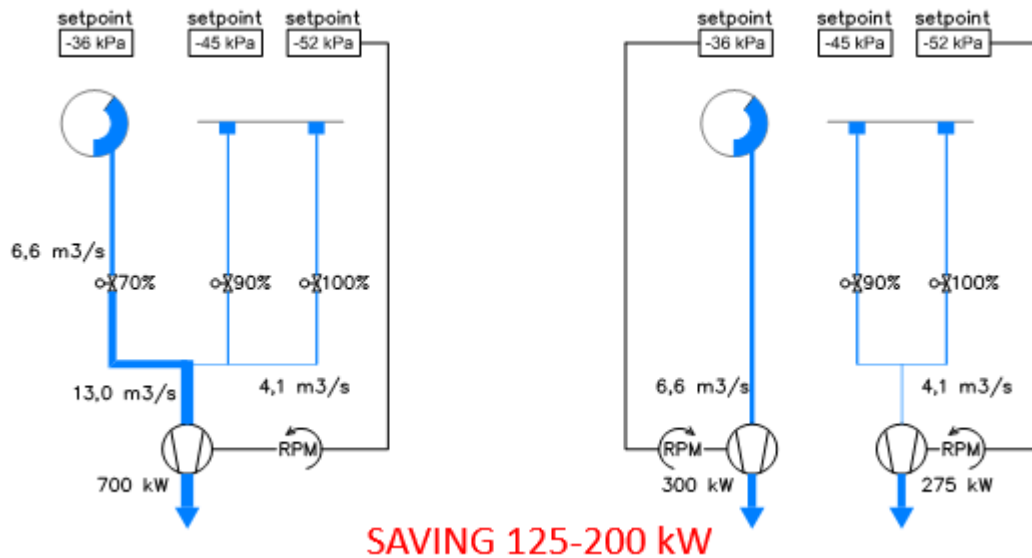
Taulukko 3. Varasilmaventtiilien tietoja.

Pumppu	Venttiili	Halkaisija (mm)	Tyyppi	Pros. (%)	Tilavuusvirta pros. (m <sup>3</sup> /h)	Uusi tilavuusvirta (m <sup>3</sup> /h)
1	PIC-2468	100	R1	48	980-1090	12110-12220
4	PIC-2505	100	R1	26	278-356	11644-11722
5	PIC-2469	65	R1	50	490-500	11500-11510
6	PIC-2365	150	R1	45	1750-1765	15035-15050
7						
8	PIC-2483	100	R1	37	605-657	12543-12595
9	PIC-2485	150	R1	29	755-765	18135-18145
10	PIC-2484	150	R1			

Jos pumput olisivat pienempiä, niiden hyötysuhde olisi huonompi kuin nykyisillä suu- rilla pumpuilla, koska niitä jouduttaisiin pyörittämään korkeilla kierroksilla. Ne kuitenkin tuottaisivat tällöin myös pienemmät imutehot ja laskisivat liian korkeiksi pyrkiviä alipainetasoja, mikä taas poistaisi varasilmaventtiilien tarpeen systeemissä.

Varasilmaventtiilejä uudelleen tutkittaessa selvisi, että pumpulle 10 asennettu taa- juusmuuttaja ei ole täysin poistanut venttiilin käyttötarvetta, vaan sen käyttöaste on edelleen melko korkea. Tämä luultavasti johtuu juurikin siitä, että kyseinen tehon- tarpeeltaan 500 kW:n pumppu ylittää sille asetetut tuotannon vaatimukset, eikä sen kierrosnopeutta pystytä laskemaan tietyn rajan alle, joten liian korkeaa alipainetta joudutaan tasaamaan venttiilin avulla. Taajuusmuuttajan ansiosta paine ja kuormi- tus pysyvät kuitenkin tällä pumpulla hyvin tasaisena. Pumpun pyörittäminen mata- lammalla kierrosalueella säästää myös jonkin verran energiaa, kun on kyse näin suuresta pumpusta, mutta paremman hyötysuhteen siitä saisi ottamalla käyttöön sen tämänhetkisen kapasiteetin kokonaisuudessaan sen sijaan, että energiaa kuluu hukkaan, kun painetta joudutaan tasaamaan pumpun ollessa liian tehokas. Käytän- nössä tämä tarkoittaisi sitä, että osa saman alipainetason luomiseen käytettävistä pumpuista poistettaisiin käytöstä ja pumppu 10 yhdistettäisiin näiden kanssa sa- maan imukanavaan muuttamatta sen kierrosnopeutta.

Kuviossa 10. on esimerkki siitä, kuinka paljon energiatehokkaammin kaksi tavan- omaista pienempää nesterengaspumppua toimivat pyöriessään matalilla kierroksilla verrattuna yhteen suureen pumppuun. Kaksi pumppua pystyvät itse asiassa hoita- maan saman tehtävän pienemmällä yhteenlasketulla tehontarpeella.

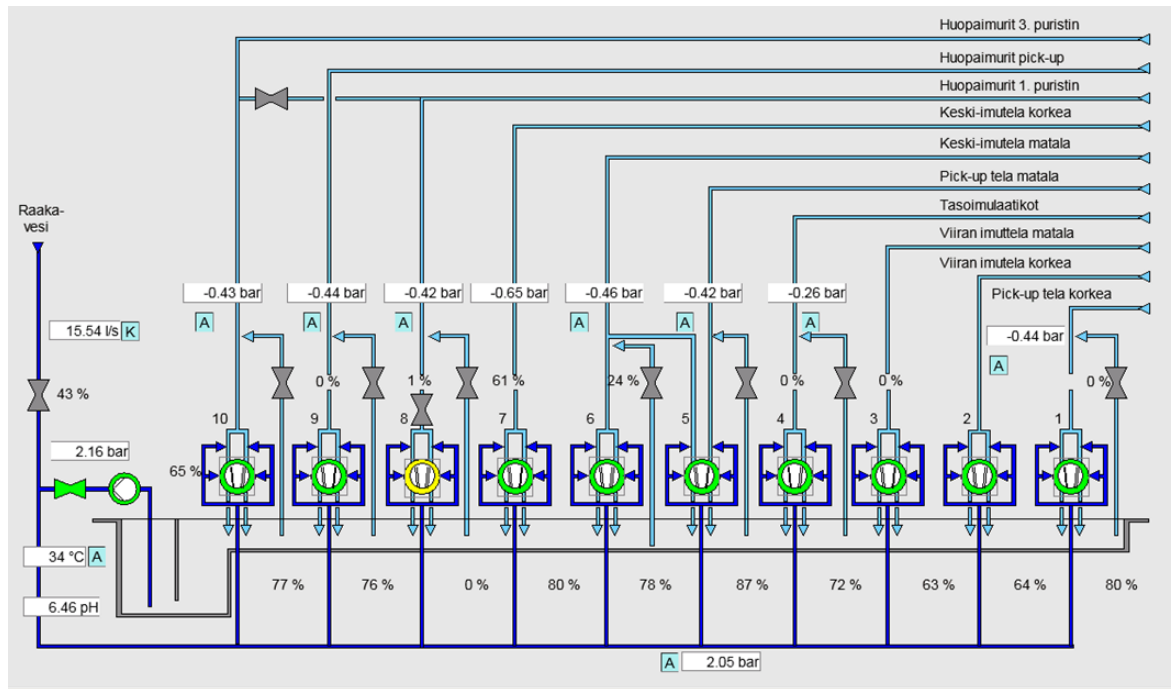


Kuvio 10. Kahden nesterengaspumpun käytön etu tehontarpeen kannalta verrattuna yhteen pumppuun (Lahtinen & Tujunen 2018).

