

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Paperikoneen energiankulutus ja pumpun tilavuusvirran  
määrittäminen

Energy consumption of paper machine and defining the  
volume flow of the pump

Työn tarkastaja: Esa Vakkilainen

Työn ohjaajat: Esa Vakkilainen ja Simo Hammo

Lappeenranta 14.11.2017

Ville Ottelin

# TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Ville Ottelin

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaajat: Esa Vakkilainen ja Simo Hammo

Kandidaatintyö 2017

33 sivua, 8 kuvaa, 1 taulukko, 1 liite

Hakusanat: paperikone, energiankulutus, keskipakopumppu, tilavuusvirta, pumpun mallintaminen

Valmet on suomalainen sellu-, paperi- ja energiateollisuuden erikoistunut yritys. Energiatehokkuus on Valmetille tärkeä arvo, ja se tarjoaa kehittyneitä energiankulutuksen seuranta- ja optimointipalveluita. Tämä kandidaatintyö käsittelee paperikoneen energiankulutusta ja keskipakopumpun tilavuusvirran laskentaa. Tässä työssä mallinnetaan eräs paperikoneen keskipakopumppu ja lasketaan sen tilavuusvirta. Laskennan tavoitteena on selvittää tilavuusvirta nykyistä mittaustapaa tarkemmin. Tämän lisäksi työn sivutavoitteena on luoda yleiskuva paperikoneen energiankulutuksesta.

Työn kirjallisuusosassa esitellään paperikoneen rakenne ja toiminta, sekä perehdytään koneen energiankulutukseen. Suurimmat energiansäästömahdollisuudet ovat massan valmistuksessa, viira- ja puristinosalla sekä kuivausosalla. Tutkimus perustuu kirjallisuuslähteisiin ja lähdeaineistona käytetään uusimpia saatavilla olevia lähteitä muutamaa vanhempaa lähdettä lukuun ottamatta, joiden tieto on edelleen ajantasaista.

Työn soveltamisosassa lasketaan erään paperikoneen yhden keskipakopumpun tilavuusvirta käytettävissä olevien mittausten avulla. Laskenta tehdään Matlab-ohjelmalla, ja tehtyä laskentaa voidaan käyttää myös muiden pumppujen mallintamisessa. Tilavuusvirran laskennalla saadaan tarkempi tulos kuin nykyisin käytössä olevalla tilavuusvirran mittaumenetelmällä. Laskennan lisäksi työssä otetaan kantaa pumpun mallintamisen hyödyntämismahdollisuuksiin paperikoneilla. Mallia voidaan käyttää esimerkiksi paperikoneen energiankulutuksen simuloinnissa tai pumppujen huollon tarpeen arvioinnissa.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Yritysesittely</b>	<b>6</b>
<b>3 Paperikoneen rakenne ja toiminta</b>	<b>8</b>
3.1 Paperimassan valmistus.....	8
3.2 Viiraosa .....	10
3.3 Puristinosa .....	10
3.4 Kuivausosa .....	11
3.5 Kalanteri .....	11
3.6 Päällystysosa .....	12
3.7 Rullain ja pituusleikkuri .....	13
<b>4 Paperikoneen energiankulutus</b>	<b>14</b>
<b>5 Keskipakopumpun tilavuusvirran määrittäminen</b>	<b>17</b>
5.1 Keskipakopumpun rakenne ja toiminta.....	17
5.2 Pumpun tilavuusvirran määrittäminen.....	18
5.3 Tulosten tarkastelu .....	22
<b>6 Pumpun mallintamisen hyödyntämismahdollisuudet</b>	<b>28</b>
<b>7 Yhteenveto</b>	<b>29</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>30</b>
<b>LIITE I KESKIPAKOPUMPUN YLEISKÄYRÄ</b>	<b>33</b>

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$A$	pinta-ala	$m^2$
$d$	halkaisija	$m$
$g$	putoamiskiihtyvyyys	$m/s^2$
$H$	nostokorkeus	$m$
$n$	pyörimisnopeus	$1/s$
$P$	akseliteho	$W$
$p$	paine	$Pa$
$q_v$	tilavuusvirta	$m^3/s$
$w$	virtaaman nopeus	$m/s$
$z$	korkeus	$m$

### Kreikkalaiset aakkoset

$\eta$	hyötysuhde	
$\rho$	tiheys	$kg/m^3$

### Alaindeksit

0	alkutilanne
1	imupuoli
2	painepuoli

## 1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö tehdään Valmet Oyj:n tarjoamasta aiheesta, joka käsittelee paperikoneen energiankulutusta ja erään pumpun tilavuusvirran laskentaa. Valmet on suuri suomalainen paperialan yritys, joka valmistaa paperi- ja kartonkikoneita sekä tuottaa niihin liittyviä palveluita. Yritys työllistää noin 12 000 työntekijää, ja se palvelee yli 2000 paperi- ja sellutehdasta. Valmetin liikevaihto vuonna 2016 oli 2,9 miljardia euroa. (Valmet 2017b.) Viime vuosina teollisuudessa on alettu kiinnittämään enemmän huomiota energiankulutukseen ja energiatehokkuuteen. Energiatehokkuus on Valmetille tärkeä arvo, ja se haluaa kilpailuetua tarjoamalla kehittyneitä energiankulutuksen seuranta- ja optimointipalveluita. Tämän kandidaatintyön tarkoitus on tukea Valmetin tavoitteita energiatehokkuuden parantamisessa käyttäen nykyaikaisia työkaluja.

Tämän työn päätavoitteena on laskea riittävällä tarkkuudella erään keskipakopumpun tilavuusvirta eräältä paperikoneelta saatavan mittausdatan avulla. Laskettavan tilavuusvirran on oltava tarkempi kuin nykyisin käytössä olevalla tavalla selvitettävä virtaama. Työn ohessa tehdään pumpuille Matlab-funktio, jolla voidaan mallintaa pumppujen ajoarvoja. Lisäksi kandidaatintyön sivutavoitteena on luoda kokonaiskuva paperikoneen energiankulutuksesta.

Toisessa luvussa esitellään Valmetia yrityksenä, jonka jälkeen kolmannessa luvussa perehdytään paperikoneen rakenteeseen ja toimintaan. Paperikoneen esittely perustuu kirjallisuuslähteisiin, kuten myös neljännen luvun paperikoneen energiankulutuksen selvitys. Työssä käsitellään sekä kartonki- että paperikoneita, mutta kandidaatintyön laajuuden vuoksi pehmapaperintuotanto jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Viidennessä luvussa perehdytään keskipakopumpun toimintaan ja tilavuusvirran laskentaan. Ensin keskipakopumppu esitellään yleisellä tasolla, jonka jälkeen lasketaan eräälle paperikoneen pumpulle tilavuusvirta. Tilavuusvirran laskennan lisäksi selvitetään muita pumpuille tyypillisiä arvoja. Kuudennessa luvussa pohditaan pumppujen mallintamisen hyödyntämismahdollisuuksia paperikoneilla.

## 2 YRITYSESITELY

Valmet Oyj on suuri suomalainen paperiteollisuuden yritys, joka työllistää yli 12 000 työntekijää ympäri maailmaa. Valmetin juuret ovat 1800-luvulla, mutta nimi Valmet otettiin käyttöön vuonna 1951. Ensimmäisinä vuosina Valmet toimi pääasiassa metallitehtaana, joka valmisti muun muassa laivoja ja traktoreita. Samaan aikaan Valmet alkoi valmistamaan ensimmäisiä paperikoneitaan Jyväskylän Rautpohjassa, mikä johti lopulta Valmetin kehittymiseen yhdeksi maailman suurimmista paperikoneen valmistajista 1960-luvulla. Jatkossa Valmet lopetti muiden tuotteidensa valmistuksen ja keskittyi enemmän paperiteollisuuteen alkamalla tarjota myös oheispalveluita paperikoneiden valmistuksen lisäksi. Vuonna 1999 Valmet sekä kuituteknologiaan, kivenmurskaukseen ja virtauksensäätöön erikoistunut Rauma Oyj yhdistyivät, jolloin syntyi Metso Oyj. Uusi Metso kasvoi monien yritysostojen ansiosta ja vuonna 2013 Metso jakautuikin kahdeksi erilliseksi yhtiöksi: Valmet Oyj ja Metso Oyj. Reformaation jälkeen Valmetille jäi massa-, paperi- ja voimantuotantoliiketoiminnat, joiden lisäksi vuonna 2015 Valmet osti Metsolta Automaatio -liiketoimintalinjan. (Valmet 2017c)

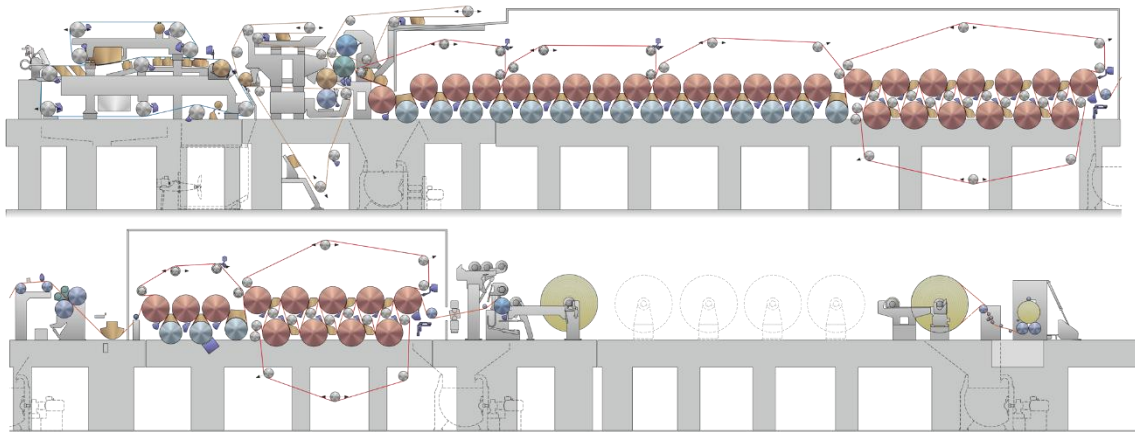
Nykyaikainen Valmet koostuu neljästä liiketoimintalinjasta: Palvelut, Sellu ja energia, Paperit ja Automaatio (Valmet 2017d). Palvelut -linja tarjoaa jatkuvia, tehdasta ylläpitäviä toimintoja, kuten osien huoltoa ja vaihtoa uudempiin tai tuotannon optimointipalveluita. Linjan tarkoituksena on lisätä paperintuotannon tehokkuutta, muun muassa kasvattamalla luotettavuutta ja tuotantokapasiteettia. (Valmet 2017e.) Sellu ja energia -linja vastaa sellun ja energian tuotannosta, eli se vastaa paperinvalmistuksen ensimmäisistä vaiheista. Valmet tuottaa kokonaisratkaisuja sellun ja energian tuotantoa varten, sekä tutkii ja kehittää jatkuvasti uusia teknologioita. Selluosuus näkyy kokonaisien sellulinjojen valmistamisena ja rakentamisena tai yksittäisien koneiden tuottamisena. Energiaosuus vastaa energiantuotantoratkaisuista. Valmet on erikoistunut biomassaan, jota se käyttää lämmön- ja sähköntuotannon polttoaineena. Tämän lisäksi Valmet kehittää jatkuvasti uusia ja innovatiivisia biomassan muutosteknologioita. (Valmet 2017g.) Paperit -linja vastaa paperin, kartongin ja pehmopaperin valmistukseen tarvittavan koneiston tuotannosta ja rakentamisesta. Koneiden uudistaminen ja uudelleen rakentaminen kuuluvat myös Paperit-linjan alle. (Valmet 2017f.) Automaatio -linja tuottaa automaatioratkaisuja yksittäisistä osista aina kokonaisille tehtaille saakka. Pääliiketoimintaa ovat automaatiojärjestelmien lisäksi analyysilaitteiden sekä muiden

