

# **Imuyhteen mallien kehittäminen**

Jouko Mäenpää

Opinnäytetyö  
Marraskuu 2020  
Tekniikan ala  
Insinööri (AMK) Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Mäenpää, Jouko	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Marraskuu 2020
	Sivumäärä 38	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Imuyhteen mallien kehittäminen</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), konetekniikka		
Työn ohjaaja(t) Janne Lappi, Petri Luosma		
Toimeksiantaja(t) Valmet Technologies oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Valmet Technologies oy. Työn aiheena oli tuottaa malleja imuyhteille imuteloissa ilmenneiden ongelmatilanteiden parantamiseksi. Valmet on päättänyt ratkaista ongelmaa lisäämällä erillisen kaksiosaisen imukammion imute-loihinsa. Yhtenä työn tavoitteista oli tutkia virtauksen käyttäytymistä yhteen eri kohdissa, ottaen huomioon geometrian vaikutus virtaukseen, sekä pyrkiä pitämään virtausnopeudet alle 160 m/s. Toisena tavoitteena työssä oli pohtia mallien valmistettavuutta ja niiden liittämistä imulaatikkoon, sekä pyrkiä toimittamaan ratkaisuja, jos näissä toimissa ilmenee ongelmia.</p> <p>Opinnäytetyö oli luonteeltaan kehittämistutkimus. Työn tutkiva osuus keskittyi imuyhteiden geometrian vaikutukseen virtauksessa. Kehittävä osuus puolestaan keskittyi tutkimustulosten hyödyntämiseen käytännössä. Tutkimusaineisto saatiin lähinnä kirjoista, asiaan liittyviltä internet sivustoilta, toimeksiantajan koulutusmateriaaleista, sekä taulukkokirjoista. Mallien 3-d geometriat muokattiin toimeksiantajan aikaisemmista Catia malleista, hyödyntäen tutkinnan tuloksia.</p> <p>Tutkimuksessa selvisi geometrian vaikutus virtausnopeuteen, paineen muutoksiin, sekä mahdolliseen massan kasautumiseen imuyhteiden eri kohtiin. Tutkimuksen tuloksia käytettiin apuna kehitystyössä. Kehitystyön aikana saatiin selville, ettei ainakaan yksi tuotetuista malleista toimi halutulla tavalla halutuissa olosuhteissa, johtuen siinä käytetystä geometriasta. Kehitystyön tuloksena saatiin kolme mallia, joista yksi hylättiin siinä ilmenneiden ongelmien vuoksi.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Paperikone, imutela, Pickup tela, imulaatikko, imuyhde, tuotekehitys		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Mäenpää, Jouko	Type of publication Bachelor's thesis	Date November 2020 Language of publication: Finnish
	Number of pages 38	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Development of suction connection models</b>		
Degree programme Mechanical engineering		
Supervisor(s) Lappi Janne, Luosma Petri		
Assigned by Valmet Technologies Oy		
Abstract  <p>The study was commissioned by Valmet Technologies inc. The purpose of the work was to produce models for suction connection to improve problem situations encountered in suction rolls. Valmet has decided to solve the problem by adding a separate two-piece suction chamber to its suction rolls. One of the goals of the work was to study the behavior of the flow at different points of the suction connection, taking into account the effect of geometry on the flow, and to try to keep the flow velocity below 160 m / s. Another goal of the work was to consider the manufacturability of the models and their connection to the suction box, and to try to provide solutions if problems arise in these areas.</p> <p>The study was developmental in nature. The research part of the work focused on the effect of the geometry of the suction connections on the flow. The development part, on the other hand, focused on the practical utilization of research results. Material for the study was obtained mainly from books, relevant websites, the client's training materials, and table books. The geometries of the 3-d models were modified from the client's previous Catia models, utilizing the results of the research.</p> <p>The study revealed the effect of geometry on flow rate, pressure changes, and possible mass accumulation at different points in the suction connections. The results of the study were used as an aid in development work. During the development work, it was found that at least one of the models did not work as desired under the desired conditions, due to its geometry. As a result of the development work, three models were obtained, one of which was rejected due to the problems that were found in it.</p>		
Keywords/tags (subjects) Paper machine, suction roll, pickup roll, suction box, suction connection, product development		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
1.1	Toimeksiantaja .....	4
1.2	Opinnäytetyön tausta ja rajaus .....	5
<b>2</b>	<b>Tutkimusmenetelmä.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Imutela ja sen toimintaympäristö .....</b>	<b>7</b>
3.1	Imutela.....	7
3.1.1	Imulaatikko ja imuyhde .....	8
3.2	Imutelojen toimintaympäristö .....	9
<b>4</b>	<b>Virtaus .....</b>	<b>10</b>
4.1	Virtaavan aineen ominaisuudet ja virtaus imuyhteessä .....	11
4.2	Viskositeetti .....	13
4.3	Reynoldsin luku .....	14
4.4	Virtaustyytit .....	15
4.5	Muodon vaikutus.....	16
<b>5</b>	<b>Työn toteutus .....</b>	<b>20</b>
5.1	Ideointi.....	20
5.1.1	imuyhteen rakenne .....	22
5.1.2	Liittäminen imulaatikkoon.....	25
<b>6</b>	<b>Tulokset .....</b>	<b>26</b>
6.1	Mallit.....	27
6.2	Liittäminen imulaatikkoon .....	35
<b>7</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>36</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>37</b>
	<b>Liitteet.....</b>	<b>39</b>

## Kuviot

Kuvio 1 valmet lukuina (Valmet vuosikatsaus. 2019.).....	4
Kuvio 2 Imutela (Paperitekniiikan ja automaation oppimisympäristö 2020).....	8
Kuvio 3 Viskositeetin määritelmä (Nakayama 2000, 9).....	13
Kuvio 4 Virtaustyytit vas. laminaarinen ja oik. turbulenttinen (Bohl 1984, 93-95) .....	16
Kuvio 5 Vastuskertoimen arvoja (bohl) .....	17
Kuvio 6 Irtoamisalueita (Bohl 1984, 111) .....	18
Kuvio 7 Terävä yhdistin (Idel'chik 1960, 301) .....	19
Kuvio 8 Terävän yhdistimen kertoimia (Idel'chik 1960, 301) .....	19
Kuvio 9 Käyrän yhdistimen tietoja (Idel'chik 1960, 290) .....	20
Kuvio 10 Vaatimuslista.....	21
Kuvio 11 Malli 1 ns. Y-malli .....	23
Kuvio 12 Malli 2 eli putkia putkissa .....	24
Kuvio 13 Malli 3 eli välimalli jakorengas.....	25
Kuvio 14 Malli 1 edestä.....	27
Kuvio 15 Malli 1 putkiakseli .....	28
Kuvio 16 Malli 2 putkiakseli osineen .....	29
Kuvio 17 Malli 2 jako edestä .....	29
Kuvio 18 Malli 3 perusgeometria.....	32
Kuvio 19 Malli 3 jakorengas .....	33

## Taulukot

Taulukko 1 Malli 2 kammio 1 tulokset.....	30
Taulukko 2 Malli 2 kammio 2 tulokset.....	31
Taulukko 3 Malli 2 kammio 3 tulokset.....	31
Taulukko 4 Malli 3 kammio 1 tulokset.....	33
Taulukko 5 Malli 3 kammio 2 tulokset.....	34
Taulukko 6 Malli 3 kammio 3 tulokset.....	34

# 1 Johdanto

Opinnäytetyössä oli tarkoituksena tuottaa Valmet oy:n suunnittelun käyttöön kolmiulotteinen malli imutelan imulaatikkoon liittyvästä imuyhteestä. Työ on osa imutelatuotteiden vakiointia, jossa pyritään helpottamaan telojen valmistusta, lisäämään imulaatikoiden kammioiden määrää, sekä vähentämään tarvittavien osien lukumäärää. Työssä pyrittiin löytämään yhteen valmistukseen liittyvät ongelmat, ottamaan huomioon imukammioiden geometrian vaikutus virtaukseen, huomioimaan yhteen liittäminen imulaatikkoon, sekä arvioida imulaatikossa tarvittavien osien muodon vaikutusta virtaukseen.

Kammioiden määrän lisäämisellä työssä pyritään lisäämään telan imutehoa reunoilla, jotta paperi raina ei pääsisi roikkumaan. Tämän hetkisillä ratkaisuilla on mahdollisuus, että raina irtoaa telan reunoilta aiheuttaen ongelmia paperinvalmistus prosessissa.

Tuotekehityksellä pyritään parantamaan tuotteiden toimivuutta, muokata niitä vastaamaan muuttuvia asiakastarpeita ja olosuhteita tai kehittää uusi tuote, jos vanhan muokkaus ei enää riitä. Tuotekehitys toteutetaan yleensä projekteina. Tuotekehitysprojektit voidaan yleensä jakaa neljään vaiheeseen, jotka ovat käynnistäminen, luonnosteluvaihe, kehittelyvaihe, sekä viimeistely. (Tuotekehitys 2001.)

Tavoitteena tuotekehityksessä on luoda tuote joka on mahdollisimman lähellä asetettuja tavoitteita. Tavoitteisiin pääsemisessä pyritään ottamaan huomioon, sekä taloudelliset seikat, että teknilliset vaatimukset, joita tuotteen valmistus ja käyttö vaatii. Projektin viimeistelyssä yleisesti laaditaan tuotteelle työpiirustukset, ohjeet, osaluettelot, jne. Tässä vaiheessa tuotteen lopullinen muoto hioutuu ja viimeiset ongelmat yritetään löytää ja ratkaista. Tavallisesti valmistetaan myös tuotteen prototyyppi jolla saadaan tarkastettua, että tuote toimii vaatimusten mukaisesti. Suurissa järjestelmissä, kuten paperikone ei prototyypin valmistus ole mahdollista, jolloin epävarmoista osista voidaan rakentaa koekappaleita mahdollisesti pienoismalleina. (Tuotekehitys 2001.)

## 1.1 Toimeksiantaja

Valmet on yksi maailman johtavista teknologian, automaation ja palveluiden toimittajista ja sellu-, paperi-, sekä energiateollisuuden kehittäjästä. Valmetin palveluiden ytimen muodostavat sellutehtaat, paperin- ja kartonginvalmistuslinjat, sekä bioenergia voimalaitokset. Valmetilla on yli 200 vuoden historia teollisuudessa. Valmetin palveluksessa on yli 13 000 henkilöä 30 eri maassa maailman laajuisesti. Liikevaihto Valmetilla vuonna 2019 oli noin 3,5 miljardia euroa (Kuvio 1) ja sen pääkonttori sijaitsee Espoossa. (Valmet lyhyesti N.d.)



Kuvio 1 valmet lukuina (Valmet vuosikatsaus. 2019.)