## 6.2 Tiivistevesijärjestelmä

Seuraavaksi tutkittiin pumpuilla käytettävän nesteen eli tiivisteveden määrää ja laatua. Tässä tapauksessa tiivistevesi koostuu viileämmästä raakavedestä sekä kiertovedestä, jota kierrätetään suljetussa piirissä. Käytännössä tiivistevesijärjestelmä toimii siten, että varsinaiseen tiivistevesilinjaan pumpataan kiertovettä vesialtaasta, johon pumppujen lämmin tiivistevesi johdetaan ja siihen lisätään halutun loppulämpötilan mukaan viileämpää raakavettä. Tiivistevesilinja haarautuu kaikille kymmenele tyhjiöpumpulle alla olevassa kuviossa 11. olevan tiivistevesijärjestelmän toimintakaavion mukaan.

Raakavesilinjasta tuleva vesimäärä annostellaan automaattiventtiilin avulla, joka säätyy lämpötilan ja paineen mukaan. Tällä hetkellä asetusarvo tiivisteveden lämpötilalle on 40 °C. Raakaveden virtaus tiivistevesilinjaan vaihtelee vuodenajan mukaan 8–20 l/s välillä, kesällä kulutus voi nousta jopa kaksinkertaiseksi talveen verrattuna. Raakavesilinjassa on myös mekaaninen takaiskuventtiili, joka estää kiertoveden pääsyn raakavesilinjaan. Veden kierrätys ja alipainetasojen ylläpito toimivat siis automatiikalla, joten tyhjiöjärjestelmän toimintaan ei ole normaalitilanteessa puututtu.



Kuvio 11. Tyhjiöpumput ja tiivistevesijärjestelmä.

Periaate tehtaalla tyhjiöpumppujen suhteen on ollut tähän asti se, että pumpuilla käytettävän tiivisteveden virtaus pumpuille säädetään karkeasti sellaiseksi, että se riittää vesirenkään muodostamiseen ja pumppujen toiminta pysyy vakaana. Kunkin pumpun tiivistevesilinjan tulopuolella on tällä hetkellä virtausmittarit (kts. kuva 3.), jotka mittaavat pumpun kumpaankin pesään tulevan veden tilavuusvirtaa. Virtausta kuitenkin säädellään karkeasti käsiventtiileillä ja mittareista suurin osa on epäkunnossa, joten todellinen tilavuusvirta oli tarpeen mitata erikseen kannettavalla virtausmittarilla. Tällä perusteltiin myös mittareiden vaihtotarve.



Kuva 3. Nash-pumppujen virtausmittarit.

### 6.2.1 Virtausmittaukset

Virtausmittaukset toteutettiin Flexim FLUXUS F601 -kannettavalla ultraäänivirtausmittarilla (kts. kuva 4.), joka toimii kuluaikakorrelaatioperiaatteella. Se soveltuu kaikille nesteille, joissa ultraääni etenee vaimenematta niin, että signaali voidaan luotettavasti mitata sen kuljettua putken läpi yhden tai useamman kerran. Laitteistolla voidaan mitata myös jäähdytystehoa, lämpöenergiaa, liuosten väkevyksiä, virtaus- ja etenemisnopeutta sekä seinämien paksuuksia. (Hantor-Mittaus Oy 2006.)



Kuva 4. Flexim FLUXUS F601 -virtausmittari.

Tutkimuksen aluksi mittarin anturit asetettiin ohjeiden mukaisesti suoralle putkiosuudelle mahdollisimman kauas erilaisista mutka- ja liitoskohdista luotettavien mittaus tulosten aikaansaamiseksi. Sen jälkeen mittariin syötettiin kaikki vaadittavat tiedot, kuten putken halkaisija ja seinämän paksuus. Mittaukset suoritettiin vuorotellen jokaiselle pumpulle ja tuloksena saatiin veden virtaustilavuusarvot (yksikkö l/s). Alun perin oli tarkoitus mitata virtausta useamman tunnin ajan, jotta nähtäisiin siinä tapahtuvat mahdolliset vaihtelut, mutta laitteiston mittaus tietojen lukua varten tietokoneelle ladattava ohjelmisto oli kuitenkin vanhentunut, eikä sen asentaminen uusimmille tietokoneille ollut mahdollista. Tästä johtuen pumpuilta päädyttiin ottamaan vain lyhyemmät mittaukset paikan päällä. Muutaman minuutin pituisista mittauksista saatujen virtausarvojen avulla arvioitiin keskimääräinen virtaustilavuus.



Alla olevassa taulukossa 4. on laskettu pumppukohtaiset virtausarvot saatujen mittausarvojen perusteella. Lisäksi yhteen sarakkeeseen on laskettu minuuttikohtainen vaihtelu sekä keskiarvovirtaus yksikössä l/min. Virtauksen tulisi olla mahdollisimman tasaista, koska pienetkin vaihtelut siinä ovat kulutuksen kannalta haitaksi. Suuret vaihtelut voivat kuitenkin tässä tapauksessa johtua esimerkiksi putkiin kertyvästä humuksesta ja muusta liasta, joka tukkii putkia.

Taulukko 4. Virtausmittausten tulokset.

Pumppu	Tiivistenesteen virtaustilavuus min. (L/min)	Tiivistenesteen virtaustilavuus max. (L/min)	Vaihtelu (L/min)	Keskiarvovirtaus (L/min)
1	262,2	318,6	56,4	290,4
2	274,8	283,8	9,0	279,3
3	186	195,6	9,6	190,8
4	270,6	286,8	16,2	278,7
5	309	329,4	20,4	319,2
6	209,4	240,6	31,2	225
7	298,8	318,6	19,8	308,7
8	0	0	0	0
9	390	398,4	8,4	394,2
10	429,6	451,2	21,6	440,4

Seuraavassa taulukossa 5. on sen sijaan vertailtu kunkin pumpun toimitustiedoissa annettua tiivistenesteen virtaustilavuuden ohjearvoa sekä mittausarvojen perusteella laskettua keskiarvovirtausta. Mitattu arvo ylittää selvästi ohjearvon pumpuilla 4, 5 ja 7, mistä muodostuu yhteensä noin 12 % eli yli 300 litraa ylimääräistä vedenkulutusta minuutissa. Tämä tietenkin aiheuttaa pidemmän päälle huomattavan määrän turhia kuluja. Vedenkulutusta ei kuitenkaan voida optimoida ennen uusien mittareiden asentamista.