lisälaitteiden toimitus. Automaation tarkoituksena on tehostaa yksittäisten laitteiden sekä tehtaitten toimintaa optimoimalla niiden käyttöä. (Valmet 2017a)

Valmet on maailmanlaajuinen yritys, jonka toiminta jakautuu maantieteellisesti viiteen alueeseen, jotka ovat EMEA, Etelä-Amerikka, Pohjois-Amerikka, Kiina sekä Aasian ja Tyynenmeren alue. Isoin alue on EMEA, johon lasketaan Eurooppa, Afrikka ja Lähi-itä. Valmetin liikevaihdosta 45 % syntyy tällä alueella. Toiseksi suurin alue on Pohjois-Amerikka, joka kattaa 21 % liikevaihdosta. Aasian ja Tyynenmeren alueelta, Etelä-Amerikasta ja Kiinasta syntyy loput liikevaihdosta 13 %, 11 % ja 10 % osuuksillaan edellä mainitussa järjestyksessä. (Valmet 2017b)

### 3 PAPERIKONEEN RAKENNE JA TOIMINTA

Tässä luvussa esitellään paperikoneen rakennetta ja toimintaa prosesseittain. Koneella tuotetaan tyypillisesti paperia, kartonkia tai pehmopaperia. Paperikoneen tarkoituksena on muokata paperimassasta valmista paperia, mikä tapahtuu pääasiassa poistamalla vettä massasta. Tämän lisäksi koneella vaikutetaan paperin lujuus- ja kestävyysominaisuuksiin sekä paperin pinnan ominaisuuksiin. Paperikoneet voivat olla keskenään hyvin erilaisia riippuen tuotettavasta paperilaadusta, joten tekstissä tarkastellaan yleistä paperikonetta. Tässä kandidaatintyössä keskitytään kartonki- ja paperikoneisiin, eli pehmopaperintuotanto jätetään tarkastelun ulkopuolelle kandidaatintyön laajuuden rajoituksen vuoksi. Kuvassa 1 on tyypillisen paperikoneen rakenne. Paperikoneen ensimmäinen osa on perälaatikko, joka sijaitsee kuvassa vasemmalla ylhäällä. Sitä seuraa viira- ja puristinosat, joiden jälkeen on etukuivausosa, jonka tunnistaa kuvassa punaisista kuivaussylintereistä. Tämän jälkeen kuvassa vasemmalla alhaalla on liimapuristin, jonka perässä jälkikuivausosa. Alhaalla keskellä on rullain, ja viimeisenä oikealla alhaalla sijaitsee pituusleikkuri. Lisäksi koneessa voisi olla esimerkiksi kalanteri, mutta kyseisen esimerkin koneessa sellaista ei ole.



**Kuva 1.** Tyypillisen paperikoneen rakenne (Valmetin sisäinen lähde)

#### 3.1 Paperimassan valmistus

Paperin valmistus aloitetaan tuottamalla paperimassa. Sitä valmistetaan sellutehtaassa, ja massa koostuu vedestä, kuiduista ja kemikaaleista. Tuotettava paperilaatu vaikuttaa massan koostumukseen sekä sen tarvitsemaan käsittelyyn. Paperilaatuja on esimerkiksi



painopaperi sekä sisä- ja ulkopakkauskartonki. Paperimassan valmistuksella on suuri vaikutus paperikoneen kannattavuuteen, sillä se vaikuttaa valmiin paperin laatuun, paperikoneen ajoin ja samalla paperin tuotantomäärään. (Paulapuro et al. 2007, 10)

Paperitehtaalta tulevaa paperimassaa ei voida suoraan ajaa paperikoneeseen, vaan sitä on muokattava parhaan mahdollisen laadun saavuttamiseksi. Massaa muokataan pääasiallisesti kahdella eri tavalla: jauhamalla ja sekoittamalla. Jauhaminen tapahtuu jauhimissa (engl. refiner). Jauhamisen tarkoituksena on joko parantaa valmistettavan paperin lujuutta tai tehdä paperin pinnasta sileämpi. Jauhatusprosessi on kaksiosainen, jossa ensin kuidut kerätään jauhimeen ja tämän jälkeen jauhin jauhaa kuidut. Jauhautuminen tapahtuu kahden pinnan välissä, joista toisessa pinnassa on terät. Terät pyörivät pintojen painautuessa lähelle toisiaan, jolloin kuidut painautuvat ja leikkaantuvat. (Paulapuro et al. 2007, 94.) Sekoittaminen tehdään sekoittimissa (engl. agitator), joiden avulla paperimassa pyritään pitämään mahdollisimman tasalaatuisena (Valmetin sisäinen lähde).

Paperikone jaetaan neljään eri massa- ja vesijärjestelmään (engl. stock and water systems). Näistä jokaisella on oma tarkoituksensa, jotka ovat seuraavat:

- Massan valmistus (engl. stock preparation) kattaa mekaaniset prosessit ennen perälaatikkoa
- Lähestymisvirtausjärjestelmä (engl. approach flow system) ylettyy perälaatikon syöttöpumpulta perälaatikolle eli se siirtää massan paperikoneelle
- Lyhytkierto (engl. short circulation) käyttää paperirainan muodostuksen vettä sakeamassan laimentamiseen, joka kulkeutuu perälaatikolle
- Pitkäkierto (engl. long circulation) kerää lyhyestä kierrosta ja koko paperikoneen alueelta poistuvaa vettä, jota käytetään pääasiassa massan laimentamiseen (Paulapuro et al. 2007, 142)

Valmis paperimassa syötetään perälaatikon läpi paperikoneelle jatkokäsittelyä varten. Paperimassa sisältää tässä vaiheessa kahdesta kymmeneen grammaa kuitua yhtä vesilitraa kohti. (Karlsson et al. 2000, 16)

### 3.2 Viiraosa

Valmis paperimassa syötetään perälaatikon läpi paperikoneelle jatkokäsittelyä varten. Tässä vaiheessa paperimassa sisältää kahdesta kymmeneen grammaa kuitua yhtä vesilitraa kohti, ja siitä aloitetaan poistamaan vettä ensimmäisenä paperikoneen viiraosalla. (Karlsson et al. 2000, 16.) Viiraosa on näin paperikoneen ensimmäinen massaa kuivaava prosessi. Ensimmäisissä paperikoneissa vettä poistettiin Fourdrinier-menettelmällä, jossa vettä poistettiin imun ja painovoiman avulla vaakasuoralta viiralta alaspäin (Paulapuro et al. 2007, 248). Nykyisin vesi poistetaan uudemmilla järjestelmillä, ja suurin osa viiraosan vedestä poistetaan imemällä. Imemällä vettä saadaan poistettua nopeammin verrattuna vanhojen paperikoneiden painovoimaan perustuvaan vedenpoistoon. Toinen vedenpoistoa tehostava keksintö on 1950-luvulla keksitty ja 1970-luvulla yleistynyt kaksi-viiramenetelmä, jossa paperiraina kulkee kahden viiran välissä. Tämä mahdollistaa veden poiston sekä ylä- että alapinnalta, jolloin saavutetaan nelinkertainen vedenpoisto aiempiin menetelmiin verrattaessa. (Paulapuro et al. 2007, 258, 277.) Vedenpoiston tehostumisen lisäksi kaksi-viiramenetelmä parantaa paperin rakennetta ja laatua, koska tällöin paperimassa ei sekoitu ilman kanssa kulkiessaan kahden viiran välissä (Paulapuro et al. 2007, 259). Viirujen nopeus on paperikoneesta ja -laadusta riippuen välillä 100–1900 m/min (Paulapuro et al. 2007, 310). Viiraosan imevät komponentit ovat joko imulaatikoita tai rullia (couch roll). Viiraosan viimeinen imeväosa on rulla ja muut sitä edeltävät osat ovat imulaatikoita. Niihin luodaan puhaltimien avulla alipaine, joka imee vettä viiran läpi pois paperirainalta. Imu tapahtuu komponentin pinnalla olevista rei'istä tai raoista. Imulaatikoiden alipaineet ovat yleisesti 15–40 kPa ja rullan alipaine on 40–80 kPa, jotka kuitenkin vaihtuvat tuotettavan paperilaadun ja paperikoneen muiden ajoarvojen mukaan. (Paulapuro et al. 2007, 255.) Paperimassan kuiva-ainepitoisuus tulee olla 15–23 % viiraosan jälkeen (Karlsson et al. 2000, 16).