Suomessa Valmetin palveluksessa on noin 5160 henkilöä pääosin Tampereella (1946 hlö) ja Jyväskylässä (1440 hlö) lisäksi Suomen toimipisteitä löytyy muun muassa Järvenpäästä, Juankoskelta, sekä Raisiosta. Suomessa Valmetin toiminta painottuu puun ja sellun käsittelyyn, sekä paperi- ja sellukoneiden ratkaisuihin. (Valmetin toiminnot Suomessa N.d.)

Valmetin historia ulottuu yli 220 vuoden taakse 1750- luvulle, jolloin Suomenlinnassa toimi pieni allastelakka. 1790- luvulla perustettiin myös Tamfelt, jonka toiminnot ovat nykyisin osa Valmetin Palvelut -liiketoimintalinjaa. Vuosien saatossa Suomen valtio hankki omistukseensa metallitehtaita, jotka vuonna 1946 yhdistettiin Valtion Metallitehtäiksi ja vuoden 1951 alussa nimi muutettiin Valmet oy:ksi. Valmet on valmistanut historiansa aikana kaikenlaista aseista ja lentokoneista hisseihin ja paperikoneisiin, nykyisin pääpaino on paperiteollisuudessa. (Valmet lyhyesti N.d.)

Nykyisin Valmet tuo vuosittain markkinoille noin sata uutta tuotetta, joita on usein kehitetty yhteistyössä asiakkaiden kanssa. Valmet tekee yhteistyötä myös maailman johtavien tutkimuslaitosten, sekä yliopistojen kanssa. Vuonna 2019 Valmet satsasi tutkimukseen ja kehittämiseen 71 miljoonaa euroa. Valmetin 16 koelaitoksessa tutkitaan ja kehitetään sekä Valmetin omia, että asiakkaiden projekteja ja niiden ansiosta Valmet pystyy lyhentämään markkinoille tuontiaikoja, sekä pienentämään kaupallistamiseen liittyviä riskejä. (Tutkimus ja kehitys 2019.)

## 1.2 Opinnäytetyön tausta ja rajaus

Paperikoneissa käytetään erilaisia teloja erilaisissa toiminnoissa, kuten rainan kuljetamisessa. Telojen joukosta löytyvät imutelat, joilla pyritään poistamaan rainasta nestettä tai joilla pyritään siirtämään raina haluttuun suuntaan. Toimeksiantaja on huomannut, että joissakin tilanteissa paperiraina pääsee irtoamaan imutelantelan reunoilta ja asiaan pyritään löytämään ratkaisua. Mahdollisia syitä tapahtumalle voi olla monia, kuten esimerkiksi imulaatikoiden muodosta johtuva imun heikentyminen reunoilla tai rainan ominaisuuksista johtuva irtoaminen.

Opinnäytetyö käsittelee Valmet Technologies oy:n imuteloista löytyvien imuyhteiden kehittämistä ongelman ratkaisemiseksi. Tavoitteena oli tuottaa imuyhteen malleja, jotka vastaavat toimeksiantajan tarpeita. Työn aloituksessa Valmetilla oli jo päätetty lähestyä ongelmaa lisäämällä imukammioita imuteloihin, jolloin imuvoima telojen reunoilla saadaan kasvamaan ja raina pysymään varmemmin paikoillaan.



Työ rajattiin koskemaan Pickup- ja puristin telojen vakiointia, päätavoitteena imukammioiden ja imuyhteen suunnittelu. Lopputuloksena työssä oli tarkoitus tuottaa 3-d malleja imuyhteestä. Tuloksena saaduissa malleissa tuli olla otettuna huomioon virtauksen käyttäytyminen imuyhteen sisällä, jotta pystyttäisiin arvioimaan mallien toimivuus todellisuudessa. Malleihin ei ollut tarkoitus tehdä kattavaa virtausmallinusta, vaan niiden tarkoitus oli toimia pohjana suunnittelijoille. Malleissa tuli myös olla pohdittuna niiden valmistettavuutta, sekä sitä miten imuyhde liitetään imulaatikoon ja mitä ongelmia siitä mahdollisesti aiheutuu.

## 2 Tutkimusmenetelmä

Tutkimusmenetelmänä työssä hyödynnetään kehittämistutkimusta, koska työssä tulee huomioida niin laadullisia kuin määrällisiä näkökohtia ja kehittämistutkimus soveltuu tähän hyvin. Laadullisista näkökohdista tärkeimpinä voidaan mainita valmistettavuuden huomioiminen, virtauksiin liittyvät huomioon otettavat asiat, sekä koneen rakennuksessa vaadittavat konedirektiivin mukaiset standardit. Määrällisiä näkökohtia työssä ovat muun muassa imukammioiden koot, sekä niissä liikkuvan aineen määrä. (Kananen 2010, 159)

Kehittämistutkimuksella pyritään kehittämään jotain asiaa tai toimintaa ja siihen pyritään tietoisella toimimalla kohti haluttua päämäärää. Kehittämistutkimus on yhdistelmä monia eri tutkimusmenetelmiä, joita voidaan soveltaa erilaisiin tutkimuskohteisiin ja tilanteisiin sopiviksi. Kehittämistutkimusta voidaan siis nimittää monimenetelmätutkimusotteeksi. Menetelmässä yhdistyvät kvalitatiiviset-, sekä kvantitatiiviset tutkimusotteet. Kehittämistyön edellytyksinä ovat nykytilanteen kartoitus, vaihtoehtojen etsintä ja kartoittaminen, tavoitteiden määrittäminen, sekä tavoitteisiin pääsemiseen tarvittavien keinojen valinta. (Kananen 2010, 159)

### **Kvalitatiivinen tutkimus**

Kvalitatiivinen eli laadullinen tutkimus on menetelmäsuuntaus, jolla pyritään ymmärtämään tutkimuksen kohteen ominaisuuksia, merkityksiä, sekä tutkimuksen kohteen laatua. Laadullinen tutkimus on periaatteessa mikä tahansa tutkimus, jolla pyritään

löytämään tuloksia ilman määrällisiä menetelmiä, kuten tilastolliset menetelmät. Laadullisessa tutkimuksessa korostuvat kohteen taustaan, esiintymisympäristöön, sekä tarkoitukseen liittyvät näkökohdat. (Laadullinen tutkimus 2015)

### **Kvantitatiivinen tutkimus**

Kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus käyttämisessä tarvitaan jo olemassa olevaa tutkittavan ilmiön tuntemusta, sekä teoriapohjaa tutkittavasta asiasta eli tutkittavan asian tekijät ja niiden väliset suhteet tulee olla tiedossa. Määrällisen tutkimuksen tutkiva osuus voidaan toteuttaa käyttämällä esimerkiksi kyselylomakkeita tai muita sen kaltaisia keinoja tietojen keruussa. Tutkimuksen aikana ei voida palata taaksepäin yhtä helposti kuin vaikka laadullisessa tutkimuksessa, joten esimerkiksi lomakkeet on laadittava huolella. (Kananen 2010, 74-79)

## **3 Imutela ja sen toimintaympäristö**

Paperi- tai kartonkikone, jonka osiin imutelat kuuluvat, on suurista osakokonaisuuksista koostuva kone, jonka tarkoitus on tuottaa puusta lisäaineita lisäämällä valmistetusta sellusta tasalaatuista paperia tai kartonkia. Koneet voivat nykyisin tuottaa jopa noin 200 000 tonnia paperia vuodessa. Paperikoneen pääosia ovat perälaatikko, viiraosa, puristinosa, sekä kuivatusosa. (Hägglom-Ahnger 2003, 14-15)

### **3.1 Imutela**

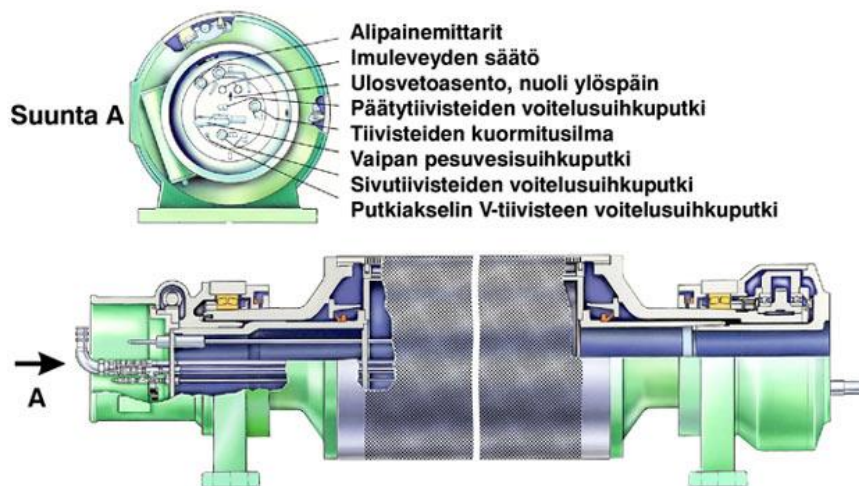
Imutelat ovat paperikoneessa käytettäviä teloja, joiden tehtävänä on poistaa rainasta vettä tai saada raina kulkemaan haluttuun suuntaan. Imutelat ovat aikaisemmin olleet kumilla tai polyuretaanilla päällystettyjä, mutta viime aikoina kovapinnoitteiset telat ovat yleistyneet huomattavasti. (Hägglom-Ahnger 2003, 156)

Imutela koostuu pääosin vaipasta, imulaatikosta, putkiakseleista, laakeroinneista, sekä telan huoltoon ja voimansiirtoon tarvittavista osista. Vaipan pinta on rei'itetty,

jotta sen sisällä oleva alipaine voi poistaa rainasta vettä. Vaipan sisäpuolella olevalla imulaatikolla pyritään tuottamaan alipaine vaipan sisälle haluttuihin paikkoihin.

Imutelan toiminta perustuu alipaineen luontiin telan sisäpuolelle imulaatikon imukammioiden avulla, jolloin rainassa oleva vesi imeytyy telan kuoren läpi porattujen reikien läpi imukammioihin ja niistä edelleen imukanaviin, jotka kuljettavat veden sille varattuihin säiliöihin. (Hägglom-Ahnger 2003, 157) Imutelaan kuuluu myös sen toimintaa tarkkailevia, sekä sääteleviä laitteita, esimerkiksi imuleveyden säädöt ja vaipan pesuvedelle tarkoitetut putket. Työn pääaiheena oleva imuyhde sijoittuu yleensä kuviossa 2 oikealla olevaan putkimaiseen tilaan, jossa sen tarkoituksena on siirtää virtaus hallitusti laakereiden ja vaihteiden läpi. (Kuvio 2)

### Vaihteella varustettu Imutela



Kuvio 2 Imutela (Paperitekniikan ja automaation oppimisympäristö 2020)

#### 3.1.1 Imulaatikko ja imuyhde

Imutelan sisäosat koostuvat imutelan huoltoon liittyvistä putkistoista, kuten voitelu- ja pesuvesiputkista, sekä imulaatikosta ja siihen liittyvästä imuyhteestä. Imulaatikon tarkoituksena on luoda alipaine imukammioihin. Imulaatikko koostuu yleensä 1-3 imukammioista joihin tuotetaan alipainetta yleensä noin 35-70 kPa riippuen telan käyttötarkoituksesta.