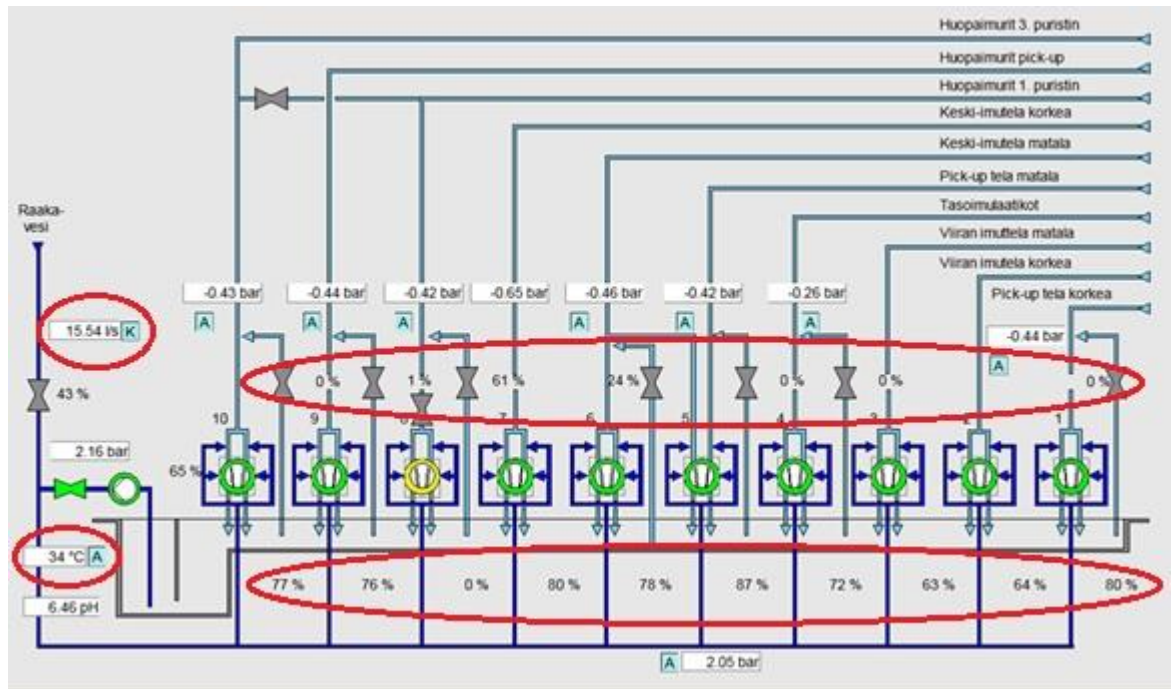
Taulukko 5. Tiivistenesteen viitearvo ja mitattu arvo.

Pumppu	Tiivisteneste Keskiarvovirtaus		Ylimääräistä
	(L/min)	(L/min)	
1	300	290,4	0
2	300	279,3	0
3	210	190,8	0
4	170	278,7	108,7
5	170	319,2	149,2
6	210	225	15
7	265	308,7	43,7
8	0	0	0
9	435	394,2	0
10	435	440,4	5,4
<b>Total</b>	<b>2495</b>	<b>2726,7</b>	<b>316,6</b>
			12,69 %

### 6.2.2 Tiivisteveden lämpötila ja laatu

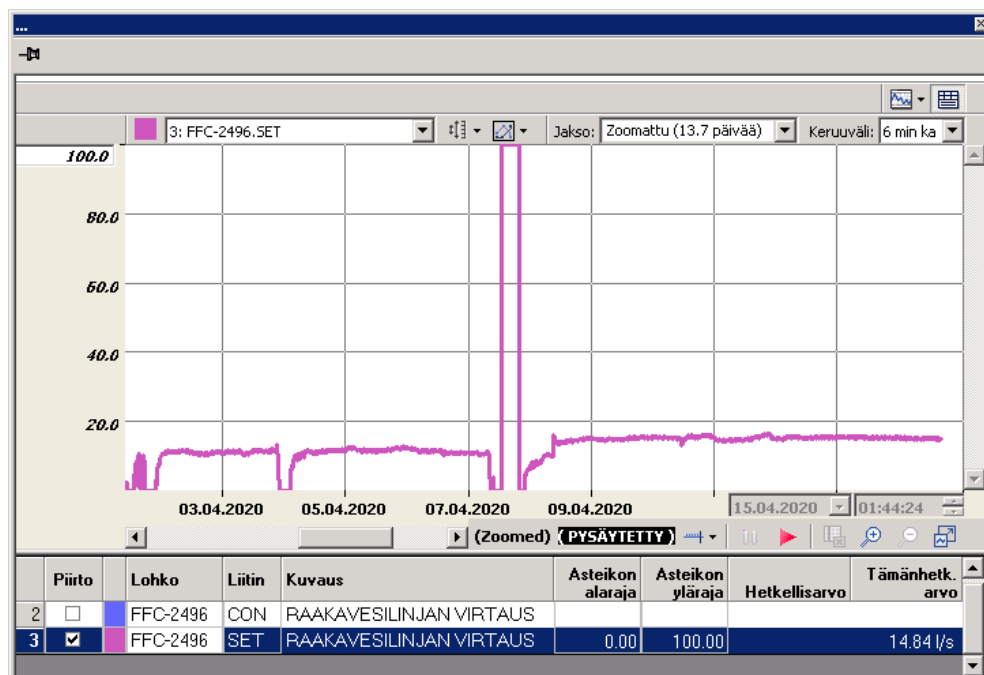
Pumppujen valmistajalta saatujen Ahlströmin ([viitattu 23.1.2020]) dokumenttien mukaan nesteen tehtävänä on tiivisteeseen lisäksi toimia myös jäähdytysaineena. Pumppujen ominaistehoon vaikuttaa oleellisesti se, että pumpun sisällä oleva vesiringas lauhduttaa osan imetyssä, kyläisessä kaasussa olevasta vesihöyrystä, koska tiivistevesi on yleensä kylmempää kuin prosessista ilmetty ilma. Tällöin tyhjiöpumpun tuotto suurenee ilman, että sen tehontarve kasvaa, jolloin sen ominaistehontarve laskee. Tiivistevedeen joudutaan siis tästä syystä ottamaan kylmempää raakavettä mukaan, sillä pelkkä kiertovesi on liian lämmintä ja se laskisi täten pumpun imutehoa. Pumppujen toimittajan mukaan tulisi käyttää viileintä mahdollista käytettävissä olevaa vettä pumppujen tiivistevedenä.