### 3.3 Puristinososa

Viiraosan jälkeen paperimassan kuivaaminen jatkuu puristinosalla (engl. press), jossa vedenpoisto tapahtuu pääasiassa puristamalla (Karlsson et al. 2000, 16). Puristamisen lisäksi puristinosalla on myös viiraosan tavoin alipainetta käyttäviä imeviä vedenpoistoelementtejä. Mekaaninen puristus tapahtuu nipeissä eli paperirainaa puristetaan kahden rullan välissä tai rullan ja kengän (engl. shoe) välissä. Vedenpoistoa

voidaan tehostaa lämmittämällä rullia, jolloin vettä poistuu myös haihtumalla. Puristimen rullien tehtävänä on myös toimia liikkumapintana ja tukena huovalle, joka kuljettaa paperirainaa. (Paulapuro et al. 2007, 344.) Puristinosan jälkeen paperimassan kuiva-ainepitoisuus on noin 35–55 % (Karlsson et al. 2000, 16).

### **3.4 Kuivausosa**

Kuivausosa on paperikoneen viimeinen varsinainen kuivaavaosa, ja se on usein jaettu kahdeksi eri kokonaisuudeksi, etu- ja jälkikuivausosaksi. Kahden erillisen kuivausosakokonaisuuden välissä on yleensä liimapuristin (engl. sizer), eli etukuivausosa on puristimen jälkeen ja jälkikuivausosa on liimapuristimen jälkeen (Karlsson et al. 2000, 47). Kuivausosa poistaa vettä hyvin vähän verrattaessa viira- ja puristinosiin, ja sen toimintaperiaate on pysynyt lähes muuttumattomina ensimmäisistä kuivausosista lähtien. Kuivaus tapahtuu ajamalla paperimassaa kuumien sylinterien pinnalla, jolloin pinnan lämpö haihduttaa vettä. (Karlsson et al. 2000, 17)

Kuivausosa koostuu pääasiassa kuivaussylintereistä, jotka on jaettu itsenäisesti ajettaviin sylinteriryhmiin. Sylinterit ovat isoja ja onttoja metallilieriöitä, joiden halkaisija on useita metrejä. Halkaisijan kokoa rajoittaa suureksi kasvava kehänopeus, jolloin materiaalin lujuus ei kestä suurempia sylinterikokoja. Sylinterit lämmitetään niiden sisään tuotavan höyryn avulla, jota johdetaan sylinteriin höyrykytkinten läpi. Tuotava höyry on tyypillisesti matalapaineista, noin 1–5 baarista. Matalapaine on kustannustehokkaasti paras ratkaisu, vaikka kuivausteho ei ole paras mahdollinen. 90 % käytössä olevista paperikoneista käyttää höyryllä lämmitettävistä sylintereistä koostuvaa kuivausosaa, sillä höyry on verrattain tehokas lämmitysmuoto. (Karlsson et al. 2000, 85)

### **3.5 Kalanteri**

Kuivausosien jälkeen paperikoneessa on kalanteri, jonka tarkoitus on muokata paperin pinta halutunlaiseksi. Paperimassan vedenpoisto on tapahtunut jo aiemmin, joten kalanterissa ei tarvitse poistaa vettä. (Jokio et al. 1999, 14) Kalanterissa paperiraina puristuu kahden tai useamman rullan välissä, jolloin puristuksen mekaaninen työ vaikuttaa paperin pinnan ominaisuuksiin. Kalanterin päätarkoitus on muokata paperin pintaa, yleensä vähentämällä karheutta. Käsittely kuitenkin heikentää paperin lujuusominaisuuksia, joten kalanterointi täytyy aina optimoida etujen ja haittojen suhteen.

Kalanterointi kehitettiin, koska paperin pinnasta haluttiin sileämpi tekstin painamista varten. Paperin pintaa on pyritty silottamaan jo paperin valmistuksen alkuaikoina, mutta ensimmäiset varsinaiset kalanterit kehitettiin 1800-luvun alkupuolella. (Jokio et al. 1999, 14)

Nykyisin kalanterit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: kovanippikalantereihin (engl. hard nip calender) ja pehmeänippikalantereihin (engl. soft nip calender). Kovanippikalantertia voidaan käyttää useille paperi- ja kartonkilaaduille. Kalanteri koostuu kahdesta tai useammasta kovasta rullasta, joiden välissä paperi painautuu. (Jokio et al. 1999, 15.) Kahta rullaa voidaan käyttää, jos koneessa tuotettavat lajit eivät vaadi paljoa kalanterointia. Useampaa rullaa käytetään kalanteroinnin kannalta vaativammissa lajeissa, kuten uutispaperin tuotannossa sekä joissain erikoislajeissa. (Jokio et al. 1999, 16.) Toinen kalanterien päätyyppi on pehmeänippikalanteri, jossa vähintään yhden rullan päällyste on pehmeä. Tämä johtaa pienempään puristukseen nipissä, jonka vuoksi pehmeänippikalanteri muokkaa paperista tasalaatuista, eli paperimassan tiheys pysyy lähes muuttumattomana. Pehmeänippikalanterin ongelmana on vaihteleva kaliiperi, eli paperin pinnasta ei tule tasaista. Kovanippikalanteri taas pitää kaliiperin vakiona, mutta paperin tiheys vaihtelee. (Jokio et al. 1999, 23)

### 3.6 Päällystysosa

Paperin ominaisuuksia voidaan muokata myös päällystämällä, joka tehdään päällystysosalla (engl. coater). Päällystämällä voidaan parantaa paperin painatusominaisuuksia tai lisätä paperin kirkkautta. Päällystys tehdään paperin pintaan yleensä kahdella eri tavalla: filmi- tai teräpäällystämällä. Näitä kahta menetelmää voidaan käyttää myös yhdessä. Filmipäällystyksessä (engl. film coating) paperin pinnalle lisätään vakiomäärä päällystettä, joka muotoilee paperin pintaa. Teräpäällystyksessä (engl. blade coating) epätasaiselle paperille levitetään päällyste, joka tämän jälkeen tasoitetaan terällä sileäksi. (SCA 2010)

Päällystäminen voidaan tehdä joko paperikoneella (engl. On-Machine) tai vasta paperikoneen jälkeen (engl. Off-Machine). Paperikoneella päällystettäessä paperirullia ei tarvitse avata päällystämistä varten, mikä aiheuttaisi ylimääräisiä kustannuksia. (PrintWiki 2015b.) Jos päällystystä ei tehdä koneella, se tehdään erillisessä

päällystämiseen erikoistuneessa tehtaassa. Tällöin yksi tehdas voi vastata monen eri paperikoneen paperin päällystämisestä. Tällöin päällystykseen laatu ja tehokkuus ovat korkeita, koska tehdas erikoistuu ainoastaan päällystämiseen ja muutoksia on helpompi tehdä. (PrintWiki 2015a)

### **3.7 Rullain ja pituusleikkuri**

Valmis paperi kierretään rullille rullaimella, ja siitä valmistuvat isot rullat muokataan pienemmiksi pituusleikkurilla. Rullaimella valmis paperi rullataan kelan päälle, jolloin syntyy iso rulla, jota kutsutaan konerullaksi. Kelan ollessa täynnä valmis kela irrotetaan koneelta, ja uusi kela tulee jatkamaan valmistuvan paperin kelaamista rullalle. Valmis rulla voi painaa jopa 120 000 kg, ja sen halkaisija voi olla jopa 4 m. (Jokio et al. 1999, 150.) Paperin rullauksen luotettavuus on tärkeää, koska siinä aiheutuvat ongelmat hidastavat paperin tuotantoa ja näin ollen pienentävät tehtaan mahdollisia tuloja. Rullaus on haastavinta suurilla nopeuksilla, jolloin koneella aiheutuu eniten paperikatkoja. Paperikoneiden kehitys mahdollistaa jatkuvasti suuremmilla nopeuksilla ajamisen, joten rullauksen täytyy pysyä kehityksessä mukana. Yksi tapa vähentää rullauksesta aiheutuvien tuotantokatkoksien lukumäärää on suurentaa rullan halkaisijaa. (Jokio et al. 1999, 144.) Rullaimella valmistuvat isot konerullat muutetaan pienemmiksi pituusleikkurilla (engl. winder). Syntyviä pienempiä rullia sanotaan asiakasrulliksi. (Valmetin sisäinen lähde)

#### 4 PAPERIKONEEN ENERGIANKULUTUS

Energiankulutuksen optimointi on noussut viime vuosikymmeninä tärkeäksi tavoitteeksi paperintuottajille energian hinnannoususta johtuen (Eurostat 2017). Paperikoneen käyttämä energia on koneen ajamiseen käytettävää sähköenergiaa ja lämmitykseen käytettävää höyryn lämpöenergiaa. Tämän lisäksi energiankulutus voidaan eritellä prosesseittain, jolloin energiankulutuksen optimointia on helpompi kohdistaa oikeaan kohteeseen. Ominaisenergiankulutuksen keskiarvot on jaoteltu prosesseittain taulukossa 1. Taulukossa kulutus on jaoteltu massan valmistukseen, viira- ja puristinosaan, etukuivausosaan, päällystimeen ja liimapuristimeen, loppukuivausosaan ja muihin osuuksiin. Tulokset on saatu kahdeksalta Alankomaissa olevalta kartonkikoneelta ja kahdeksalta paperikoneelta. Taulukossa esiteltävä ominaisenergiankulutus tarkoittaa kulutettua energiaa tuotettua paperitonnia kohden, ja massan valmistuksessa se tarkoittaa kulutettua energiaa valmistettua massatonnia kohden. (Laurijssen et al. 2013.) Taulukosta huomataan, että suurin osa ominaisenergiankulutuksesta syntyy etukuivausosalla, ja muita isoja kuluttajia ovat massan valmistus sekä viira- ja puristinosa. Näiden lisäksi paperia tuottaessa päällystäminen aiheuttaa korkean ominaisenergiankulutuksen jälkikuivausosalla.