Imulaatikko tuetaan molemmista päistään imutelan vaipan sisälle putkiakselien välityksellä. Tarvittava alipaine ohjataan imulaatikkoon käyttöpään laakeroinnin läpi tai hoitopään kautta. (Valmetin sisäinen materiaali)

Imuyhde on yleensä kahdesta tai kolmesta osasta koostuva imulaatikon putkimainen yleensä imukammioihin jaettu osa, jolla imulaatikko liitetään imukanaviin. Sen tehtävänä on ohjata virtaus hallitusti imulaatikosta laakereiden, sekä vaihteistojen ohi niin, että virtaukset eivät sekoitu keskenään. (Valmetin sisäinen materiaali)

Työssä käsitellyt imuyhteet koostuvat kolmesta kolmeen kammioon jaetusta osasta, jotka ovat laippaputkiakseli, putkiakseli, ja jakorengas. Kammioilla tarkoitetaan imulaatikon kohtia joihin on tarkoitus luoda alipaine, sekä imuyhteen akselien sisällä pituussuunnassa kulkevia kanavia.

Laippaputkiakseli on osa jolla imuyhde kiinnitetään imutelaan käyttäen hyväksi akselin laipasta löytyviä pulttinreikiä. Laippaputkiakseli on samalla myös osa imulaatikkoa tukevaa rakennetta. Putkiakseli on osa, joka kiinnitetään imulaatikkoon. Putkiakselin tehtävä on ohjata ilmavirta jakorenkkaan läpi laippaputkiakseliin, josta virtaus siirtyy ulos imutelasta. Jakorengas on akseleiden väliin asennettava laippamainen osa, jonka tehtävänä on mahdollistaa imulaatikon kääntäminen akselinsa ympäri niin, etteivät eri kammioissa kulkevat virtaukset pääse sekoittumaan.

### 3.2 Imutelojen toimintaympäristö

Imuteloilla poistetaan vettä rainasta paperin valmistuksen eri vaiheissa. Imuteloja voidaan myös käyttää paperin kulkuradan siirtämiseen haluttuun suuntaan paperikoneen sisällä. Tämän luvun tarkoituksena on kuvailla paperikoneen muutamia pääosia, kuten perälaatikko, viiraosa ja kuivatusosa.

Perälaatikon tehtävä on vastaanottaa oikeaan sakeuteen laimennettua paperimassaa ja suihkuttaa se mahdollisimman tasaisesti ja tasalaatuisesti viiran päälle paperiko-

neen levyiseksi rainaksi. Perälaatikoita on monen muotoisia, kuten reikätelaperälaatikko, sekä lamelliperälaatikko, joiden toimintatapa poikkeaa toisistaan mutta niiden toiminnan tarkoitus pysyy samana. (Hägglom-Ahnger 2003, 131-133)

Viiraosan pääasialliset tehtävät ovat aloittaa veden poisto paperimassasta, saattaa raina riittävään kuiva-aine pitoisuuteen, sekä hallita vedenpoistoa siten, että paperiin saadaan halutut ominaisuudet. Viiraosalle tuleva massa on yleensä 0,2 – 1,2 % sakeaa ja siltä lähtevä raina on kuiva-ainepitoisuudeltaan noin 15 – 20 %, joten viiraosa poistaa noin 95% massan sisältämästä vedestä. (Hägglom-Ahnger 2003, 137)

Puristinosalla rainasta poistetaan mahdollisimman paljon vettä, sekä tiivistetään rainaa. Tavoitteena on saavuttaa rainalle mahdollisimman suuri märkälujuus, jotta se siirtyy kuivaosalle ilman katkoja. Rainan tullessa viiralta sen kuiva-ainepitoisuus on 15-20 % ja puristinosan jälkeen pitoisuus on noin 35-50 %. Puristuksella pyritään vaikuttamaan paperin ominaisuuksiin kuten sileyteen ja symmetriaan, huokoisuuteen, sekä hienoainejakaumaan. Puristus tapahtuu joko puristinhuovan ja sileäntelan välissä tai kahden puristinhuovan avulla. Puristaminen aloitetaan varovasti ja sen voimaa kasvatetaan radan edetessä. (Paperitekniikan ja automaation oppimisympäristö 2020)

Kuivatusosan tehtävänä on haihduttaa rainasta vettä taloudellisesti, tehokkaasti, taiseesti ja laatua huonontamatta. Kuivatuksessa on yleisessä käytössä kolme eri menetelmää, kontakti- eli sylinterikuivaus, puhalluskuivaus, sekä säteilykuivaus. (Paperitekniikan ja automaation oppimisympäristö 2020)

## **4 Virtaus**

Luvussa on tarkoitus selventää opinnäytetyössä tarvittavia virtaukseen liittyviä tekijöitä, virtauksen teoriaa, sekä niihin liittyviä termejä. Teorian tarkoitus on selventää virtaukseen liittyviä tekijöitä, kuten dynaaminen ja kinemaattinen viskositeetti, virtaustyytit, Reynoldsin luku, sekä virtauksessa liikkuvan aineen ominaisuuksia.

Imutelojen toiminta perustuu ilmvirtauksella luotuihin alipaineisiin, joten on tärkeää, että virtaus toimii niin kuin sen on tarkoitus toimia. Virtauksen hidastuessa tai estyessä kokonaan paperin laatu saattaa kärsiä, lisäksi hidastumisen tai estymisen aiheuttamat ongelmat voivat aiheuttaa imulaitteistossa muita vielä suurempia ongelmia.

#### 4.1 Virtaavan aineen ominaisuudet ja virtaus imuyhteessä

Newtonilaisiksi fluideiksi nimitetään nesteitä ja kaasuja, jotka toimivat Newtonin viskositeettikaavan mukaan.

$$\tau = \eta \frac{\Delta v}{\Delta h} \quad (1)$$

jossa,  $\tau$  = leikkausjännitys [Pa = N/m<sup>2</sup>]  
 $\eta$  = nesteen absoluuttinen eli dynaaminen viskositeetti [Pas = Ns/m<sup>2</sup>]  
 $\Delta v$  = nestekerrosten nopeusero [m/s]  
 $\Delta h$  = nestekerrosten etäisyys [m]  
 (Genick 2013, 8)

Toisin sanoen Newtonlaiset fluidit ovat nesteitä ja kaasuja, joissa tangenciaaliset jännitykset ovat lineaarisesti verrannollisia nopeuteen. (Krause 2005, 21) Monet fluidit, kuten ilma ja vesi, joiden yhdistelmää opinnäytetyön laskelmissa käytetään, kuuluvat tähän kategoriaan. (Genick 2013, 8). Työssä käytettävien fluidien tiedot on saatu taulukoista, lähinnä Willi Bohlin Teknillinen virtausoppi kirjasta.

Paperikoneen imuteloilta imukanaviin kulkeutuva aine on pääosiltaan ilmaa, johon on sekoittunut vettä, sekä pieniä määriä muita paperin valmistuksessa tarvittavia ainesosia. Koska Imuyhteessä kulkeva massa on koostumukseltaan vaihtelevaa, mutta kuitenkin pääosiltaan ilmaa ja vettä laskennan helpottamiseksi laskuissa käytetään vain vesihöyryn tietoja. Vesihöyryn arvot antavat riittävän tarkan kuvan virtauksien käyttäytymisestä imuyhteessä.

Työssä virtaavan ilman ominaisuuksina käytettiin vedestä kylläisen ilman ominaisuuksia, jossa ilman suhteellinen kosteus oli 150% ja alkulämpötila 300K eli 26,85C. Muun

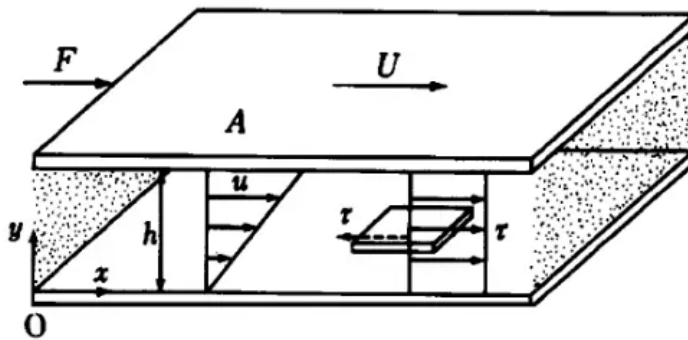
massan ominaisuuksien käyttö laskennassa koettiin haastavaksi, koska partikkeleiden viskositeettiin vaikuttaminen on hankalaa selvittää laskennallisesti, joten laskuissa ei oteta huomioon muita aineita, kuin ilma ja siihen sekoittunut vesi.

Virtausopillisella tutkinnalla pyrittiin saamaan käsitys kuinka suuria imukanavia yhteessä tarvitaan tiettyjen ilmamassojen siirtämiseen ja kuinka liikkuvan ilmamassan paine, sekä lämpötila teoreettisesti muuttuvat virtauksen aikana imuyhteen kohdissa, joissa olosuhteet kuten kanavan poikkipinta-ala muuttuvat. Tutkinnassa pyrittiin myös hahmottamaan imukammioiden muodon vaikutusta virtaukseen ja samalla pyrittiin vähentämään virtausta estävien muotojen, kuten suoraseinäiset kuristukset, määrä minimiin.