Tiivisteveden lämpötilaa päätettiin tästä syystä laskea 5 °C eli sen halutuksi loppulämpötilaksi asetettiin 35 °C. Muutoksia pumppujen kuormituksessa, varasilmaventtiilien käyttöasteissa ja raakaveden virtauksessa seurattiin viikon ajan. Muutoksia seurattaessa selvisi, ettei 5 °C:n lämpötilan lasku tuottanut tällä aikavälillä näkyviä muutoksia pumppujen kuormitusarvoissa tai varasilmaventtiilien käyttöasteissa. Alla oleva kuvio 12. on kuvakaappaus pumppujen ohjaussivulta, johon on punaisella ympyröity seurattavat arvot eli raakaveden virtaus, tiivisteveden lämpötila, pumppujen kuormitukset (alempi) sekä venttiilien aukiolo prosentit.

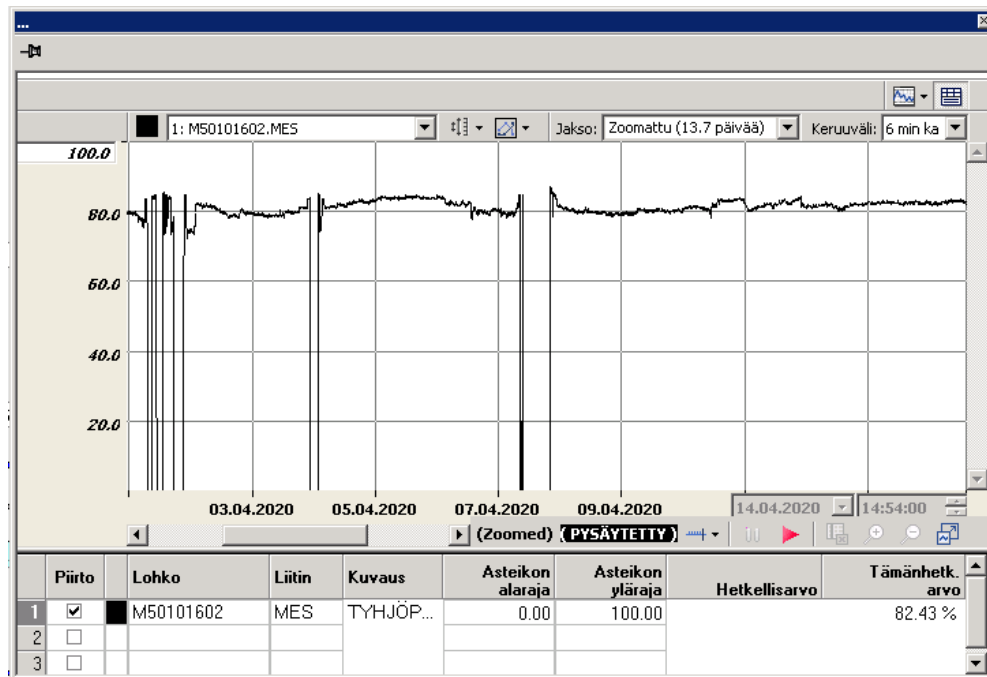


Kuvio 12. Seurattavat arvot.

Alla olevassa kuviossa 13. näkyy raakavesilinjan kulutus noin parin viikon ajalta, josta huomaa kulutuksen nousseen noin 4 l/s lämpötilamuutoksen jälkeen. Tämä on ainut näkyvä muutos, sillä tarkasteltaessa seuraavaa esimerkkikuviota 14. huomataan, että pumppujen kuormitus ei ole muuttunut tutkimuksen aikana, vaan ne käyvät maksimikuormitusrajoilla edelleen. Lämpötilan laskun ei siis todettu parantavan pumppujen imutehoja ja tästä johtuen lämpötila palautettiin takaisin alkuperäiseen.



Kuvio 13. Raakavesilinjan virtaus.



Kuvio 14. Erään pumpun kuormitusarvot prosentteina noin parin viikon ajalta.

Tämän vaiheen lisäksi tutkittiin myös tiivisteveden laatua, koska myös se vaikuttaa pumppujen oikeanlaiseen toimintaan ja elinikään. Tiivistevesijärjestelmään kuuluvan kiertovesialtaan puhdistus toteutettiin erään pesuseisokin yhteydessä alihankkijan toimesta, sillä allasta ei ollut puhdistettu vuosiin. Tutkimuksen aikana päädyttiin vaihtamaan virtausmittareiden lisäksi myös vanha raakavesilinjan takaiskuventtiili uuteen. Muuten tiivisteveden suhteen jatketaan samoin kuin ennen, koska uusien mittareiden vaihdon lisäksi muilla muutoksilla ei pystytty todistamaan olevan riittävän suurta hyötyä. Lämmönvaihtimen asentaminen tiivistevesijärjestelmään ei ratkaisisi raakaveden kulutusongelmaa johtuen sen aiheuttamista hankinta- ja puhdistuskustannuksista.

### 6.3 Alipainetasot

Kuten sanottu, paperin valmistus on perälaatikon jälkeen periaatteessa vedenpoistoa, joten näin ollen paperin kosteuden tasaisuuteen vaikuttavat kaikki paperikoneen osaprosessit. Paperin retentoituminen viiralle vaikuttaa moneen asiaan prosessin alkuvaiheessa, kuten parantaa paperin symmetrisyyttä sekä helpottaa vedenpoistoa. Parempi vedenpoisto viiraosalla taas vähentää vedenpoistotarvetta puristinosalla ja tarkoittaa, että imulaatikoiden imuja voidaan vähentää, mikä hillitsee

konekudosten eli viirojen ja huopien kulumista sekä sähköenergian kulutusta. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 154.)

Koneen nopeus vaikuttaa rainan viipymäaikaan nipissä, joten nopeuden kasvu laskee kuiva-ainetasoa puristimen jälkeen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että mitä suuremmalla tuotantoteholla ajetaan, sen tehokkaampi tulee myös alkupään vedenpoistoprosessien olla. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 159.)

Koneella käytössä olevia alipainetasoja ei ollut tarkoitus lähteä tutkimaan sen tarkemmin, sillä olemassa olevilla laitteistoilla ei ollut mahdollista tutkia vedenpoistoprosessin toimivuutta ja alipainetasojen vaihtelua tarpeeksi tarkasti. Summittaiset kokeilut taas olisivat rasittaneet prosessin toimintaa. Alipainetasoista kerättiin kuitenkin tietoa muutaman kuukauden ajalta niissä esiintyvän mahdollisen vaihtelun suuruuden arvioimiseksi. Kaikilla pumpuilla maksimiyhjiö vaihtelee 40–68 kPa:n välillä.

Alla olevassa taulukossa 6. näkyvät paperilaatukohtaiset alipainetasot. Arvot on kerätty tuotannonohjausjärjestelmän seurantatiedoista ja ne on suhteutettu normaaliin ilmakehän paineeseen, joka on siis 1,013 25 bar, eli noin 1 bar. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että järjestelmässä osoitettu 0,45 barin alipaine tarkoittaa normaaliin ilmanpaineeseen suhteutettuna arviolta 0,56 barin loppupainetta. Arvoista huomataan, että joillakin pumpuilla alipainetasot eivät juurikaan vaihtele, kun taas esimerkiksi pumpulla 4 vaihtelua on melko paljonkin. Tasaiset arvot johtuvat asetetusta alipainearvosta, jota säädellään siis varasilmaventtiileillä. Esimerkiksi pumpulla 6 asetettu maksimiarvo alipaineelle on 0,45 bar, jossa se pysytteleekin tuotannon muutoksista riippumatta.