**Taulukko 1.** Paperi- ja kartonkikoneiden keskimääräiset ominaisenergiankulutukset prosesseittain.

(Laurijssen et al. 2013)

	Kartonki	Paperi
Massan valmistus [GJ/t]	1,0	2,8
Viira- ja puristinosa [GJ/t]	1,5	1,5
Etukuivausosa [GJ/t]	4,5	4,7
Päällystys [GJ/t]	0,0	0,2
Jälkikuivausosa [GJ/t]	0,3	2,6
Muut prosessit [GJ/t]	0,3	0,7
Yhteensä [GJ/t]	7,5	12,5

Energiankulutus riippuu suuresti tuotettavasta paperilaadusta ja lajista, joten eri koneiden kulutuksia ei voi suoraan verrata toisiinsa. Esimerkiksi eräässä toisessa tutkimuksessa paperilaatujen ominaisenergiankulutus on noin 6 GJ/t ja kartongin ominaisenergiankulutus noin 7 GJ/t (Tikka et al. 2008, 292). Eli kahden eri tutkimuksen tuloksien ero paperinvalmistuksen ominaisenergiankulutuksessa on 50 %. Paperinvalmistuksen energiankulutuksesta on vaikea luoda tarkkaa kuvaa, koska koneiden välinen hajonta on suurta.

Massan valmistuksen energiankulutukseen vaikuttaa eniten paperin jauhatus. Jauhaminen vaikuttaa suuresti lopputuotteen laatuun, joten mahdolliset energiasäästöt ovat minimaalisia ja niitä saadaan lähinnä laitteiston kehittyessä. Laurijssenin tutkimuksen mukaan kartonkikoneiden massan valmistuksen ominaisenergiankulutus on keskimäärin hyvällä tasolla, eikä mahdollisuuksia lisäsäästöille juuri ole. Paperia tuottavat koneet eivät toimi yhtä tehokkaasti kuin kartonkikoneet, ja Laurijssenin mukaan keskivertokoneen ominaisenergiankulutusta on mahdollista vähentää noin kolmasosa nykyisestä tasosta. (Laurijssen et al. 2013.) Esimerkiksi 0,8 GJ/t säästö tarkoittaa 220 kWh/t säästöä, jolloin rahallista säästöä syntyy 18 €/t. Laskennassa on oletettu sähkön hinnaksi 8 snt/kWh (Suomen virallinen tilasto 2017). Energiaa voi säästää muun muassa huolehtimalla jauhamien kunnosta säännöllisin tarkastuksin tai käyttämällä automaattisesti sammuvia sekoittimia (Reese 2009).

Viira- ja puristinosan energiankulutusta ei ole tähän mennessä huomioitu yhtä paljon energiankulutuksen optimoinnissa kuin muiden prosessien energiankulutusta. Tämän vuoksi ominaisenergiankulutuksessa on paljon säästökapasiteettia. Viiraosan energiankulutus koostuu linjakäytöistä, joiden avulla teloja pyöritetään, sekä pumppauksesta, jonka avulla muodostetaan imeville komponenteille alipaineita. Energiankulutuksesta suurin osa syntyy tyhjiöpumppauksesta. Viiraosan tyhjiöpumppaus kuluttaa normaalisti noin 11 % koko paperikoneen energiankulutuksesta, ja kaikkien koneen tyhjiöpumppujen osuus koko koneen energiankulutuksesta on 17 %. Kulutukseen vaikuttaa imevien osien lukumäärä ja niiden alipainetasot, jotka määräytyvät koneen mallin ja esimerkiksi ajettavan neliöpainon mukaan. (Paulapuro et al. 2007, 478.) Ylimääräistä kulutusta aiheuttavat ylimitoitettut pumput ja kompressorit. Tämän voi korjata korvaamalla epätehokkaita pumppuja sopivammilla vaihtoehdoilla.

Ylimitoitettujen pumppujen optimoinnilla voidaan saavuttaa 15–25 %:in säästö pumppaukseen käytettävästä energiasta. (Kramer et al. 2009, 68.) Tämän työn luvussa 5 mallinetaan keskipakopumppu. Pumppujen mallintamisen ja simuloinnin avulla voidaan tarkkailla pumppujen suorituskykyä ja minimoida energiahukkaa. Energiankulutusta voi myös vähentää käyttämällä parempia viiroja ja huopia sekä poistamalla puristimella mahdollisimman paljon vettä puristinnipeissä, joiden vedenpoisto on huomattavasti imevien komponenttien vedenpoistoa halvempaa (Reese 2009). Eräällä Valmetin koneella saavutettiin 70 000 euron vuosittaiset säästöt vaihtamalla koneelle sopivimmat viirat (Valmet 2012).

Kuivausosan energiankulutus vaihtuu Laurijksenin mukaan suuresti kartonki- ja paperikoneiden välillä. Kartonkikoneen kuivausosa kuluttaa keskimäärin 4,8 GJ/t, ja paperikoneen kuivausosa kuluttaa peräti 7,6 GJ/t. Paperikoneen suuri ominaisenergiankulutus johtuu päällystyksen aiheuttamasta korkeasta jälkikuivausosan kulutuksesta. (Laurijssen et al. 2013.) Paperia tulisikin pyrkiä kuivaamaan mahdollisimman paljon ennen kuivausosaa, koska viira- ja puristinosien aiheuttamat kuivauskustannukset ovat selvästi kuivausosan vastaavaa pienemmät (Karlsson et al. 2000, 16). Säästöjä voidaan saada esimerkiksi nostamalla puristimelta lähtevän paperin lämpötilaa noin 8 °C, jolloin kuivausosalla tarvittavan höyryn määrä vähenee 4 % (Kramer et al. 2009, 102). Lisäksi kuivausosan energiatehokkuutta voidaan parantaa lisäämällä tehtaalle lämmöntalteenottojärjestelmä. Tällainen järjestelmä voi esimerkiksi mahdollistaa kuivaamisessa käytettävän tulistetun höyryn osittaisen uusiokäytön tai kuivauksessa syntyvän hukkalämmön hyödyntämisen rakennusten lämmityksessä. (Kramer et al. 2009, 103)



## **5 KESKIPAKOPUMPUN TILAVUUSVIRRAN MÄÄRITTÄMINEN**

Tässä luvussa esitellään keskipakopumpun rakenne ja toiminta. Yleisesittelyn jälkeen lasketaan erään pumpun tilavuusvirta. Virtaama lasketaan paine-eron ja mitatun pyörimisnopeuden avulla. Laskennassa käytettävät mittausarvot ovat luottamuksellisia, joten niitä ei esitetä tässä työssä. Tilavuusvirta lasketaan Matlab-ohjelmalla, johon tehdään erillinen funktio pumpun mallintamista varten. Funktiota tulee voida käyttää tehokkaasti ja riittävällä tarkkuudella pumpun ajoarvojen laskennassa. Laskennan yhteydessä otetaan kantaa mahdollisiin epävarmuustekijöihin ja pohditaan mahdollisia muita ongelmia.

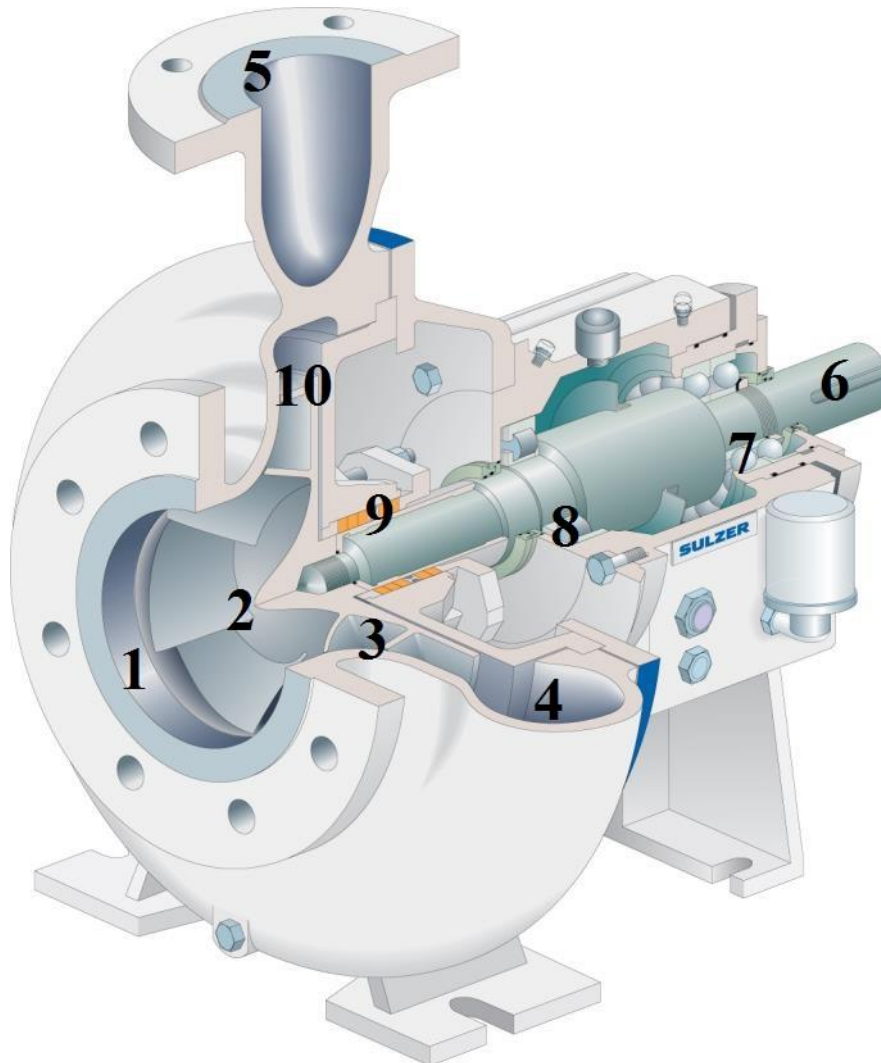
Kuten edellisessä luvussa kerrottiin, pumput aiheuttavat merkittävän osan paperikoneen energiankulutuksesta. Pumppaukseen kuluva energia voidaan vähentää korvaamalla ylimitoitettut pumput tarkemmin mitoitetuilla pumpuilla ja huolehtimalla pumppujen kunnosta. Laskennan ohessa syntyvää funktiota voidaan hyödyntää tilavuusvirran selvityksen lisäksi edellä mainittuihin tilanteisiin.