Työssä virtaava fluidi kulkee imuyhteessä, jonka pienimpänä kokonaishalkaisijana käytettiin 250 mm ja poikkileikkausten pinta-alat vaihtelivat mallista ja kammiosta riippuen välillä  $0,0026 \text{ m}^2 - 0,0389 \text{ m}^2$ . Jotta pystyttiin selvittämään fluidin käyttäytyminen imuyhteessä, piti sen fysikaaliset suureet tietää. Fysikaaliset suureet olivat tiheys, lämpötila ja viskositeetti. Näiden suureiden lisäksi tarvitaan muitakin muuttujia, kuten tilavuusvirta, sekä nopeus, joilla pystytään kuvaamaan liikettä. (Krause 2005, 24-25)

## 4.2 Viskositeetti

Viskositeetilla tarkoitetaan kuviossa 3 esitettyä virtaavan aineen kykyä vastustaa vierkkäisten kerrosten välisiä siirtymiä, toisin sanoen viskositeetti on kaasujen ja nesteiden sisäinen kitka. (kuvio 3). Suuri viskositeetti tarkoittaa, että fluidi pystyy vastustamaan virtausta paremmin, kuin pieni viskositeettinen fluidi. Fluidien viskositeetti on riippuvainen lämpötilasta, nesteiden viskositeetti pienenee lämpötilan noustessa, johtuen nestekerrosten välisistä adheesiovoimista. Kaasujen viskositeetti taas kasvaa lämpötilan kasvaessa, johtuen kaasumolekyylien liike-energian kasvusta. (Bohl 1984, 15-16)



Kuvio 3 Viskositeetin määritelmä (Nakayama 2000, 9)

Viskositeetti ilmoitetaan yleisesti dynaamisena viskositeettina ( $\eta$ ), mutta se voidaan ilmaista myös kinemaattisena viskositeettina, joka on fluidin dynaamisen viskositeetin ja tiheyden suhde. Kinemaattinen viskositeetti lasketaan kaavalla:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$



jossa,  $\nu$  = fluidin kinemaattinen viskositeetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\eta$  = fluidin dynaaminen viskositeetti [Pas]  
 $\rho$  = fluidin tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 (Valtanen 2016, 189)

### 4.3 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku on dimensioton suhdeluku, jolla pyritään erottamaan laminaarinen ja turbulenttinen virtaus toisistaan. Luvulla ilmaistaan virtauksessa vaikuttavien hitausvoimien ja viskositeettivoimien suhde (Bohl 1984, 85-86). Yleisesti Reynoldsin luku lasketaan pyöreälle putkelle käyttäen kaavaa:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}$$

jossa,  $\rho$  = virtaavan aineen tiheys  
 $v$  = keskimääräinen nopeus  
 $d$  = putken halkaisija  
 $\eta$  = viskositeetti  
 (Valtanen 2016, 190)

Muissa kuin pyöreissä putkissa käytetään kaavaa

$$\text{Re} = \frac{D_h v}{\nu}$$

jossa,  $D_h$  = hydraulinen halkaisija  
 $v$  = keskimääräinen nopeus  
 $\nu$  = kinemaattinen viskositeetti  
 (Bohl 1984, 103)

Kaavassa tarvittava hydraulinen halkaisija lasketaan kaavalla

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{U}$$

jossa,  $A$  = poikkipinta-ala  
 $U$  = märkä kehä  
 (Bohl 1984, 103)

Reynoldsin luvun ollessa alle kriittisenrajan eli 2320 on virtaus laminaarista. Turbulenttinen virtaus katsotaan alkavaksi, kun Re- luku on 4000 tai sitä suurempi. Näiden kahden luvun väliin jäävällä alueella virtaus vaihtelee satunnaisesti laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välillä. (Asikainen 2000)

Työssä käytettävissä putkissa ja kammioissa on käytetty kaavaa, joka on tarkoitettu muille kuin pyöreille putkille johtuen imuyhde mallien geometrioista. Laskennassa käytettiin kostean ilman tietoja eri paineissa alkulämpötilan ollessa 26,85 °C. Tuloksissa huomattiin, että virtaukset ovat turbulenttisia, koska Re- luku oli kaikissa tilanteissa yli 4000.

$$\text{Re} = \frac{0,169\text{m} * 81,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,4 * 10^{-5}} = 978992,8571$$

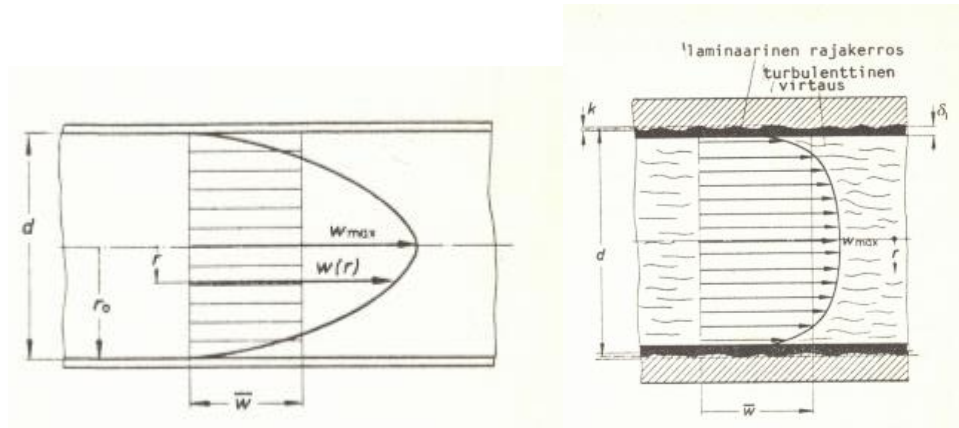
Esimerkissä on käytetty mallin 3 ulostulon arvoja, mutta kaikkien muidenkin kammioiden Re- luku näytti virtausten olevan turbulenttista.

#### 4.4 Virtaustyytit

Fluidien virtaukset voivat olla joko laminaarisia eli kerroksittaisia virtauksia tai turbulenttisia eli pyörteisiä virtauksia, joista turbulenttinen virtaus on yleisempää. Laminaarista virtausta esiintyy lähinnä vain, jos kyseessä on suuriviskositeettisen aineen virtaus pienessä putkessa pienellä nopeudella (Bohl 1984, 94-95). Jos virtaus on laminaarista niin fluidi virtaa tasaisesti eli fluidin osat virtaavat yhdensuuntaisesti. Jos laminaarisen virtauksen nopeutta kasvatetaan, muuttuu se turbulenttiseksi virtaukseksi. Turbulenttisessa virtauksessa esiintyy pyörteitä, joissa fluidin osat eivät liiku yhtenäisesti virtaussuuntaan vaan voivat liikkua jopa virtaussuunnan vastaisesti. Virtausmuodoille voidaan laskea Reynoldsin luku, jolla määritellään, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista. (Calambosi 2012)

Laminaarisessa virtauksessa virtausnopeus on korkeimmillaan putken keskiosassa ja mitä kauemmas keskiöstä mennään, sitä hitaammaksi virtaus muuttuu, jolloin sen

nopeusjakauma muodostaa poikkileikkaukseltaan kartion. Kuviosta 4 voidaan havaita, että turbulentsissa virtauksessa nopeusjakauman poikkileikkaus on paljon tylpempi, johtuen fluidin osasten liikkeen epäsuoruudesta (Kuvio 4). (Asikainen 2000) Laminaarisen virtauksen kitkahäviöön ei vaikuta käytettävän putken seinämän karheus toisin kuin turbulentsissa virtauksessa. (Bohl 1984, 87-88)



Kuvio 4 Virtaustyyppit vas. laminaarinen ja oik. turbulentsinen (Bohl 1984, 93-95)

#### 4.5 Muodon vaikutus

Eriolaiset muodot voivat vaikuttaa virtaukseen esimerkiksi muuttamalla virtausnopeutta, painetta, lämpötilaa, sekä virtaavan aineen tiheyttä. Käytetyt muodot saattavat aiheuttaa myös virtauksen irtoamista virtauskanavan seinästä, jolloin kitkahäviöiden lisäksi syntyy irtoamishäviöitä, sekä virtaukseen sekaantuvan sekundäärivirtaukseen liittyviä häviöitä. (Bohl 1984, 111)

Imuyhteen sisällä muodonmuutokset liittyvät pääasiassa jakorenkain kohdalla tapahtuvaan virtauksen kuristumiseen ja sen jälkeiseen laajenemiseen. Jakorenkain tarkoituksena on mahdollistaa imulaatikon kääntäminen. Työssä käytetyissä mallissa kääntäminen toteutettiin joko leventämällä jakorenkain seinämiä tarpeen mukaan tai käyttämällä imuyhteessä samankeskisiä putkia, jolloin kääntäminen ei vaikuta imukammioiden toimintaan.

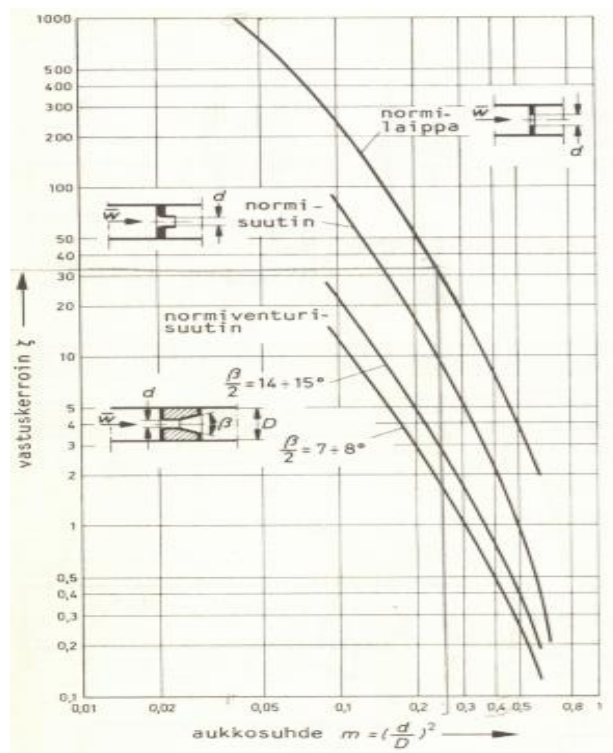
Jakorengas luetaan kuuluvaksi kuristuslaitteeksi ja sen aiheuttama painehäviö voidaan laskea käyttämällä kaavaa

$$\Delta p = \xi * \frac{\rho}{2} * v^2$$

jossa,

$\Delta p$  = painehäviö  
 $\xi$  = vastuskerroin  
 $\rho$  = fluidin tiheys  
 $v$  = nopeus ennen kuristusta  
 (Bohl 1984, 117)

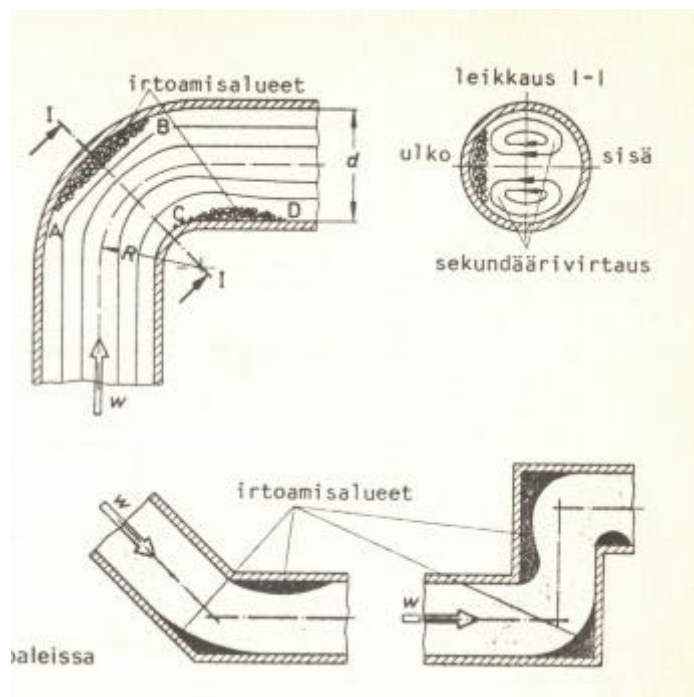
Työstä saaduissa malleissa käytettiin tätä kaavaa selvittäessä jakorengaan aiheuttamaa painehäviötä imuyhteen puoliskojen välillä. Kaikissa malleissa käytettiin jakorengasta, mutta yhdessä mallissa imulaatikon kääntö ei aiheuttanut muutoksia poikkipinta-alassa. Pinta-alan muutoksen vaikutus painehäviöön näkyy vastuskertoimen muutoksena. Kuviossa 5 on esitetty Willi Bohlin kirjassa Teknillinen virtausoppi oleva kaavio, jolla saadaan kuristuksen painehäviön kaavaan vastuskerroin. Kuvioista selviää, kuinka vastuskerroin on riippuvainen aukkosuhteesta, sekä kuristinlaitteen tyypistä. Työssä on käytetty normilaipan antamia arvoja. (kuvio 5)