Paineen sijaan pumppujen imutehovaatimusten muutokset näkyvät siis pumppujen kuormituksissa, ja koska tässä tapauksessa nekin pysyttelevät jatkuvasti lähellä maksimirajaa, vain varasilmaventtiilien käyttöasteista voidaan jonkin verran tulkita eri paperilaatujen vaatimuksia.

Taulukko 6. Erilaisten paperilaatujen vaatimat alipaine arvot sekä näiden keskiarvot.

Pvm	Laatu	P1 (bar)	P4 (bar)	P5 (bar)	P6 (bar)	P7 (bar)	P9 (bar)	P10 (bar)	Ka. (bar)
23.11.2019	555050	-0,47	-0,33	-0,38	-0,45	-0,61	-0,41	-0,43	-0,44
25.11.2019	656080	-0,42	-0,35	-0,39	-0,45	-0,61	-0,41	-0,43	-0,44
29.11.2019	205050	-0,47	-0,25	-0,4	-0,45	-0,59	-0,4	-0,43	-0,43
17.12.2019	717150	-0,3	-0,42	-0,41	-0,45	-0,64	-0,4	-0,43	-0,44
19.12.2019	561072	-0,38	-0,24	-0,41	-0,45	-0,61	-0,4	-0,43	-0,42
31.12.2019	205050	-0,46	-0,24	-0,4	-0,45	-0,5	-0,42	-0,43	-0,41
5.1.2020	415150	-0,3	-0,3	-0,44	-0,45	-0,6	-0,44	-0,43	-0,42
20.1.2020	717150	-0,28	-0,42	-0,44	-0,45	-0,54	-0,44	-0,43	-0,43
23.1.2020	555050	-0,44	-0,22	-0,42	-0,45	-0,52	-0,43	-0,43	-0,42

## 6.4 Paperilaadut ja ajomallit

Tässä tutkimusosuudessa käsitellään erilaisia paperilaatuja ja ajomalleja, jotka vaikuttavat tyhjiölaitteistolta vaadittaviin tehoihin ja ominaisuuksiin. Tavoitteena oli tutkia paperilaatujen vaikutusta imutehoihin ja siten tyhjiöpumppujen kuormiin. Ajomalleilla tarkoitetaan tässä yhteydessä koneen laatukohtaisia säätöjä, kuten jauhatusastetta ja imutasoja.

### 6.4.1 Paperilaatujen erot

Paperilaadut ja laatu koodit perustuvat useisiin paperin ominaisuustekijöihin. Tehdas tuottaa kolmea erilaista voima- ja säkkipaperityyppiä, jotka ovat MF eli kalanteroitu paperi, UG eli tavallinen käsittelemätön paperi ja CL eli clupak-käsitelty paperi. Näihin lisätään asiakkaan tilauksen ja loppukäyttökohteen mukaan erilaisia liimoja, kuten märkäluja- ja hartsiliimaa. Paperia tuotetaan pääasiassa sekä valkaisuamattomana että valkaistuna laatuna, mutta erilaisia variaatioita näistäkin löytyy.

Eri paperilajeja on kymmeniä erilaisia, joista jokaisesta on saatavilla useampaa paksuutta. Tuotettavan paperin paksuudesta puhuttaessa tarkoitetaan itseasiassa sen neliömassa-arvoa, joka vaihtelee 50–160 gramman välillä. 50-grammainen paperi on todella ohutta ja sen hyvän ajettavuuden takaamiseksi koko prosessin täytyy toimia optimaalisesti, kun taas 160-grammainen paperi on hyvin lähellä kartonkia, joka taas edellyttää vedenpoistoprosessilta tehokkuutta varsinkin kovilla nopeuksilla.

Muun muassa grammapaino ja jauhatusaste vaikuttavat paperin tiiveyteen ja siten vaadittaviin imutehoihin. Vedenpoistojärjestelmän imuilta vaaditaan siis säädettävyyttä, sillä esimerkiksi tiiviin paksun paperin kuiva-aineosuus tulee olla yhtä lailla oikea sen siirryessä kuivatusosalle, kuin ohuen huokoisen paperin, jotta höyryn käyttö kuivatusosalla voidaan minimoida ja paperi on pope-osuudelle saapuessaan tarpeeksi kuivaa. Höyry on kallis kuivausmenetelmä, joten sen käyttö pyritään aina minimoimaan tehokkaalla vedenpoistolla prosessin alkuvaiheessa. Tällä hetkellä höyryn käytöstä johtuvien kustannuksien osuus tehtaan vuosittaisista kustannuksista on noin 30 % ja sähkön yli 50 %, joten pienikin säästö näissä vaikuttaa pitkällä tähtäimellä merkittävästi vuosikuluihin.

#### **6.4.2 Huokoisuus ja ilmanläpäisykyky**

Paperin huokosilla on suuri merkitys erityisesti nesteiden ja kaasujen virtaukselle. Huokoisuus vaikuttaa siis paperin ilmanläpäisykykyyn, joka taas vaikuttaa tyhjiöpumpuilta vaadittaviin imutehoihin, sillä halutun imutason luomiseksi vaaditaan huokoista ohutta paperia ajettaessa huomattavasti enemmän tehoa kuin ajettaessa paksua tiivistä paperia. Yleinen huokoisuuden mittaamenetelmä on Bendtsen-ilmanläpäisevyys, jossa mitataan paperin läpäisevä ilmavirtaus (yksikkö ml/min) tietyllä mittapäällä ja 1,47 kPa:n paine-erolla. Toinen yleinen tiiville paperille soveltuva mittaustapa on Gurley-menetelmä, jossa mitataan tietyn ilmatilavuuden paperin läpi painamiseen kuluva aika sekunteina paine-erolla 1,21 kPa. Tässä tapauksessa puhuttaessa ilmanläpäisykyvystä se on mitattu Gurley-menetelmällä. (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2000, 89.)

Erilaisia paperilaatuja tutkittaessa selvisi, että parhaan ilmanläpäisykyvyn omaava paperilaatu on 70–80-grammaista sementtisäkkipaperia, joka on lisäksi sekä joustavaa että lujaa. Ohuempi 50-grammainen paperi taas jauhetaan tiheämmäksi tassisemman formaation aikaansaamiseksi, mikä laskee sen ilmanläpäisykykyä. Kuitenkin kaikista tiiveintä on 150-grammainen paperi, jonka ilmanläpäisyarvot nousevat jopa yli 80 % suuremmiksi kuin aiemmin mainitulla säkkipaperilla. Hyvää huokoisuutta vaaditaan kuitenkin vain joiltakin paperilaaduilla, joten siksi esimerkiksi

tämän paksumman paperin huokoisuudella ei ole niinkään merkitystä, vaan sen laadukkuuden määrittelevät muut ominaisuudet, kuten erilaiset lujuusarvot.