### **5.1 Keskipakopumpun rakenne ja toiminta**

Kaikkien pumppujen tarkoitus on siirtää väliainetta, joka on usein nestemäistä. Keskipakopumppu on erittäin monipuolinen pumppu, joka soveltuu moneen tilanteeseen sen laajan toiminta-alueen ansiosta. Tämän vuoksi se on teollisuudessa yleisimmin käytetty pumpputyyppejä, ja noin 80 % kaikista teollisuuden pumpuista on keskipakopumppuja. (Motiva 2011)

Keskipakopumppua ajetaan siihen kytketyn sähkömoottorin avulla. Sähkömoottori tuo pumpulle tehoa pyörittämällä akselia, josta teho siirtyy kytkimen välityksellä pumpun juoksupyörään. Juoksupyörä muuttaa sille saapuvan väliaineen liikesuuntaa, ja väliaine saa kehän tangentin suuntaisen nopeuskomponentin. Väliaine liikkuu juoksupyörän siipiurien välissä ulkokehälle, jolloin keskipakovoima aiheuttaa väliaineen paineen nousun. Kohonneen paineen ansiosta väliaine etenee pumpun painepuolelle, eli väliaineen paine voittaa korkeuseron, virtausvastukset ja painepuolen paineen. Toisin sanottuna väliaine siirtyy juoksupyörältä kierukkaankin, josta se jatkaa paineyhteen kautta paineputkeen. Korkeapaineisen väliaineen poistuminen juoksupyörältä aiheuttaa

juoksupyörälle alipaineen, joka imee uutta väliainetta pumpattavaksi. Tällä tavalla syntyy jatkuva virtaus pumpun läpi. (Wirzenius 1977, 52–53) Kuvassa 2 esitellään tyypillisen keskipakopumpun rakenne ja tärkeimmät osat. Osat on numeroitu 1–10.



**Kuva 2.** Keskipakopumpun rakenne, jossa näkyy pesä (1), juoksupyörä (2), juoksupyörän siivet (3), kierukapesä (4), paineyhde (5), akseli (6), laakeripesä (7), vierintä laakerit (8), tiivisteet (9) ja tiivisterengas (10) (Sunair 2017).

## 5.2 Pumpun tilavuusvirran määrittäminen

Seuraavaksi määritetään erään pumpun tilavuusvirta, jonka laskeminen on työn päätavoite. Laskenta tehdään laskentaohjelma Matlabilla, johon pumpun malli digitoitetaan eli mallinnetaan digitaaliseen muotoon. Sivutuotteena syntyy funktio, jolla voidaan mallintaa useampia pumppuja. Tarkasteltavalta pumpulta laskettavan virtaaman avulla

saadaan selville perälaatikolta paperikoneelle tuleva virtaama, jota voidaan käyttää paperikoneen käytön optimoinnissa. Nykyisin perälaatikolta paperikoneelle tuleva virtaus arvioidaan kahden mittarin avulla, jotka eivät mittaa suoraan kyseistä virtausta ja jättävät osan virtauksesta huomiotta. Pumpulta laskettavaa virtaamaa verrataan nykyisin käytössä olevaan mittaustapaan, ja tavoitteena on laskea tilavuusvirta nykyistä tapaa tarkemmin. Laskentaa varten lähtötietoina on mitattu paine pumpun imu- ja painepuolilla, mitattu pumpun pyörimisnopeus, nimellistilavuusvirta, putkien halkaisijat imu- ja painepuolilta ja lisäksi pumpun yleiskäyrä on saatavilla. Pumppu siirtää hyvin vesipitoista paperimassaa, jonka aineominaisuuksina voidaan käyttää veden arvoja. Laskennassa aineominaisuudet oletetaan vakioiksi.

Pumpun tilavuusvirta lasketaan pumpun käyrästä avulla. Tavallisimmin pumppukäyrän x-akselilla on tilavuusvirta ja y-akselilla nostokorkeus. Sen lisäksi akselistolla on vakiopyörimisnopeuskäyriä ja hyötysuhdekäyriä. Käyrästä y-akselilla voi olla tilavuusvirran tilalla myös teho. Pumput mitoitetaan toimimaan parhaalla mahdollisella hyötysuhdealueella, mikä vaikuttaa oikean pumpun valintaan. Kandidaatintyössä tarkasteltavana olevan pumpun yleiskäyrä on liitteessä I.

Pumpun nostokorkeus- ja tehokäyrä siirretään Matlabiin käyttäen yleisessä jaossa olevaa GRABIT-funktiota. Tämän jälkeen molemmat käyrät interpoloidaan samoihin x-akselin pisteisiin. Datapisteitä täytyy olla riittävän paljon, jotta laskennan tarkkuus olisi hyvä. Tämän työn laskennassa käyrälle interpoloidaan 2000 datapistettä.

Nostokorkeus  $H$  on pumpuille tyypillinen suure. Nostokorkeus kertoo nimensä mukaisesti, kuinka monta metriä pumppu pystyy nostamaan väliainetta. Nostokorkeus koostuu paine-, korkeus- ja virtaaman nopeustermeistä. Nostokorkeus voidaan laskea yhtälön 1 mukaisesti. Putoamiskiihtyvyys  $g$  oletetaan olevan  $9,81 \text{ m/s}^2$ , ja tiheydeksi  $\rho$  oletetaan veden tiheys  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} \quad (1)$$

jossa  $g$  putoamiskiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $p$  paine [Pa]

$w$	virtaaman nopeus [m/s]
$z_2 - z_1$	painemittareiden välinen korkeusero [m]
$\rho$	tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]

Termeistä merkittävin on painetermi, joka muodostaa yli 90 % nostokorkeudesta. Painemittareiden välisen korkeuseron ja varsinkin virtausnopeuden muutoksen vaikutukset nostokorkeuteen ovat huomattavasti pienempiä.

Nostokorkeuden laskemiseksi tarvittava virtausnopeus lasketaan yhtälöllä 2. Sen laskemiseksi tarvitaan tilavuusvirta ja putken sisähalkaisija. Koko laskennan tarkoituksena on selvittää tilavuusvirta, joten sitä ei tiedetä. Yhtälössä tilavuusvirtana käytetään pumpun nimellisvirtaamaa. Laskenta olisi mahdollista tehdä iteratiivisesti, mutta se ei ole tarpeellista, koska nopeuden vaikutus nostokorkeuteen on pieni. Nopeustermi otetaan huomioon, koska pumpulle tuleva ja pumpulta lähtevä putki ovat erikokoisia. Tämä aiheuttaa eri nopeudet pumpun imu- ja painepuolelle.

$$W = \frac{q_v}{A} = \frac{4q_v}{\pi d^2} \quad (2)$$

jossa	$A$	putken poikkileikkauksen sisäpinta-ala [m <sup>2</sup> ]
	$d$	putken sisähalkaisija [m]
	$q_v$	tilavuusvirta [m <sup>3</sup> /s]

Painetermi saadaan painemittausten avulla, mutta laskennan ongelmana on painemittauksien heikko luotettavuus. Mittarit eivät ole pumpun yhteydessä, vaan pumpun ja painemittarin välissä on tuntematon pituus putkea, jossa aiheutuu painehäviötä. Painehäviötä tapahtuu ennen pumpua ja pumpun jälkeen, mutta sen aiheuttaman epävarmuuden vaikutus laskennan tarkkuuteen on olematon. Laskennassa putkien painehäviöt oletetaan nolaksi. Painemittareiden korkeuserotermiä ei tarvitse huomioida, koska mittarit ovat horisontaalisesti samalla tasolla eli niillä ei ole korkeuseroa.

Pumpun arvoja laskettaessa voidaan soveltaa affiniteettisääntöjä. Niiden avulla voidaan laskea toiminta-arvot toiselle pyörimisnopeudelle. Affiniteettisääntöjä on kolme, joista ensimmäinen sääntö on tilavuusvirtojen suhde pyörimisnopeuksiin, toinen sääntö on nostokorkeuksien suhde pyörimisnopeuksien toiseen potenssiin ja kolmas sääntö on tehojen suhde pyörimisnopeuksien kolmanteen potenssiin. Affiniteettisäännöt ovat yhtälöissä 3, 4 ja 5.

$$\frac{n}{n_0} = \frac{q_v}{q_{v0}} \quad (3)$$

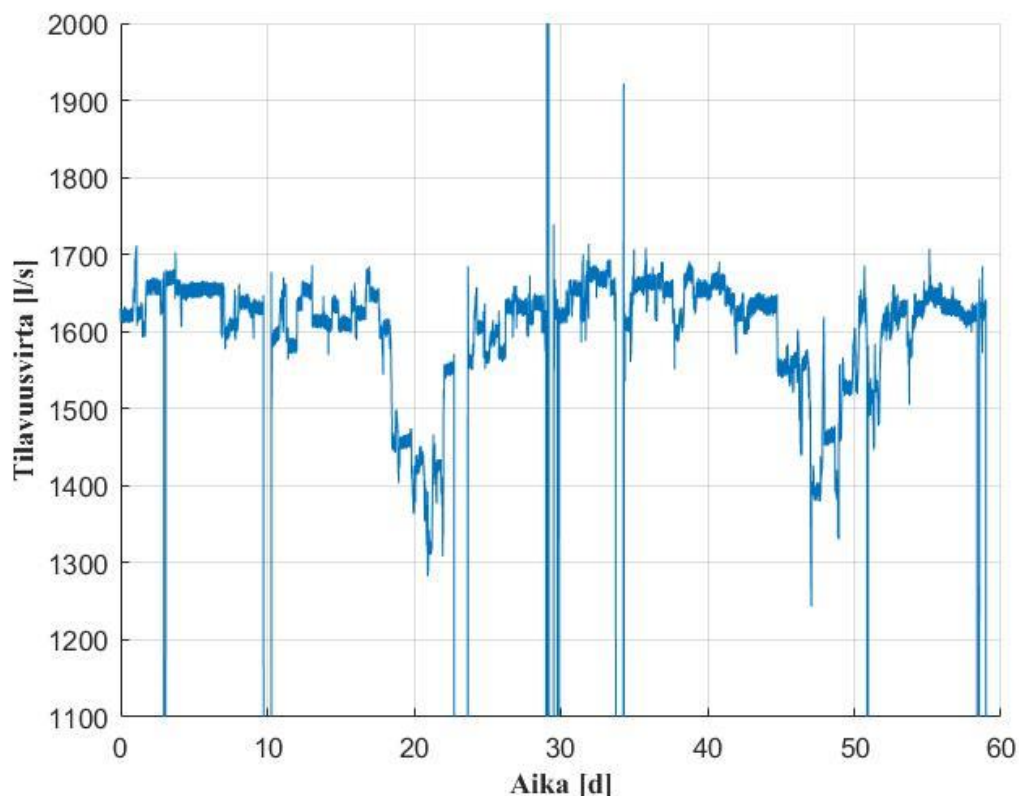
jossa  $n$  pyörimisnopeus [1/min]

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 = \frac{H}{H_0} \quad (4)$$

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)^3 = \frac{P}{P_0} \quad (5)$$

jossa  $P$  akseliteho [W]

Nostokorkeus selvitetään yhtälön 4 avulla, kun tiedetään mitattu pyörimisnopeus, nimellispyörimisnopeus ja sitä vastaavat nostokorkeudet, jotka saadaan pumppukäyrältä. Vastauksena saadaan mahdolliset nostokorkeudet vektorina, johon aiemmin yhtälöllä 1 laskettua nostokorkeutta voidaan verrata. Vektorista vähennetään aiemmin laskettu nostokorkeus, jonka jälkeen uudesta vektorista etsitään lähimpänä nollaa oleva vektorin arvo, ja siten tiedetään tilavuusvirran laskentaan tarvittavan oikean alkion sijainti. Nyt voidaan laskea mitattua pyörimisnopeutta vastaava tilavuusvirtavektori yhtälöllä 3. Todellinen tilavuusvirta on samassa vektorin alkiossa kuin aiemmin selvitetty nostokorkeus. Laskettu tilavuusvirta esitetään 59 päivän ajalta kuvassa 3.