Kuvio 5 Vastuskertoimen arvoja (bohl)

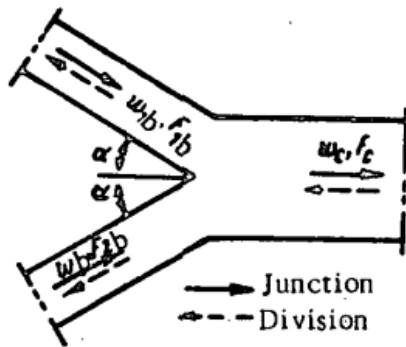
Kuristuslaitteiden lisäksi myös imukanavien mutkat, haaraumat tai yhdistymät, sekä muut muodonmuutokset aiheuttavat virtauksessa muutoksia, joita sinne ei välttämättä haluta. Tavallisimpia virtausta haittaavia muotoja ovat sen suuntaa muuttavat käyrät ja äkilliset pinta-ala muutokset, joita voidaan verrata kuristuslaitteisiin, mutta joiden vastuskerrointen arvot poikkeavat kuitenkin kuristuslaitteiden vastaavista.

Imukanavien käyrissä tapahtuu virtauksen irtoamista imukanavan seinämiä, jonka takia imukanavaan muodostuu niin sanottuja irtoamisalueita, jotka ovat esitetty kuviossa 6 mustalla (kuvio 6). Irtoamisen yhteydessä tapahtuu vastuksen kasvamista, joka puolestaan saattaa aiheuttaa muun muassa partikkeleiden kerääntymistä kanavan tiettyihin osiin. Irtoamisalueiden muodostamista voidaan pyrkiä rajoittamaan käyttämällä muotoja, joissa irtoamisalueiden muodostuminen on pienempää, kuten pienempi kulmaisia kääntöjä, joissa on käytetty pyöristyksiä kulmissa. (Bohl 1984, 111)



Kuvio 6 Irtoamisalueita (Bohl 1984, 111)

Virtauskanavien yhdistymien aiheuttama vastuskertoimen lisääntyminen käytettäessä kuviossa 7 nähtävän kaltaisia terävä kulmaisia yhdistimiä (kuvio 7) on verrannollista haarakulmaan ja tilavuusvirtojen kokoon nähden, mitä suurempi kulma ja tilavuusvirtojen suhde sitä suurempi on vastuskerroin, kuten kuviosta 8 (Kuvio 8) voidaan nähdä. (Idel'chik 1960, 301)



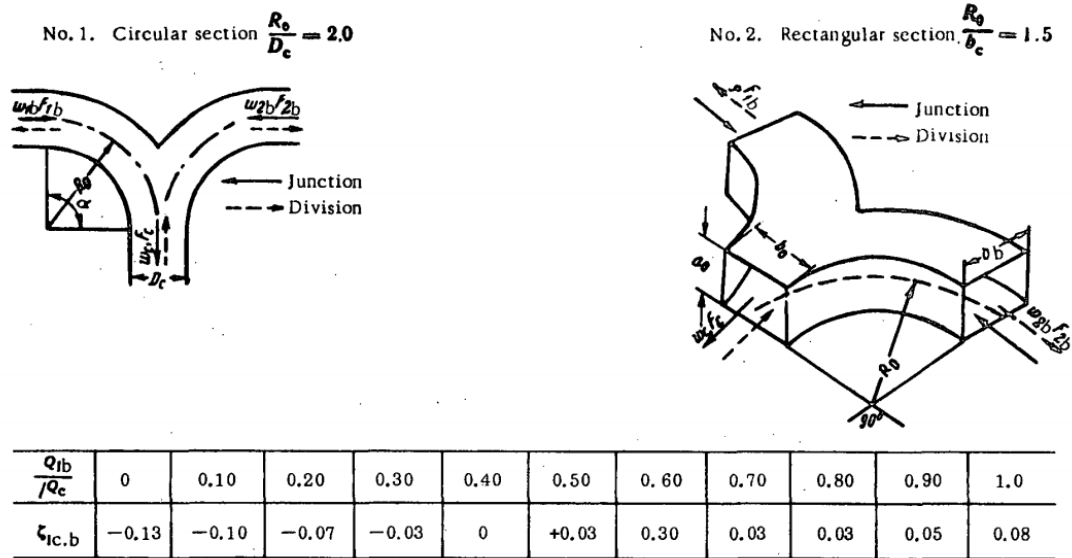
Kuvio 7 Terävä yhdistin (Idel'chik 1960, 301)

Values of  $\zeta_{c,b}$

$\alpha^\circ$	$Q_b/Q_c$										
	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0
15	-2.56	-1.89	-1.30	-0.77	-0.30	+0.10	0.41	0.67	0.85	0.97	1.04
30	-2.05	-1.51	-1.00	-0.53	-0.10	+0.28	0.69	0.91	1.09	1.37	1.55
45	-1.30	-0.93	-0.55	-0.16	+0.20	0.56	0.92	1.26	1.61	1.95	2.30

Kuvio 8 Terävän yhdistimen kertoimia (Idel'chik 1960, 301)

Käyrän yhdistimen vastuskerroin ei ole niinkään riippuvainen yhdistyvien virtausten tulokulmasta, vaan siihen vaikuttaa lähinnä tilavuusvirtojen suhde (Kuvio 9). Kuviosta 9 voidaan havaita käyrän yhdistimen vastuskerrointen poikkeavan teräväkulmaisen yhdistimen vastaavista. Vastuskertoimen lisäksi yhdistimet voivat vaikuttaa virtausnopeuksiin hidastamalla tai nopeuttamalla virtausnopeutta. (Idel'chik 1960, 290)



Kuvio 9 Käyrän yhdistimen tietoja (Idel'chik 1960, 290)

## 5 Työn toteutus

### 5.1 Ideointi

Työssä päätavoitteena oli luoda uusia malleja imuyhteelle. Nykyiset imuyhteet ovat pääasiassa kaksi kammioisia ja tavoitteena oli lisätä niihin yksi kammio, jonka tarkoitus on tuottaa alipaine imutelan molempiin päihin. Työn alussa pidetyssä aloituspalaverissa käytiin läpi työn rajaus, sekä raja-arvoja imuyhteelle.

Aloituspalaverin, sekä toimeksiantajan kanssa käytyjen keskusteluiden pohjalta laadittiin vaatimuslista (Kuvio 10). Vaatimuslistassa vaatimukset jaettiin kolmeen eri tärkeysasteeseen, jotka ovat kiinteävaatimus (KV), vähimmäisvaatimus (VV) ja toive (t). Kiinteävaatimus kohtien täytyy toteutua, jotta ratkaisu olisi kelvollinen, vähimmäisvaatimus kohtien arvot tai muut vaatimukset tulee ylittää ja toive kohtien vaatimukset tulee ottaa huomioon, jos mahdollista.

Vaatimuslista		
Vaatimusluokat: Kiinteävaatimus (kv), vähimmäisvaatimus (vv) ja toive (t)	Vaatimus	Huomiot
vv	Virtausnopeus < 160 m/s.	
vv	Imuyhteen pitää toimia, kun imulaatikkoo käännetään. $\pm 10^\circ$	Käännöt huomioitava geometrioissa.
kv	Muotojen tulee olla sellaisia, että häiriöt virtauksessa jäävät minimiin.	
kv	Valmistettavuus	
t	Kanavaan ei massaa	
kv	Imuyhteen liitettävyyys imulaatikkoon	
vv	Imuyhteen muodon meluvaikutuksen huomiointi	Virtausääntä syntyy helposti
t	Vakioinnin pohdinta	
t	Asennettavuuden huomiointi	
kv	Suhteellinen äänennopeus ei saa ylittyä	

Kuvio 10 Vaatimuslista

Imuyhteelle annettuja vaatimuksia olivat muun muassa imuilman nopeuden jääminen kammioissa alle 160 m/s. Työssä nopeudet jäivät 20-30 m/s hitaammiksi, pois lukien kuristus kohdat, joissa nopeudet jäivät vain 5-15 m/s hitaammiksi. Imuilman nopeutta laskettaessa tuli ottaa huomioon myös suhteellinen äänennopeus, koska aineen liikkeessä lähellä sitä kasvaa liikkeen aiheuttama virtausääni. Lisäksi imulaatikkoo pitää pystyä kääntämään 10 astetta kumpaankin suuntaan imutelan keskiakselin



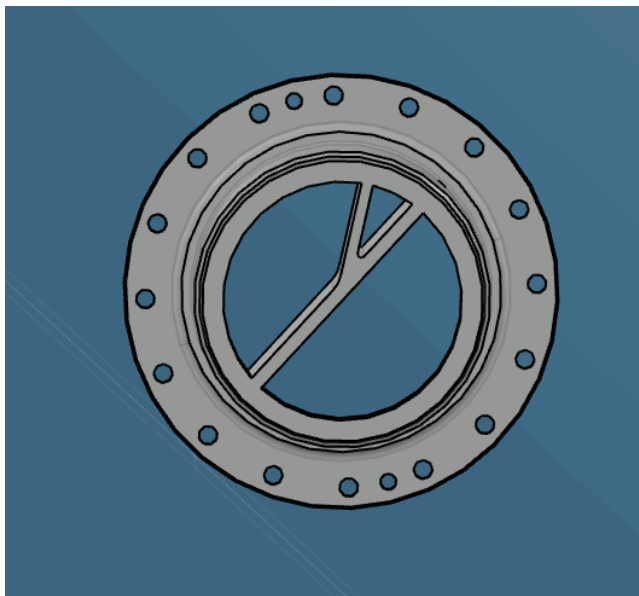
ympärillä niin, että virtaus pysyy sille tarkoitetussa kammiossa, imuyhteessä tulee välttää virtausta haittaavia muotoja, imuyhteen geometrian tulisi sopia mahdollisimman monelle eri kokoiselle tilavuusvirralle, sekä imuyhteen liittämässä imulaatikkoon vaikuttavat seikat tulisi selvittää.