Alla olevassa taulukossa 7. on listattu Gurley-menetelmällä mitatut ilmanläpäisyarvot muutamalle erilaiselle paperilaadulle sekä näiden laatuojen tuottamiseen vaaditut pumppujen keskimääräiset kuormitukset. Kuten taulukosta nähdään, ilmanläpäisyvastus ei vaikuta merkittävästi pumppujen kuormiin, vaan ne liikkuvat 70–80 %:n välillä laadusta riippumatta. Pienikin muutos kuormissa tarkoittaa kuitenkin pitkällä tähtäimellä suurta vaihtelua energiankulutuksessa. Kaikkien käytössä olevien pumppujen tuntikohtaiset tehontarpeet yhteenlaskettuna saadaan yhteensä noin 2680 kW, mikä tarkoittaa 80 %:n maksimikuormitusarvolla 2144 kW:n tehontarvetta. Taulukon mukaan pumppujen pienin keskimääräinen kuormitusarvo on 72,64 %, mikä tarkoittaa kokonaistehoon suhteutettuna 1947 kW. Pienimmän ja suurimman kuormitusarvon välillä on eroa siis 197 kW eli noin 7 %, mikä taas tarkoittaa vuoro-kausikohtaisessa energiankulutuksessa suurimmillaan jopa yli 4000 kWh:n muutosta.

Taulukko 7. Laatukohtaiset ilmanläpäisyarvot sekä pumppujen keskimääräiset kuormitukset näillä laaduilla.

Pvm	Laatu	Ilmanläpäisy- vastus (s)	Kuormitus- ten ka. (%)
23.11.2019	555050	20,09	72,84
25.11.2019	656080	16,77	74,06
29.11.2019	205050	27,13	72,64
17.12.2019	717150	70,99	79,37
19.12.2019	561072	64,59	76,53
31.12.2019	205050	24,31	72,91
5.1.2020	415150	65,91	76,73
20.1.2020	717150	99,35	78,59
23.1.2020	555050	29,42	73,17
<b>Total</b>		<b>82,58</b>	<b>6,73</b>

#### 6.4.3 Paperin lopullinen laatu

Paperinvalmistuksessa lopullinen laatu on siis monen tekijän summa, joten esimerkiksi suoraan pumppujen imutehoista riippuvat varasilmaventtiilien aukiolo prosentit



kuten nämä kuormitusprosentitkaan eivät muutu suoraan verrannollisesti suhteessa paperin huokoisuuteen. Tämä johtuu siitä, että jo pelkästään koneen operaattorin vaihtuminen vaikuttaa paperin lopullisiin arvoihin, koska jokaisella on parhaaksi kokemansa tapa ohjata paperikonetta. Näiden arvojen suhdetta toisiinsa on siis lähes mahdotonta tarkastella luotettavasti, joten voidaan olettaa, että tuotannolliset seikat vaativat nykylaitteistolta suurimmillaan maksimikuormituksen. Tämä todettiin sen perusteella, että kaikista huokoisimmilla paperilaaduilla osa varasilmaventtiileistä on alle 20 % auki eli pumpuilta vaaditaan tällöin huomattavasti imutehoa tehokkaan vedenpoistoprosessin ylläpitämiseksi.

Paperin lopulliseen laatuun vaikuttavat mm.

- tulevan massan laatu
- jauhatusaste
- massan pH
- lisäaineiden annostelu
- radan kireys
- nippipaineet
- koneen nopeus ja
- vesiraja.

## 6.5 Tyhjiöpuhaltimet

Toinen vaihtoehto tyhjiön luomiseksi ovat tyhjiöpuhaltimet. Viimeisessä työvaiheessa perehdyttiin tyhjiöpuhallinteknologiaan vaihtoehtona nykyisille tyhjiöpumpuille, sillä nykyinen laitteisto on 80-luvun tekniikkaa ja sen päivittäminen saattaisi pitkällä tähtäimellä osoittautua kannattavammaksi vaihtoehdoksi edellisten pienten muutosten sijaan. Tavoitteena oli selvittää, olisiko pumppujen kokonaisvaltainen tai osittainen korvaaminen puhaltimilla kustannustehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden kannalta järkevää. Tyhjiöpuhaltimien etuna verrattuna tavanomaisiin neste-rengaspumppuihin on se, että ne vähentäisivät vedenkäytöstä johtuvia kuluja. Tyhjiöpuhaltimien hankkiminen ja asentaminen ovat kuitenkin kallis investointi, joten sen kannattavuus tulisi perustella, mikäli tällaiseen ratkaisuun päädytään. Lisäksi

oli tarkoitus tutkia mahdollisuutta korvata vain osa pumpuista puhaltimilla. Käytännön perehtymisen apuna toimi kuvassa 5. oleva pieni tyhjiöpuhallin, joka luo pienen imun koneen viiraosan alkupäähän veden suotautumisen parantamiseksi.



Kuva 5. Viiraosan tyhjiöpuhallin.

### 6.5.1 Tyhjiöpuhallinkokoonpanon rakenne ja toiminta

Turbopuhallinkokoonpano (kts. kuvio 15.) koostuu itse turbosta, laakereille tarkoitettusta öljykoneikosta, jäähdytysilmapuhaltimesta ja pisaranerottimesta, jolla estetään prosessiveden ja epäpuhtauksien pääsy puhaltimen sisälle. Turbopuhallin imee koneelta ilmaa, jota sen saapuessa puhaltimen pesään pyöritetään siipipyörän avulla suureen nopeuteen (jopa 11 500 rpm) ja puhalletaan ulos poistokanavasta. Poistoilman lämpötila riippuu alipainetasosta, sillä mitä suurempi alipaine, sen kuumempaa pakoilma on. Useimmissa kokoonpanoissa lämpötila on yli 100 °C. Tätä pystytään hyödyntämään erilaisissa lämmön talteenottoratkaisuissa. Puhaltimessa on valmiina taajuusmuuttaja, jonka avulla kierroksia voidaan säätää portaattomasti ajoikkunan puitteissa. Tästä johtuen niiden toiminta on helppo sopeuttaa erilaisten ajo-olosuhteiden mukaan ja siten minimoida syntynyt energiankulutus. (Lahtinen & Tujunen 2018.)



Kuvio 15. Runtech Systems Oy:n valmistaman turbopuhaltimen rakenne (Lahtinen & Tujunen 2018).