**Kuva 3.** Laskettu tilavuusvirta

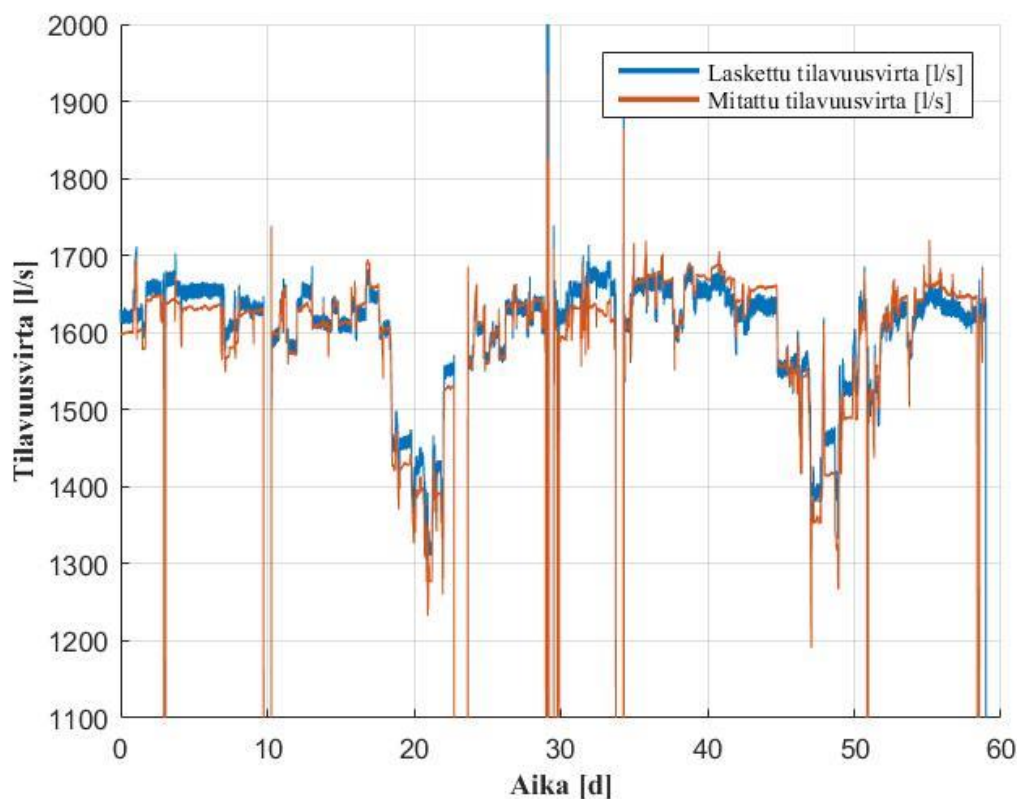
Laskenta eroaa hieman aiemmin selostetusta, jos pumppukäyrää ei ole saatavilla. Tällöin pumppukäyrän digitointi ei ole mahdollista, eli ei voida laskea tarkkoja arvoja koko pumpun toiminta-alueella. Käyriltä digitoitut arvot korvataan tällöin pumpun nimellistoimintapisteen arvoilla. Tässä tapauksessa pumpun pitäisi toimia näiden arvojen lähistöllä, jotta virtauksen laskeminen on mahdollista. Ongelmana tällä tavalla laskettaessa ovat tilanteet, jolloin pumppua ajetaan joillain toisilla ajoarvoilla kaukana suunnitellulta toimintapisteeltä. Tällöin nimellisarvoja käyttävät affiniteettisäännöt eivät päde, ja tulokset muuttuvat epätarkoiksi.

### 5.3 Tulosten tarkastelu

Pumppauksen mallintamisessa tapahtuu aina virhettä, jota aiheuttaa muun muassa mittauslaitteiden epävarmuus. Liikaa epävarmuutta sisältävien tulosten hyödyntäminen laitteiston säätämisessä voi aiheuttaa ylimääräisiä kuluja. Laskettua tilavuusvirtaa verrataan nykyisillä mittareilla saatuun tilavuusvirtaan, jonka lisäksi laskennan tuloksia arvioidaan kolmella eri tavalla: laskettua hyötysuhdetta verrataan pumpun parhaan

toimintapisteen hyötysuhteeseen, laskettua tehoa verrataan mitattuun tehoon ja tehdään herkkyyksanalyysi paine-eron vaikutukselle.

Pumpulta laskettua tilavuusvirtaa verrataan nykyiseen tilavuusvirran selvitystapaan, jolloin virtaama arvioidaan kahden eri virtausmittarin avulla. Näitä mittareita ei ole asetettu perälaatikon virtaaman mittausta varten, joten ne eivät mittaa todellista virtaamaa. Kyseiset mittarit eivät huomioi muuttuvaa ohivirtaamaa, jonka puute vääristää tulosta. Ohivirtaukseksi on arvioitu 10 %, mutta todellisuudessa se ei ole vakio. Kuvassa 4 verrataan tässä työssä pumpulta laskettua tilavuusvirtaa mittareilta saatuun tilavuusvirtaan.



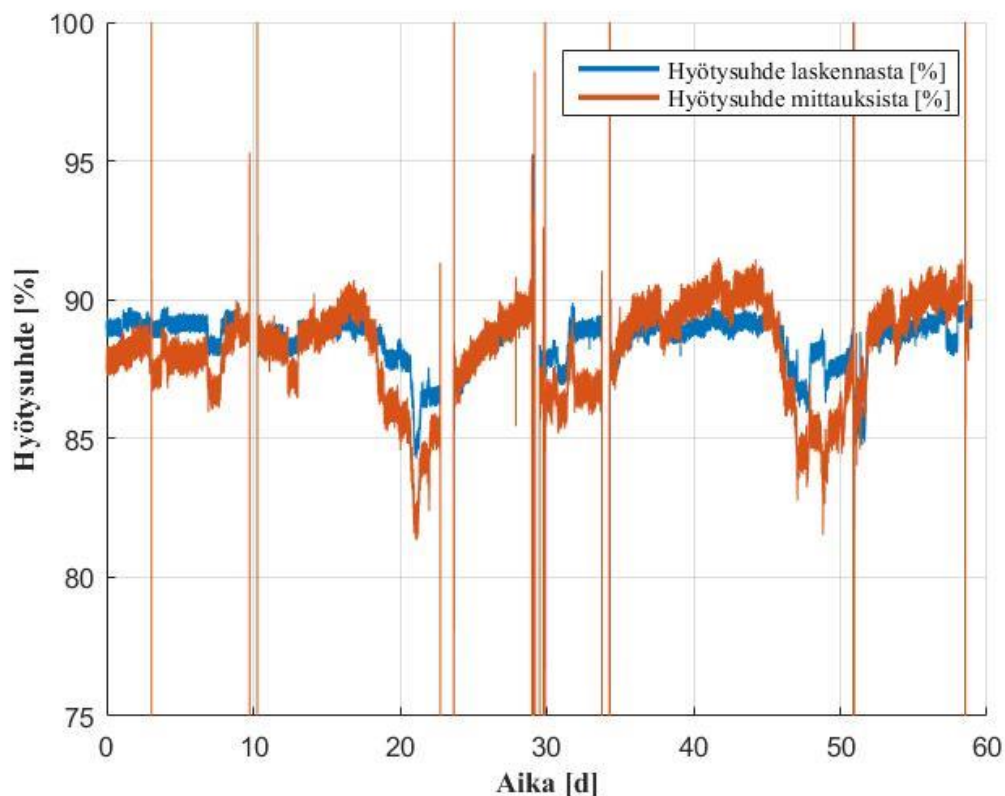
**Kuva 4.** Laskettu ja mitattu tilavuusvirta

Virtaaman määrittämisessä ongelmana on tulosten oikeellisuuden todentaminen. Yllä olevasta kuvasta huomataan, että laskettu ja mitattu tilavuusvirta eroavat toisistaan. Erotus kuitenkin vaihtelee ajan funktiona, joka johtuu ohivirtauksen osuuden muutoksesta. Mitattu tilavuusvirta tiedetään epätarkaksi, mutta lasketun tilavuusvirran tarkkuutta ei tiedetä. Eri tilavuusvirtoja verifioidaan laskemalla pumpun hyötysuhde

molempia tilavuusvirtoja käyttämällä. Hyötysuhteen laskentaan tarvitaan tilavuusvirta, tiheys, nostokorkeus, putoamiskiihtyvyys ja akseliteho. Toisaalta, jos hyötysuhde tiedetään, voidaan yhtälön avulla ratkaista pumpun akseliteho. Hyötysuhde  $\eta$  lasketaan yhtälöllä 6.

$$\eta = \frac{q_v \rho H g}{P} \quad (6)$$

Molemmilla virtaamilla lasketut pumpun hyötysuhteet ovat kuvassa 5.