Ideointi aloitettiin tutustumalla tarkemmin imutelan, imulaatikon ja imuyhteen toimintaan. Ideoinnin avuksi saatiin toimeksiantajan tiloissa käydyssä palaverissa ehdotettuja geometrian malleja, joiden pohjalta pystyttiin aloittamaan ideointi prosessi. Ideointi prosessi piti suorittaa mukailien aivoriihi menetelmää, mutta kevään 2020 aikaisen koronavirusepidemian (COVID-19) aiheuttamat etätyösuositukset laskivat tapaamiset muutamaa kertoihin. Tapaamisten vähyden takia ideointi piti suorittaa itsenäisesti luottaen koulussa opittuihin tietoihin ja taitoihin, sekä tapaamisissa saatuihin ohjeisiin.

### 5.1.1 imuyhteen rakenne

Imuyhteen mallien geometrioiksi päädyttiin kehittämään kolmea erilaista mallia. Mallien geometriat seurasivat pääosin palaverissa ehdotettuja malleja. Kehityksen aikana pyrittiin löytämään mahdollisimman toimivat geometriat imuyhteille. Päätarcoitus oli sovittaa laskennalliset mallit käytäntöön. Kehitystyössä pyrittiin huomioimaan mahdolliset ongelmat imuyhteiden valmistettavuudessa, niiden liittämässä imulaatikkoon, sekä niiden geometrian vaikutuksessa virtaukseen.

Malli numero 1#, eli niin sanottu Y- malli (Kuvio 11) noudattelee imuyhteiden perinteisiä kaksi kammioisia malleja, joissa imuyhteen kammiot ovat jaettu väliseinällä. Mallin hyviä puolia olivat sen valmistettavuus, sekä sen imulaatikkoon liittämisen suhteellinen helppous. Huonoiksi puoliksi mallissa havaittiin kehitystyön aikana sen geometriasta aiheutuvat ongelmat. Ongelmiksi mallissa muodostui pienimmän kammioiden geometriasta aiheuttamat tukoksen muodostumisen vaarat, sekä ilman nopeuden nouseminen yli 160 m/s.



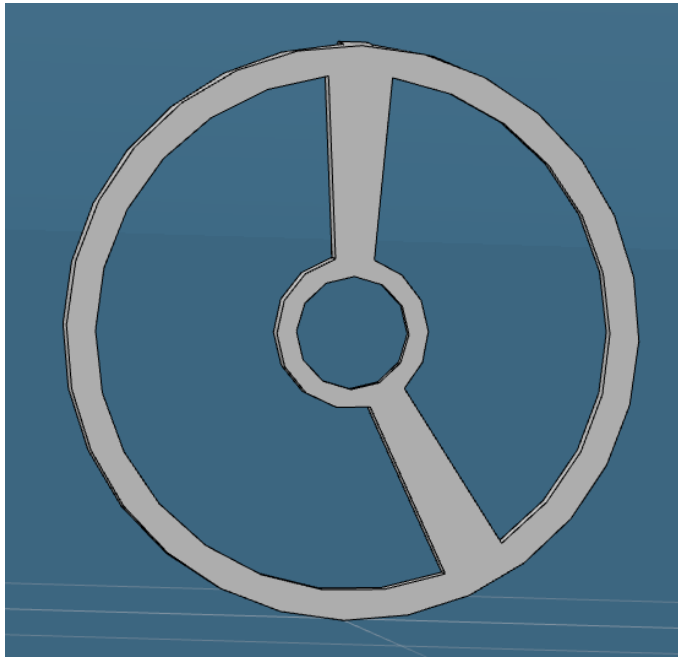
Kuvio 11 Malli 1 ns. Y-malli

Mallissa numero 2#, eli putkia putkissa-malli (Kuvio 12) pyrittiin hyödyntämään samankeskisiä sisäkkäisiä putkia. Johtuen mallin rakenteesta siinä ei kääntöjen aikana tapahdu imupinta-alan pienenemistä, vaan ainoa kuristuminen tapahtuu jakorenkaiden kohdalla ja sekään ei muutu johtuen mallin geometriasta. Mallin ongelmat ilmenevät sen liittämässä imulaatikkoon ja sen kokoamisessa. Putkista koostuvassa rakenteessa joudutaan käyttämään paljon erilaisia muotoja, jotka saattaisivat aiheuttaa virtaavan massan pakkautumista, sekä muita ongelmia.



Kuvio 12 Malli 2 eli putkia putkissa

Mallissa numero 3#, eli välimallissa (Kuvio 13) pyrittiin yhdistelemään mallien 1 ja 2 hyviä puolia. Kehittämisen aikana mallissa 1 huomattiin ongelmia sen geometriassa ja niistä pyrittiin pääsemään eroon. Mallin 2 ongelmaksi huomattiin sen imulaatikkoon liittäminen, sekä valmistus. Mallissa 3 yritettiin saada imukanavat mahdollisimman helpoiksi valmistaa niin, että käännön vaikutus jäisi mahdollisimman vähäiseksi.



Kuvio 13 Malli 3 eli välimalli jakorengas

### 5.1.2 Liittäminen imulaatikkoon

Työssä tutkittiin imuyhteen geometrian lisäksi myös sen imulaatikkoon liittämiseen tarvittavia geometrioita, sekä niiden aiheuttamia painehäviöitä. Lisäksi tutkittiin geometrioiden muita vaikutuksia virtaukseen. Työssä etsittiin myös mahdollisia ongelmakohtia. Ongelmia saattaa ilmetä muotojen aiheuttamina massan kerääntyminä tai muina vastaavina ilmiöinä. Aikatauluun liittyvien asioiden takia tutkimus jäi tässä osassa työtä teoreettiseksi pohdinnaksi.

Tuloksena tutkinnasta saatiin käsitys minkälaisia muotoja imulaatikossa olisi hyvä käyttää, kun imukammioita yhdistetään imuyhteeseen. Tutkinnan alaisena oli varsinkin kolmas imukammio, joka koostuu kahdesta erillisestä osakammioista, jolloin niiden virtaukset joudutaan yhdistämään jotenkin yhdeksi yhtenäiseksi virtaukseksi ennen imuyhdettä. Mahdollisia ongelmia yhdistämisessä olivat muun muassa partikkeleiden mahdollinen kertyminen imukanavien jyrkkiin kulmiin.

Partikkeleiden kerääntyminen imukanavan osiin aiheuttaa imukanavien ahtautumisen ja ääritapauksissa tukkeutumisen lisäksi myös muita ongelmia. Yksi muista ongelmista on esimerkiksi massan liiallinen kertyminen kulmiin tai muihin muotoihin ja jos kertynyt massa sitten pääsee irtoamaan saattaa se rikkoa liikkeessaan laitteiston eri osia.

## 6 Tulokset

Tavoitteena opinnäytetyössä oli tuottaa imuyhteen malleja, joissa on tarkasteltu eri muotojen, sekä poikkipinta-alojen vaikutusta ilmavirtaukseen. Työssä tuotettiin kolme erilaista mallia, joista saatiin tuloksia. Mallit ovat malli 1 eli Y- malli, malli 2 eli putkia putkissa- malli, sekä niiden sekoitus malli 3 eli väli- malli, jossa on käytetty kanavien jakoon, sekä putkea, että seinämiä.

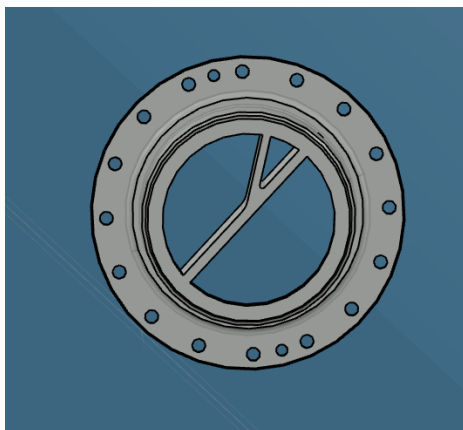
Tarkastelussa on pyritty saamaan tuloksia eri tilavuusvirroille niin, että imuilman nopeus ei ylittäisi 160 m/s, vaan jäisi huomattavasti sen alle. Mallien rakenteessa on myös pyritty huomioimaan 10 asteen kääntö kumpaankin suuntaan ja siitä aiheutuva pinta-alojen muutos, sekä siitä johtuvan pinta-alojen muutoksen aiheuttama ilmanopeuden kasvaminen.

Työssä pyrittiin tarkastelemaan imuyhteiden lisäksi imulaatikon virtaukseen vaikuttavia asioita. Työn imuyhteisiin liittyvässä imulaatikossa tulee olla kolme imukammiota, joista yksi eli kammio kolme on jaettu kahteen erilliseen imualueeseen, jotka tulee yhdistää yhdeksi imukanavaksi. Yhdistämiseen tarvittavat liitokset ja muut muodot, kuten kulmat aiheuttavat imutehoon muutoksia, sekä aiheuttavat muita ongelmia,

joten niiden sijoituksia, sekä muotoja pyrittiin tutkimaan, mutta aikataulullisten asioiden takia työ jäi tältä osalta hyvin teoreettiseksi pohdinnaksi.

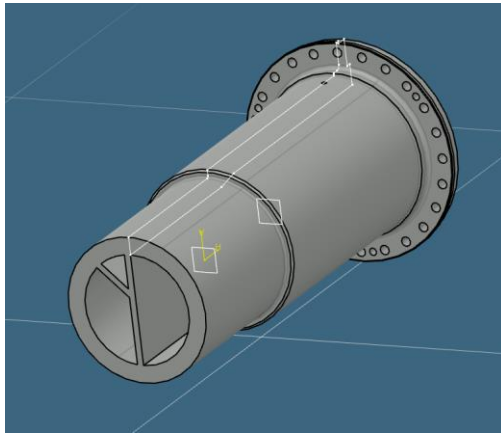
## 6.1 Mallit

Ensimmäisessä mallissa eli y-mallissa (kuvio 14) (kuvio 15) pyrittiin toteuttamaan työn alussa pidetyssä palaverissa ehdotettua mallia. Mallin kammiot on jaettu niin, että kammiot 1 on suurin ja siitä seuraava on kammiot 2, kammiot 3 jäädessä pienimmäksi. Mallin toteutus osoittautui kuitenkin hankalaksi siinä ilmenneiden ongelmien takia. Mallissa suurimmaksi ongelmaksi osoittautui kolmoskammion virtaus. Vaikka imulaatikkoo ei olisi käännetty kumpaankaan suuntaan niin jakorenkain levennysosat pienentävät imukanavan poikkipinta-alan niin pieneksi, että imuilman nopeus nousi yli 160m/s. Käännöissä pinta-ala pieneni entisestään, jolloin myös laskennallinen ilman nopeus nousi. Ongelmaa yritettiin korjata muuttamalla geometriaa mutta kammiot 3 pinta-alaa kasvatettaessa kammioiden 1 ja 2 pienentyneet pinta-alojen muutokset aiheuttivat niissä ilman nopeuden kasvun yli sallittujen rajojen. Imuyhtein geometriaa ei onnistuttu muokkaamaan niin että kyseinen malli olisi alkanut toimimaan annetuissa rajoissa, joten idea päätettiin hylätä. Tämän ongelman lisäksi kolmoskammion geometria saattaisi aiheuttaa massan kertymistä varsinkin keskiön läheiseen kulmaan, ongelmaa yritettiin korjata lisäämällä kulmaan pyöristystä, mutta se taas aiheutti ongelmia muissa kammioiden eikä poistanut pinta-alasta johtuvaa ongelmaa.