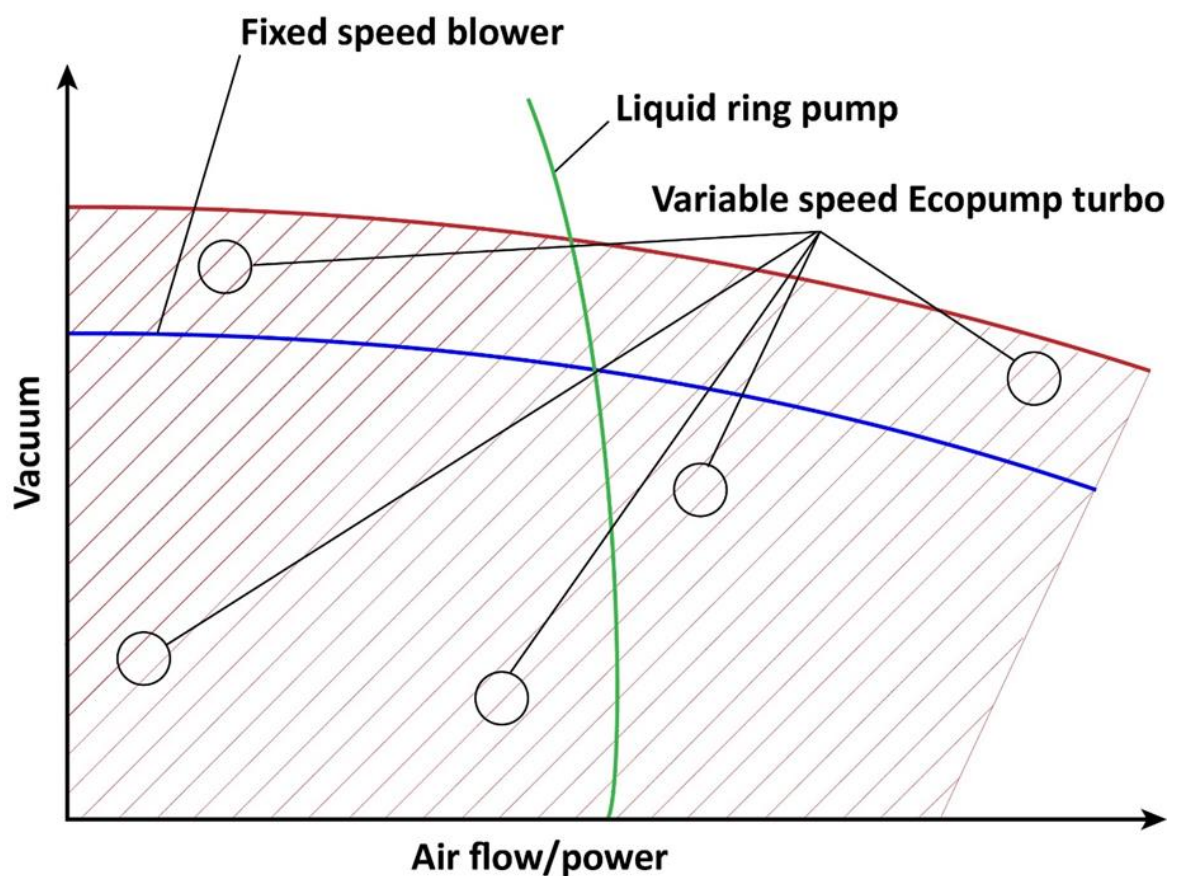
Runtechin tarjoamilla EcoFlow-vedenpoistomittalaitteilla pystytään kartoittamaan imukohteissa tapahtuvan vedenpoiston oikeanlaista toimintaa ja siten optimoimaan vedenpoistoprosessi laitteiston ja energiankulutuksen kannalta parhaaksi. Lisäksi puhallinjärjestelmään kuuluvan vedenerottimen (kts. kuvio 16.) avulla voidaan kerätä ajankohtaista tietoa imutelojen ja -laatikoiden vedenpoistosta ja siten säädellä tyhjiötasoja ja hillitä kudosten eli viirojen ja huopien kulumista. Myös itse turbopuhaltimien toimintaa voidaan seurata ajankohtaisesti. (Lahtinen & Tujunen 2018.)



Kuvio 16. RunTech Systems Oy:n valmistama vedenerotin (Lahtinen & Tujunen 2018).

### 6.5.2 Tyhjiöpuhaltimien ja -pumppujen vertailu

Ajoikkunan puitteissa on puhaltimella aina hyvä hyötysuhde, kun taas nesterengaspumpuilla hyötysuhde on paras mahdollinen, kun pumpun koko on suuri virtausmäärään nähden. Alhaisilla alipainetasoilla hyötysuhde on nesterengaspumpuilla aina huonompi, koska ne pyörivät pääsääntöisesti samoilla kierroksilla ja siten niiden energiankulutus pysyy kutakuinkin samana. Alla oleva pumppukäyräkuva kuvaa tätä tyhjiöpuhaltimen ja -pumpun eroa tyhjiötason muuttuessa. (Lahtinen & Tujunen 2018.)



Kuvio 17. Pumppu- ja puhallinkäyrien vertailu (Lahtinen & Tujunen 2018).

Kustannuksia ajatellen turbopuhallin on siis perinteistä nesterengaspumpua energiatehokkaampi. Valmistajan mukaan puhaltimen avulla voidaan säästää 30–60 % sähköenergiaa verrattuna perinteiseen nesterengaspumpujärjestelmään. Lisäksi ne eivät tarvitse toimiakseen lainkaan vettä, joten vedenkäyttökustannuksissa säästettäisiin 100 % nykyisestä. Korvattaessa tyhjiöpumppuja tällaisilla puhaltimilla pysy-

tyttäisiin hyvin pitkälle myös käyttämään hyväksi jo olemassa olevia asennusaloja ja tiloja, joten suuria rakenteellisia muutoksia ei tarvitsisi tehdä. (Lahtinen & Tujunen 2018.)

Seuraavassa taulukossa 8. on lopuksi vertailtu RunTech Systems Oy:n toimittamien turbopuhaltimien vuosikustannuksia nesterengaspumppujen vuosikustannuksiin. Arvion mukaan vuosisäästöjä syntyisi ainakin 100 000 €:n edestä ottaen huomioon järjestelmän takaisinmaksuajan, joka on arviolta 1–3 vuotta. Taulukon lukujen perusteella voidaan siis jo puhua kannattavasta investoinnista, mutta päätös voidaan tehdä vasta varsinaisen auditoinnin ja tehdaskohtaisten laskelmien jälkeen, jotka toteutetaan olosuhteista johtuen vasta myöhemmin kesällä, jolloin työn toteutus jatkuu.

Taulukko 8. Vertailu nesterengaspumppujen ja turbopuhaltimien vuosittaisista energiakustannuksista (Lahtinen & Tujunen 2018).