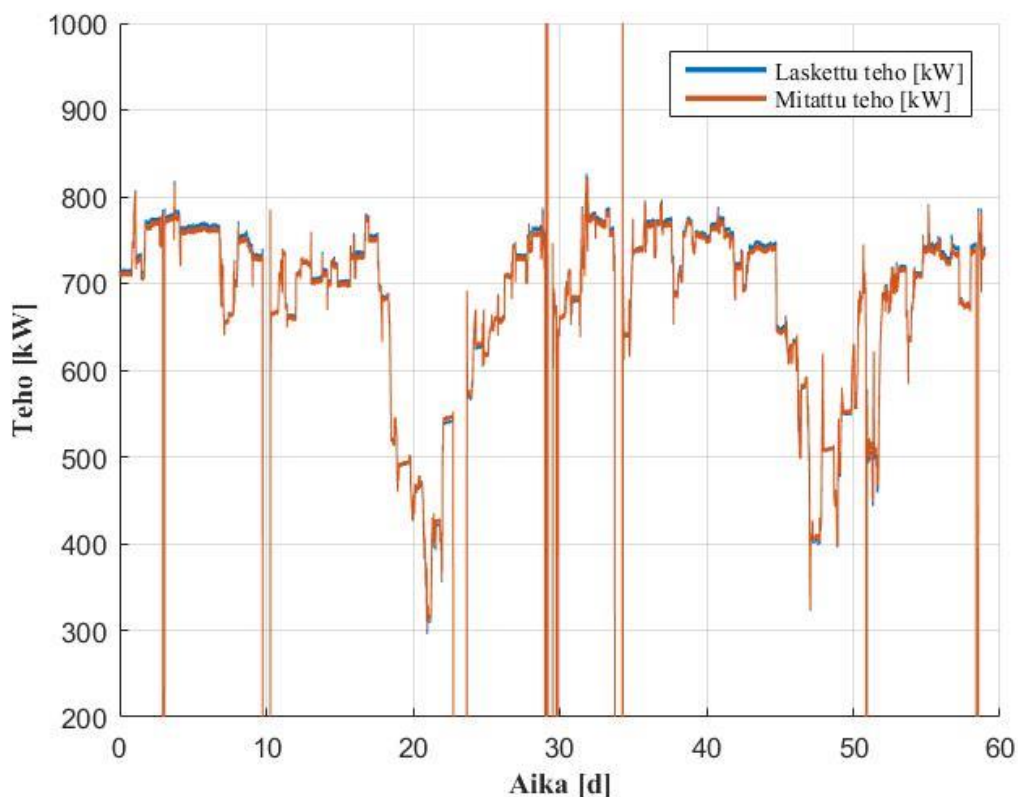
**Kuva 5.** Laskennan ja mittausten avulla saadut hyötysuhteet

Kyseisen pumpun maksimihyötysuhde on 89 %, ja suunnitellun toimintapisteen hyötysuhde on 88 %. Epävarmoilla mittauksilla laskettu hyötysuhde käy useasti yli 90 %:n. Näissä pisteissä mittauksella ei saada todellista virtausta. Pumpulaskennan avulla saatu hyötysuhde pysyy noin 88 %:ssa, joka on todennäköisin hyötysuhde pumpun normaaliajossa. Ilman pumppukäyrää tehdyssä laskennassa huomattiin, että pumppua on ajettu kyseisellä aikavälillä suurimman osan ajasta suunnitellussa toimintapisteessä.

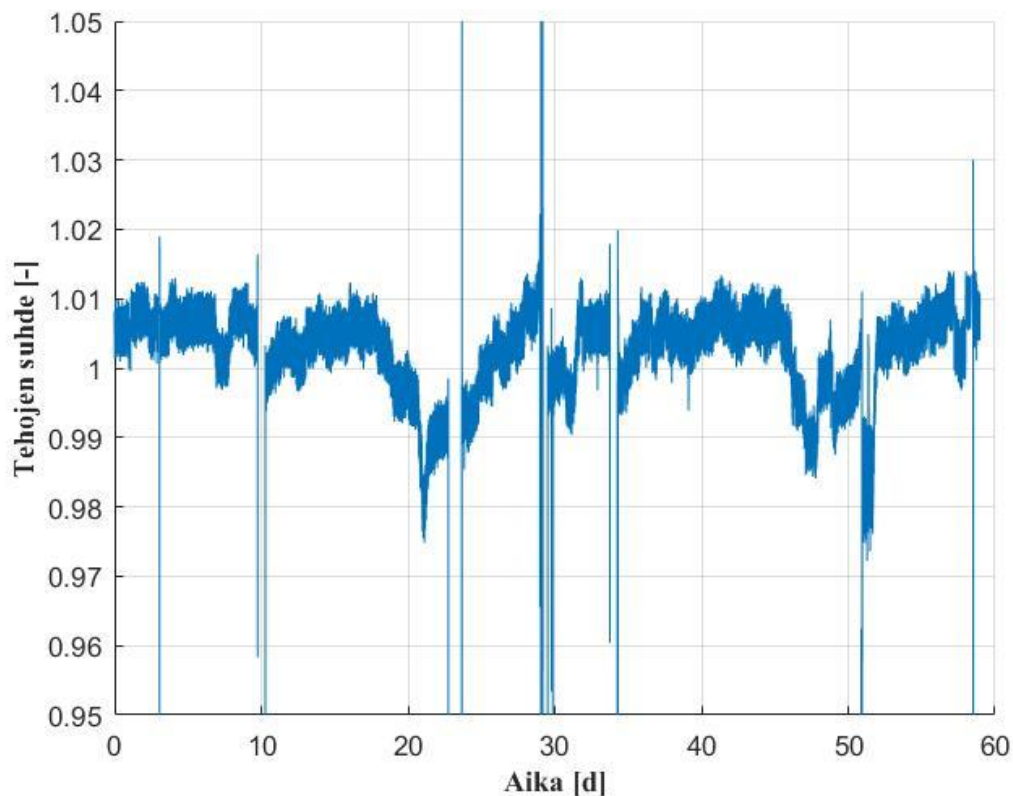


Myös tämä tukee lasketun tilavuusvirran avulla saadun hyötysuhteen oikeellisuutta, ja samalla siis vahvistaa lasketun tilavuusvirran hyvää tarkkuutta.

Hyötysuhteen tarkastelun lisäksi lasketun tilavuusvirran avulla voidaan laskea pumpun teho. Teho lasketaan yhtälöllä 5, ja saadusta vektorista valitaan oikean alkion arvo, kuten tilavuusvirran selvityksessä. Laskettua tehoa verrataan tarkkaan taajuusmuuttajalta mitattavaan tehoon. Taajuusmuuttajan mittaus kertoo muuttajan sähköverkosta ottaman tehon, joten siitä poistetaan valmistajan mukaan ohjeellinen 3 % häviö, jotta saadaan pumpun teho. Laskettu teho vastaa erittäin hyvin mitattua tehoa. Lasketun ja mitatun tehon ero on vain noin 1 %. Laskettu ja mitattu teho esitetään kuvassa 6 ja niiden välinen suhteellinen ero kuvassa 7.

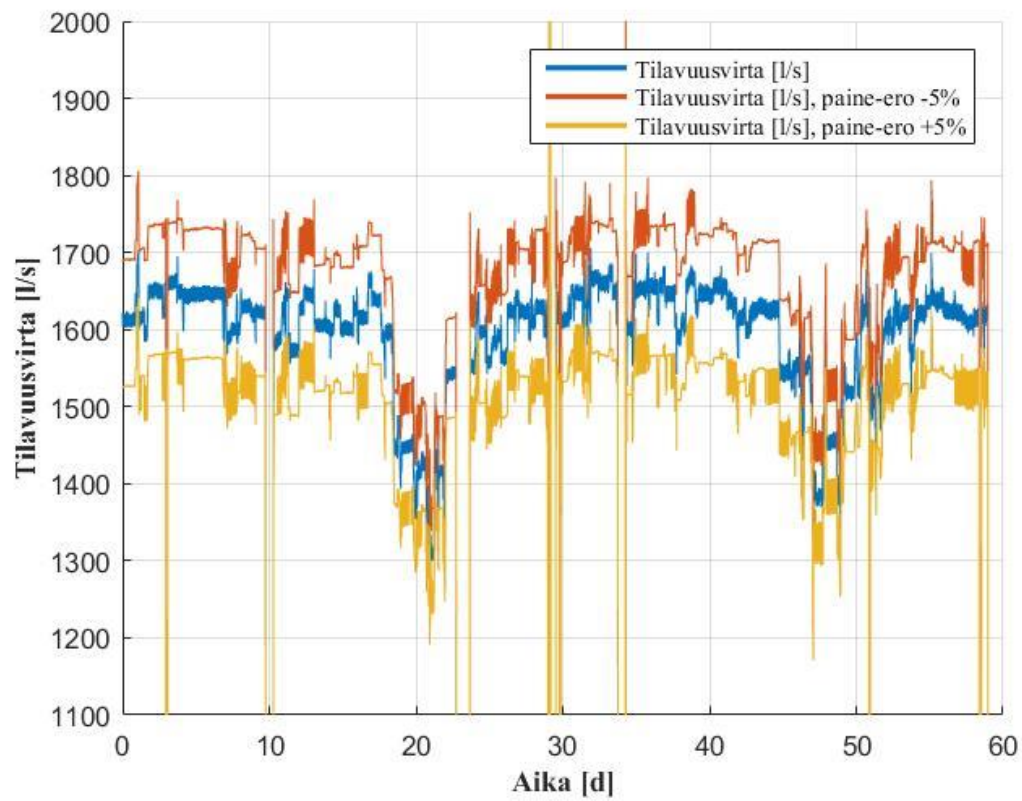


**Kuva 6.** Laskettu ja mitattu teho



**Kuva 7.** Lasketun ja mitatun tehon suhde, joka on laskettu jakamalla laskettu teho mitatulla teholla.

Pumpun tilavuusvirran laskennalle suoritetaan myös herkkyysanalyysi paineen suhteen. Painetermin vaikutus nostokorkeuteen ja sitä kautta tilavuusvirtaan on suuri verrattuna nopeus- tai korkeuserotermiin. Tämän lisäksi paineen mittauksessa on epävarmuutta, sillä paineita ei mitata pumpun lähistöltä. Pumpun molemmilla puolilla on tuntematon pituus putkea ennen painemittaria, joten painehäviötä on vaikea arvioida. Paine-eroa muutetaan 5 % pienemmäksi ja suuremmaksi, jolloin saadaan tilavuusvirran vaihteluväli paine-eron muuttuessa. Tällä tavoin huomioidaan paine-eromittauksen epävarmuutta. Tilavuusvirran herkkyysanalyysi paine-eron suhteen on kuvassa 8. Tilavuusvirta muuttuu noin 80 l/s, jos paine-ero muuttuu 5 %.