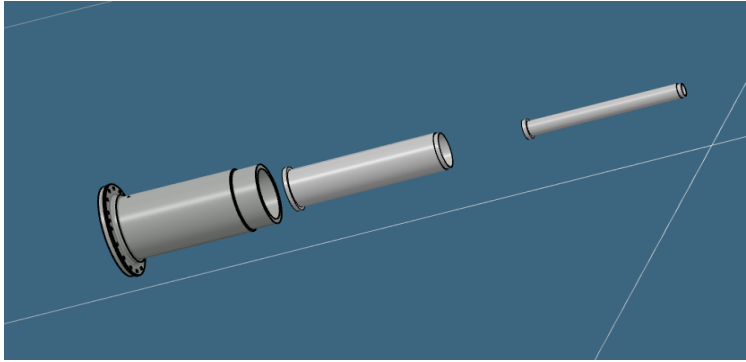
Kuvio 14 Malli 1 edestä

Y-malli olisi luultavasti ollut ainakin imulaatikkoon liittämisen kannalta helpoin ratkaisu, koska toisin kuin muissa malleissa siinä ei käytetä sisäkkäisiä putkia, eikä siinä ollen tarvita kovinkaan monimutkaisia ratkaisuja varsinkaan kolmoskammion liittämiseen. Lisäksi muiden kammioiden liittäminen onnistuisi nykyisten mallien pienellä hienosäädöllä.



Kuvio 15 Malli 1 putkiakseli

Mallissa 2 (kuvio 16) oli tarkoitus hyödyntää sisäkkäisiä samankeskisiä putkia, jolloin imulaatikon kääntäminen ei vaikuta virtausnopeuksiin. Mallissa pystyttiin välttämään muotoja, jotka aiheuttaisivat massan kerääntymistä imuyhteen eri kohtiin, pois lukien jakorenkain tukirakenteet. Jakorenkain aiheuttamat ongelmat pystytään välttämään muuttamalla rakennetta niin, että käytetään yhtenäisiä putkia koko imuyhteen läpi.



Kuvio 16 Malli 2 putkiakseli osineen

Mallin 2 geometriassa hyödynnettiin samankeskisiä putkia (Kuvio 17), jotta imulaation käännoistä aiheutuvat ongelmat pystyttäisiin välttämään. Mallissa imukammiot ovat jaettu niin, että ulkokehällä on kammio 1, kammio 2 on ulkokehältä yksi keskelle päin ja kammio 3 jää keskimmäiseksi. Kuviossa 16 olevat suorat osuudet ovat jakorenkaan tukiosia, eivätkä jaa kammioita. Samankeskiset putket poistavat tarpeen käyttää jakorenkaassa käännoissä tarvittavia levennyksiä.



Kuvio 17 Malli 2 jako edestä



Mallin laskennallisiksi virtauksiksi saatiin seuraavia arvoja:

Kammio 1:

Kammion virtausnopeudet jäivät alle 160 m/s. Ainoastaan kuristus kohdassa nopeus nousee yli 150 m/s kuten taulukosta (taulukko 1) voidaan nähdä. Taulukoissa olevat värit merkkavat lämpötilaa, pinta-alaa, sekä ilman nopeutta kyseisessä kohdassa. Väreillä on ollut tarkoitus selventää taulukkoa.

Taulukko 1 Malli 2 kammio 1 tulokset

sisään			Kuristus			Ulos		
Paine p1	41000	Pa	Paine p2	39135,7	Pa	Paine p3	40242	Pa
Tilavuusvirta V1	3,23	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V2	3,23	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V3	3,23	m <sup>3</sup> /s
Lämpötila T1	295	K	Kuristettu halk d2	0,125	m	Lämpötila T3	294,8	K
Pinta-ala A1	0,024	m <sup>2</sup>	Lämpötila T2	294,7	K	Pinta-ala A3	0,038	M <sup>2</sup>
Ilman nopeus v1	134,6	m/s	Pinta-ala A2	0,021	m <sup>2</sup>	Ilman nopeus v3	85	m/s
Tiheys p1	0,473	kg/m <sup>3</sup>	Ilman nopeus v2	153,8	m/s	Tiheys p3	0,468	kg/m <sup>3</sup>
Äänen nopeus a1	348,357669	m/s	Tiheys p2	0,46	kg/m <sup>3</sup>	Äänen nopeus a3	347	m/s
Halkaisija d1	0,143	m	Äänen nopeus a2	345,1	m/s			
			Painehäviö dp	1864,3	Pa			
			Mach luku	0,446	Ma			
			Vastuskerroin ξ	0,42				
			Aukkosuhde	0,875				

Mallin arvot kammiossa saatiin pysymään annetuissa rajoissa, joskin kuristus kohdan virtausnopeus alkaa tosiaan kohoamaan lähelle 160 m/s.

Kammion 2 arvot noudattelivat samoja linjoja kuin mallin ensimmäisen kammion arvot. (Taulukko 2). Kammiossa 2 saatiin virtausnopeudet pysymään kaikki alle 150 m/s. Eivätkä muutkaan arvot nousseet lähelle maksimi arvoja.

Taulukko 2 Malli 2 kammio 2 tulokset

keski								
Sisään			Kuristus			Ulos		
Paine p1	56000	Pa	Paine p2	54103,97	Pa	Paine p3	54490	Pa
Tilavuusvirta V1	2,37	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V2	2,37	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V3	2,37	m <sup>3</sup> /s
Lämpötila T1	296,5	K	Kuristettu halk d2	0,095	m	Lämpötila T3	294,8	K
Pinta-ala A1	0,017	m <sup>2</sup>	Lämpötila T2	294,7	K	Pinta-ala A3	0,0193	M <sup>2</sup>
Ilman nopeus v1	138,6	m/s	Pinta-ala A2	0,016	m <sup>2</sup>	Ilman nopeus v3	122,8	m/s
Tiheys p1	0,621	kg/m <sup>3</sup>	Ilman nopeus v2	148	m/s	Tiheys p3	0,624	kg/m <sup>3</sup>
Äänen nopeus a1	0	m/s	Tiheys p2	0,621	kg/m <sup>3</sup>	Äänen nopeus a3	347	m/s
Halkaisija d1	0,101	m	Äänen nopeus a2	401,44	m/s			
			Painehäviö dp	1896	Pa			
			Mach luku	0,368	Ma			
			Vastuskerroin ξ	0,42				
			Aukkosuhde	0,9				

Kammio 3:n poikkipinta-ala ei muutu imuyhteen aikana, joten siitä ei laskettu arvoja kuin yhdestä kohdasta. (Taulukko 3)

Taulukko 3 Malli 2 kammio 3 tulokset

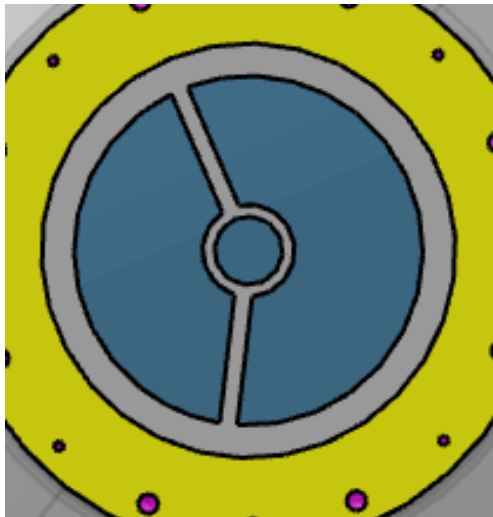
pieni			
Sisään			
Paine p1	41000	Pa	
Tilavuusvirta V1	0,29	m <sup>3</sup> /s	
Lämpötila T1	296,5	K	
Pinta-ala A1	0,0028	m <sup>2</sup>	
Ilman nopeus v1	103,6	m/s	
Tiheys p1	0,621	kg/m <sup>3</sup>	
Äänen nopeus a1	0	m/s	
Halkaisija d1	0,06	m	

Mallin 2 tulokset pysyivät sallituissa rajoissa. Lämpötilalle ei annettu rajaavaa arvoa, mutta työssä oletetaan, että arvojen tulee pysyä veden jäätyislämpötilan yläpuolella, johon mallin geometrialla päästiin. Laskennallisesti kaikkien kammioiden virtausnopeudet pysyivät alle 160 m/s, joskin kuristuksen aikana nopeus nousee aika korkeaksi.

Mallin 2 hyvä puoli on se, että käynnön aikana ei tapahdu pinta-alojen muutoksia, johon mallilla pyrittiinkin. Kammion 3 pinta-alan pitäisi pysyä samana koko yhteen mitta, joten sille ei ole laskettu muita kuin aloitus arvot.

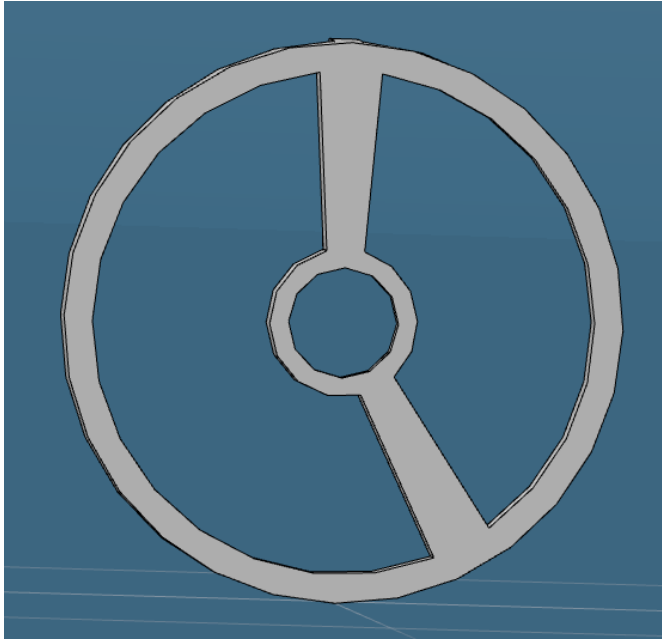
Mallin 2 huonoja puolia ovat sen valmistamiseen liittyvät ongelmat, sekä imuyhteen liittäminen imulaatikkoon. Valmistuksen ongelmat liittyvät suurelta osin putkien asennukseen ja jakorengas valmistukseen. Yhteen liittäminen imulaatikkoon voi osoittautua ongelmalliseksi, varsinkin kolmoskammion osalta johtuen kahden erialueen liittämiseen tarvittavista putkista ja niiden käännoistä.