	3 x Liquid Ring Pumps	1 x Turbo	2 x Turbos
Typical power consumption	700 - 1000 kW	550 – 800 kW	350 – 550 kW
Energy costs / year <small>70 EUR/MW</small>	390 – 560 kEUR	310 – 450 kEUR	200 – 310 kEUR
TCO for 10 years	5,9 MEUR	4,5 MEUR	3,2 MEUR
Saving / 10 years Saving / year		1 400 000 EUR 140 000 EUR	<b>2 700 000 EUR</b> 270 000 EUR

## 7 YHTEENVETO

Tyhjiöjärjestelmän ehdoton toimintavarmuus takaa tuotannon sujuvuuden ja paperin oikeanlaisen laadun, joten siitä ei voida tinkiä edes energiansäästöä tavoitellessa. Vaikka työvaiheiden muutokset ja saadut tulokset vaikuttivat lopulta alkuperäisiin tavoitteisiin, saatiin tutkimusten aikana kuitenkin kaikki halutut tiedot tyhjiöjärjestelmästä. Kaikkien tutkimusvaiheiden jälkeen päädyttiin siihen tulokseen, että pienten muutosten tekeminen esimerkiksi tiivisteveden lämpötilaan, alipainetasoihin tai pumppujen kierrosnopeuksiin ei ole järkevää, koska muutoksilla ei pystytä osoittamaan tarpeeksi suurta hyötyä ajateltaessa vuosittaisia energiakustannuksia.

Tutkimusosuuksien, kuten tiivistevesitutkimusten johdosta kuitenkin huollettiin ja puhdistettiin vanhoja tyhjiöjärjestelmän osia ja perehdyttiin syvemmin järjestelmän toimintaan ja sen rooliin paperinvalmistuksessa. Lisäksi kartoitettiin tuotannon laitteistolle asettamia vaatimuksia, kuten järjestelmän sopeutumiskykyä tuotannon erilaisiin muutoksiin. Tärkeää tietoa saatiin myös tyhjiöjärjestelmän nykyisestä kunnosta ja energiankulutuksesta sekä siitä, millä tavoin nykyisellä laitteistolla säästettäisiin parhaiten energiaa.

Potentiaalisimmaksi vaihtoehdoksi tässä vaiheessa todettiin kuitenkin laitteiston päivittäminen, jota pohditaan tarkemmin vielä puhallintoimittajan kanssa, sillä tarkempi kustannuslaskenta ja säästöpotentiaalin arvioiminen vaativat asiantuntijoiden mielipidettä ja paikallisesti tehtävää tyhjiöauditointia. Puhallintoimittajan lupaamat 30–60 %:n säästöt vuosittaisissa energiakustannuksissa ja tiivistevesikustannusten poistuminen verrattuna nykyiseen tyhjiöjärjestelmään kuitenkin todettiin järkeväksi perusteeksi lähteä tutkimaan asiaa tarkemmin, koska luvatus säästöpotentiaalin perusteella laitteistoon olisi mahdollista investoida lyhyellä takaisinmaksuajalla ja päivityksen avulla päästäisiin haluttuihin vuosittaisiin energiansäästömääriin.

Työn tavoite voidaan täten katsoa tämänhetkisten mahdollisuuksien puitteissa saavutetuksi ja tutkimukset todeta onnistuneiksi. Tärkeimmät tiedot järjestelmästä saatiin kerättyä perusteellisen tarkastelun avulla ja nykyistä toimintaa voidaan lähteä kehittämään hankittujen materiaalien pohjalta. Työn tuloksista on apua yrityksen tavoitteiden saavuttamiseksi myös pitkällä tähtäimellä.

## LÄHTEET

- Aerzen Maschinenfabrik GmbH. 3/2017. Magnet vs. air foil bearing. [PDF-tiedosto]. Saksa: Aerzen Maschinenfabrik GmbH. Saatavana: [https://www.aerzen.com/fileadmin/user\\_upload/02\\_documents/02-01\\_products/02-01-02\\_product\\_information/turbo\\_blower/Magnet\\_vs\\_Luft\\_EN\\_Web.pdf](https://www.aerzen.com/fileadmin/user_upload/02_documents/02-01_products/02-01-02_product_information/turbo_blower/Magnet_vs_Luft_EN_Web.pdf)
- Aerzen Maschinenfabrik GmbH. Ei päiväystä. Turbo blowers. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.2.2020]. Saatavana: <https://www.aerzen.com/en-es/products/turbo-blowers.html>
- Ahlström-pumput Oy. 1998. Toimituserittely. Karhula: Ahlström-pumput Oy. [Viitattu 27.1.2020].
- Ahlström-pumput Oy. Ei päiväystä. NASH-tyhjiöpumput. Karhula: Ahlström-pumput Oy.
- BillerudKorsnäs Finland Oy. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.1.2020]. Saatavana: <https://www.billerudkorsnas.com/about-us/our-production-units/jakobstad>
- Fontell, A., Maula, J., Nieminen, R., Söderlund, C., Valli, K., Vehanen, A., Vulli, M. & Ylilampi, M. 1986. Tyhjiötekniikka. Helsinki: Suomen tyhjiöseura ry.
- Gardner Denver Oy. Ei päiväystä. Optimizing paper machine vacuum system. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.2.2020]. Saatavana: <https://gardnerdenver.com/en-se/knowledge-hub/articles/optimizing-paper-machine-vacuum-system>
- Hantor-Mittaus Oy. 2006. Kannettava ultraäänivirtausmittari – FLUXUS F601. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.2.2020]. Saatavana: <http://hantor.fi/tuotteet/virtausmittaus/kannettavat-ultraaanivirtausmittarit-fluxus-f601>
- Hulkkonen, V. 2006. Tyhjiötekniikka – pumput. [PDF-tiedosto]. Helsinki: Fluid Finland. Saatavana: <https://www.salhydro.fi/files/PDF/14.tyhjioetekniikka-pumput.pdf>
- Hägglom-Ahnger U. & Komulainen, P. 2000. Paperin ja kartongin valmistus. 2. uud. p. Jyväskylä: Opetushallitus.
- Karlsson, M. 2000. Papermaking science and Technology: Papermaking Part 2, Drying. 2. uud. p. Jyväskylä: Fapet Oy.
- Kero, J. 2016. Paperikoneen kriittisten laitteiden analysointi. [PDF-tiedosto]. Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Diplomityö. [Viitattu 13.2.2020]. Saatavana: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24462/Kero.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

KnowPap-työryhmä. 1997. KnowPap-oppimisjärjestelmä. Helsinki: AEL Oy & Prowledge Oy. Saatavana: <http://www.knowpap.com/>

Lahtinen, J. & Tujunen, E. 2018. Gardner Denver/Runtech. Kotka: Runtech Systems Oy.

Northey Technologies LTD. Ei päiväystä. Turbo Blowers. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.2.2020]. Saatavana: <http://northey.net/turbo-blowers/>

Nylund, K. 2.1.2016. Packaging paper – product overview. Pietarsaari: Billerud-Korsnäs Finland Oy.

Runtech by Gardner Denver. Ei päiväystä. Paper machine vacuum blower systems. [Verkkosivu]. [Viitattu 5.2.2020]. Saatavana: <https://www.gardnerdenver.com/en-ca/runtech/energy-and-vacuum-systems>

Yli-Peltola, T. 2017. Keskitetyn tyhjiöjärjestelmän kartoitus. [PDF-tiedosto]. Seinäjoki: Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 7.2.2020]. Saatavana: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/124894/Yli-Peltola\\_Timo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/124894/Yli-Peltola_Timo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)