**Kuva 8.** Tilavuusvirran laskennan herkkyysanalyysi paine-eron suhteen.

## **6 PUMPUN MALLINTAMISEN HYÖDYNTÄMISMAHDOLLISUUDET**

Tässä luvussa pohditaan pumppulaskennan soveltamismahdollisuuksia paperikoneilla. Pumppuilta lasketaan ajoarvot, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi käyttöönoton aikaisessa laitteiston toiminnan varmistamisessa, paperikoneen tehonkulutuksen simuloinnissa tai pumppujen huollon tarpeen arvioinnissa.

Tässä työssä laskettava pumpun tilavuusvirta vastaa perälaatikon virtaamaa. Tarkasti tiedettävää virtaamaa voidaan hyödyntää muun muassa paperikoneen laitteiden toimintaa testattaessa käyttöönoton aikana. Nykyiset mittausjärjestelyt ovat epätarkkoja, ja vaihtoehtoiset mittaukset ovat liian kalliita toteutettavaksi. Tilavuusvirran voisi mitata esimerkiksi magneettisella virtausmittarilla, mutta mittari on liian kallis isosta putkesta mitattaessa. (Valmetin sisäinen lähde)

Valmetin tavoitteena on ollut luoda digitaalinen paperikone, jolla on mahdollista seurata ja simuloida todellisen paperikoneen toimintaa. Tämän työn ohessa syntynyt funktio mallintaa pumpun nostokorkeuden, tilavuusvirran, tehon ja hyötysuhteen saatavilla olevat mittaukset huomioiden. Esimerkiksi tehomallinnuksen tarkkuudessa tämän työn ohessa syntynyt laskentafunktio on erinomainen, ja sitä hyödynnetäänkin tehonkulutuksen seurannassa ja optimoinnissa.

Tarkan mallintamisen ansiosta funktiota voidaan käyttää myös muun tyyppisissä sovelluksissa. Tehomalli seuraa erittäin hyvin vastaavaa mittausta, joten jos malli ja mittaus eroavat toisistaan niin voidaan olettaa, että pumpussa on tapahtunut jokin muutos. Muuttunut pumppu ei pysy alkuperäisellä nopeuskäyrällä, joten alkuperäistä käyrää käyttävä funktio ei anna enää oikeita tuloksia. Tätä huomiota voidaan käyttää esimerkiksi arvioidessa pumppujen huollon tarvetta. Hyväkuntoiset pumput mahdollistavat koneen tehokkaan käytön.

## 7 YHTEENVETO

Tässä työssä laskettiin pumpun tilavuusvirta saatavilla olevien mittausten avulla, jonka jälkeen arvioitiin tulokseen vaikuttavia tekijöitä ja validoitiin laskennan tuloksia. Työssä perehdyttiin myös paperikoneen toimintaan ja sen energiankulutukseen.

Työn teoriaosiossa esiteltiin paperikonetta, sen energiankulutusta ja keskipakopumpun toimintaa. Paperikoneen rakenteesta ja toiminnasta kerrottiin osa kerrallaan. Rakenteen ja toiminnan selvityksen jälkeen perehdyttiin paperikoneen energiankulutukseen. Se jaoteltiin paperi- ja kartonkikoneisiin, joiden keskimääräiset energiankulutukset eriteltiin osakohtaisesti taulukoituna. Tämän lisäksi selvitettiin säästömahdollisuuksia sekä toimenpiteitä, joilla näihin säästöihin voitaisiin päästä. Eniten säästöpotentiaalia löydettiin massan valmistuksesta, viira- ja puristinosalta sekä kuivausosalta. Keskipakopumpun tilavuusvirran laskentaa pohjustettiin esittelemällä pumpun rakenne ja toiminta. Rakenne havainnollistettiin kuvan avulla.

Työn laskentaosiossa laskettiin pumpun tilavuusvirta sekä ohessa muita pumpuille tyypillisiä arvoja. Laskenta tehtiin Matlab-ohjelmalla, ja osana laskentaa pumpun pumppukäyrä digitoitiin Matlabiin. Lasketun tilavuusvirran tarkkuus oli parempi kuin nykyisin käytössä olevalla tavalla mitattava virtaama. Tilavuusvirran lisäksi laskennasta saatavia pumpun tehoa ja hyötysuhdetta voidaan hyödyntää muissa Valmetin tarjoamissa palveluissa. Laskennan tulokset havainnollistettiin XY-tason kuvaajilla. Työn sivutuotteena syntyi Matlab-funktio, jolla voidaan mallintaa pumppuja.

Työ täytti kandidaatintyön vaaditun laajuuden menemättä ohjeellisen laajuuden yli. Työn päätavoite oli pumpun tilavuusvirran laskeminen riittävän tarkasti, ja tavoite saavutettiin. Myös työn sivutavoitteet täyttyivät: pumppulaskennassa syntyi funktio pumppujen mallintamista varten, ja paperikoneen energiankulutuksesta muodostettiin yleiskäsitys kirjallisuuslähteiden perusteella. Lisäksi työssä otettiin kantaa paperikoneen energiankulutuksen mahdollisiin parannuskohteisiin.

## LÄHDELUETTELO

Eurostat. 2017. Electricity price statistics. [www-sivu] [viitattu 7.10.2017] Saatavissa: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity\\_price\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics)

Jokio M. et al. 1999. Papermaking Part 3, Finishing. Jyväskylä: Gummerus Printing. 361 s. Finnish Paper Engineers' Association/TAPPI. ISBN 952-5216-10-1

Karlsson M. et al. 2000. Papermaking Part 2, Drying. Jyväskylä: Gummerus Printing. 496 s. Finnish Paper Engineers' Association/TAPPI. ISBN 952-5216-09-8

Kramer K. J. et al. 2009. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry. [verkkodokumentti] [viitattu 4.9.2017] Saatavissa: [https://www.energystar.gov/ia/business/industry/downloads/Pulp\\_and\\_Paper\\_Energy\\_Guide.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/downloads/Pulp_and_Paper_Energy_Guide.pdf)

Laurijssen J., Faaij A., Worrell E. 2013. Energy Efficiency: Benchmarking energy use in the paper industry: a benchmarking study on process unit level. Springer Netherlands. ISSN 1570-6478.

Motiva. 2011. Energiatehokkaat pumput. [verkkodokumentti] [viitattu 20.8.2017] Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat\\_pumput.pdf](https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat_pumput.pdf)

Paulapuro H. et al. 2007. Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Jyväskylä: Gummerus Oy. 516 s. Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. ISBN 978-952-5216-25-7

PrintWiki. 2015a. Off-Machine Coating. [www-sivu] [viitattu 25.10.2017] Saatavissa: [http://printwiki.org/Off-Machine\\_Coating](http://printwiki.org/Off-Machine_Coating)

PrintWiki. 2015b. On-Machine Coating. [www-sivu] [viitattu 25.10.2017] Saatavissa: [http://printwiki.org/On-Machine\\_Coating](http://printwiki.org/On-Machine_Coating)

Reese D. 2009. Measuring Paper Machine Energy Performance. [verkkodokumentti] [viitattu 4.8.2017] Saatavissa: <http://www.tappi.org/content/events/09papercon/papers/reese2.pdf>

SCA. 2010. Papermaking. [verkkojulkaisu] [viitattu 25.7.2017] Saatavissa: <https://www.sca.com/globalassets/papper/media/brochyre/papermaking-eng>

Sunair. 2017. Sulzer CPT/AHLSTAR Pumps. [www-sivu] [viitattu 10.9.2017] Saatavissa: [https://www.sunair.com/section\\_247\\_AHLSTAR-Process-Pumps.cfm](https://www.sunair.com/section_247_AHLSTAR-Process-Pumps.cfm)

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2017. Energian hinnat, Liitekuvio 5. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. [verkkojulkaisu] [viitattu 12.10.2017] Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehi/2017/02/ehi\\_2017\\_02\\_2017-09-07\\_kuv\\_005\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2017/02/ehi_2017_02_2017-09-07_kuv_005_fi.html)

Tikka P. et al. 2008. Chemical Pulping Part 2, Recovery of Chemicals and Energy. Jyväskylä: Gummerus Oy. 387 s. Finnish Paper Engineers' Association/Paperi ja Puu Oy. ISBN 978-952-5216-26-4

Valmet. 2012. Papermaking Savings Potentials. [verkkodokumentti] [viitattu 24.8.2017] Saatavissa: [http://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/board-and-paper-making/wppb\\_papermakingsavings.pdf](http://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/board-and-paper-making/wppb_papermakingsavings.pdf)

Valmet. 2017a. Automaatio. [www-sivu] [viitattu 9.7.2017] Saatavissa: <http://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/automaatio/>

Valmet. 2017b. Avainluvut. [www-sivu] [viitattu 11.7.2017] Saatavissa: <http://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/avainluvut/>

Valmet. 2017c. Historia. [www-sivu] [viitattu 8.7.2017] Saatavissa: <http://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/historia/>

Valmet. 2017d. Liiketoiminnat. [www-sivu] [viitattu 11.7.2017] Saatavissa: <http://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/>

Valmet. 2017e. Palvelut. [www-sivu] [viitattu 9.7.2017] Saatavissa:  
<http://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/palvelut/>

Valmet. 2017f. Paperit. [www-sivu] [viitattu 10.7.2017] Saatavissa:  
<http://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/paperit/>

Valmet. 2017g. Sellu ja energia. [www-sivu] [viitattu 10.7.2017] Saatavissa:  
<http://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/sellu-ja-energia/>

Wirzenius A. 1977. Keskipakopumput. Tampere: Tampereen kirjapaino Oy. 323 s. ISBN  
951-9316-01-9



## LIITE I KESKIPAKOPUMPUN YLEISKÄYRÄ