Mallissa 3 pyrittiin hyödyntämään kahden edellisen mallin ominaisuuksia. Tarkoitus oli rajata 1. ja 2. kammiot, joista kammio 1 on suurempi, putken ulkokehälle ja saada 3. kammio kulkemaan saman keskeisesti ulkokehän kanssa, jotta sitä ei tarvitsisi miettiä käännon aikana. (Kuvio 18)



Kuvio 18 Malli 3 perusgeometria

Mallissa 3 hyviä puolia ovat sen valmistettavuuden helppous verrattuna malliin 2. Ongelmia voi kuitenkin tulla imuyhteen liittämässä imulaatikkoon samoista syistä kuin putkimallissakin ainakin 3. kammion osalta. Mallin 3 jakorengas ei aiheuta suuria ongelmia toisin kuin mallissa 1, jossa jakorengas tukki kammion 3 lähes kokonaan. Mallissa 3 jakorengas aiheuttaa pinta-alan pientymistä, mutta se oli odotettavissa ja se otettiin huomioon geometrioiden suunnittelussa. (Kuvio 19)



Kuvio 19 Malli 3 jakorengas

Mallin 3 laskennallisiksi arvoiksi saatiin seuraavia lukuja:

Kammion 1 arvot (Taulukko 4) eivät juurikaan poikkea putkimallin arvoista, vaikka geometria onkin erilainen. Kuristuskohdassa nopeus nousee tässäkin mallissa yli 150 m/s. Kuristus kohtien arvot laskettiin pienimmän mahdollisen pinta-alan mukaan, jolloin saatiin selville maksimiarvot tarvittaville suureille.

Taulukko 4 Malli 3 kammio 1 tulokset

Sisään			Kuristus			Ulos		
Paine p1	41000	Pa	Paine p2	39456,1	Pa	Paine p3	40691	Pa
Tilavuusvirta V1	3,23	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V2	3,23	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V3	3,23	m <sup>3</sup> /s
Lämpötila T1	294,7	K	Kuristettu halk d2	0,124	m	Lämpötila T3	294,8	K
Pinta-ala A1	0,0258	m <sup>2</sup>	Lämpötila T2	294,7	K	Pinta-ala A3	0,0398	M <sup>2</sup>
Ilman nopeus v1	125,2	m/s	Pinta-ala A2	0,021	m <sup>2</sup>	Ilman nopeus v3	81,1	m/s
Tiheys p1	0,469	kg/m <sup>3</sup>	Ilman nopeus v2	153,8	m/s	Tiheys p3	0,469	kg/m <sup>3</sup>
Äänen nopeus a1	349,8	m/s	Tiheys p2	0,621	kg/m <sup>3</sup>	Äänen nopeus a3	347	m/s
Halkaisija d1	0,153	m	Äänen nopeus a2	344,29	m/s			
			Painehäviö dp	1543,8	Pa			
			Mach luku	0,446	Ma			
			Vastuserroin ξ	0,42				
			Aukkosuhde	0,814				

Kammiossa 2 tulokset (Taulukko 5) noudattelivat myös samoja linjoja mallin 2 kanssa. Mallissa 3 kammion 2 kuristuskohdan virtausnopeus jäi yli 150 m/s joka on hieman turhan nopeaa, mutta kuitenkin hyväksyttävissä rajoissa.

Taulukko 5 Malli 3 kammio 2 tulokset

Sisään			Kuristus			Ulos		
Paine p1	56000	Pa	Paine p2	54313,4	Pa	Paine p3	55307,8	Pa
Tilavuusvirta V1	2,37	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V2	2,37	m <sup>3</sup> /s	Tilavuusvirta V3	2,37	m <sup>3</sup> /s
Lämpötila T1	296,5	K	Kuristettu halk d2	0,09	m	Lämpötila T3	294,8	K
Pinta-ala A1	0,0184	m <sup>2</sup>	Lämpötila T2	294,7	K	Pinta-ala A3	0,0285	M <sup>2</sup>
Ilman nopeus v1	128,8	m/s	Pinta-ala A2	0,0155	m <sup>2</sup>	Ilman nopeus v3	83,1	m/s
Tiheys p1	0,646	kg/m <sup>3</sup>	Ilman nopeus v2	152,9	m/s	Tiheys p3	0,642	kg/m <sup>3</sup>
Äänen nopeus a1	348,4	m/s	Tiheys p2	0,616	kg/m <sup>3</sup>			
Halkaisija d1	0,109	m	Äänen nopeus a2	351,34	m/s			
			Painehäviö dp	1686,56	Pa			
			Mach luku	0,435	Ma			
			Vastuserroin ξ	0,42				
			Aukkosuhde	0,842				

Mallin 3 kammio 3 pyrittiin pitämään putkimallisena samoin, kuin mallissa 2, jotta mallin 1 ongelmat imulaatikon käännessä eivät toistuisi. Samoin kuin mallissa 2 mallin 3 kammio pyrittiin pitämään pinta-alaltaan samankokoisena koko pituudeltaan, joten sen lasketut arvot voitiin ottaa vain yhdestä kohdasta. (Taulukko 6)

Taulukko 6 Malli 3 kammio 3 tulokset

Sisään		
Paine p1	41000	Pa
Tilavuusvirta V1	2,37	m <sup>3</sup> /s
Lämpötila T1	296,5	K
Pinta-ala A1	0,0026	m <sup>2</sup>
Ilman nopeus v1	111,5	m/s
Tiheys p1	0,646	kg/m <sup>3</sup>
Äänen nopeus a1	298	m/s
Halkaisija d1	0,058	m

Kuten aikaisemmassakin mallissa kammioiden virtausnopeudet pysyvät alle 160 m/s, joskin kuristuksen aikana nopeus nousee aika korkeaksi. Malli vaikuttaa helpommalta valmistaa kuin putkimalli, koska mallissa ei ole niin montaa putkea, joita tarvitsisi kiinnittää mihinkään. Kuten putkimallisissa ongelmia voi ilmetä kolmoskammion liittämässä imulaatikkoon.

## 6.2 Liittäminen imulaatikkoon

Opinnäytetyössä pyrittiin saamaan käsitys myös imuyhteen liittämistä imulaatikkoon, sekä imulaatikossa tapahtuvasta virtauksesta. Työn tämä osuus jouduttiin jättämään teoreettiseksi pohdinnaksi aikataulun takia, eikä pohdinnan tuloksia pystytty todentamaan laskennallisesti, eikä siitä saatu tuotettua malleja.

Opinnäytetyön virtausta käsittelevässä kappaleessa pyrittiin ottamaan selvää erilaisien muotojen, kuten y- muotojen, erilaisten putkien alkupään muotojen, sekä putkikäyrien vaikutuksista virtaukseen. Tutkinnassa havaittiin, että käytettäessä virtauksen suuntaa muuttavia käyriä on suosittava pyöristettyjä muotoja, koska niissä muodostuu vähemmän alueita, jotka haittaavat virtausta tai aiheuttavat virtauksessa kulkevien partikkeleiden kerääntymistä. Lisäksi havaittiin, että virtauksen suunnan muutokset tulisi suorittaa niin että suunta muuttuu vain kerran tai suuntaa muutettaessa käytetään loivia mutkia putkissa.

Y- kappaleita käytettäessä virtauksien yhdistämisessä huomattiin myös se, että käytettäessä pyöristettyjä muotoja saadaan vähennettyä irtoamisalueiden kokoa, sekä niiden määrää. Imulaatikkojen muodot huomioon ottaen Y -kappaleiden käyttäminen ei kuitenkaan välttämättä ole käytännöllistä, vaan liitoksissa on luultavasti helpompi käyttää T- liittimiä tai vastaavia rakenteita.

Ongelmia ilmenee varsinkin kolmannen imukammion käyttöpuoleisen osan liittämässä. Mallit 1 ja 2 ovat rakenteeltaan sellaisia, että niissä tarvitsee viedä kolmas imukanava periaatteessa kahden muun läpi. Tätä tehtäessä tarvitsee käyttää huomattava määrä erilaisia virtauksen suuntaa muuttavia rakenteita, joka nostaa vastuskertoimia rakenteessa, sekä lisää muiden ongelmien riskiä.

## 7 Pohdinta

Opinnäytetyö jäi harmillisesti vajavaiseksi imuyhteen valmistamisen ja sen imulaatikkoon liittämisen osalta. Imuyhteen 3-D malleja toimeksiantajan imuteloihin työssä onnistuttiin tuottamaan ja malleista kaksi saatiin toimimaan annettujen arvojen mukaisesti. Yksi malleista hylättiin, koska se ei toiminut annettujen arvojen sisällä.

Mallien suunnitteluun liittyi virtauksen tutkiminen imuyhteessä. Virtauksen tutkiminen työssä rajoittui imuyhteeseen, joten kokonaiskuva koko imulaitteiston toiminnasta jäi työssä varsin vajaaksi. Tutkimuksella pyrittiin kuitenkin selvittämään virtaavan aineen käyttäytymistä imuyhteen eri osissa. Tutkinnan tämä osuus onnistui ja sen perusteella pystyttiin tuottamaan 3-D mallit imuyhteistä, jotka toimivat laskennallisesti annettujen arvojen mukaisesti.

Työn kannalta olisi ollut hyvä, jos olisi ollut mahdollisuus päästä tutustumaan toimeksiantajan tuotannossa imutelojen tuotantoprosessin erivaiheisiin, etenkin imulaatikon valmistukseen, sekä olisi ollut hyvä päästä näkemään imuyhte ja sen liittäminen imulaatikkoon käytännössä. Tämänhetkinen tilanne kuitenkin esti tehokkaasti tällaiset tutkimusretket.

Aikataulullisten ongelmien vuoksi työhön osaksi kuuluvaa imulaatikon puoleista tutkimusta ei saatu vietyä niin pitkälle, kuin alun perin oli tarkoitus. Aikataululliset ongelmat syntyivät pääosin siitä, että toimeksiantajan tiloissa, missä työ pääosin suoritettiin ei ollut henkilöstöä paikalla, johtuen toimeksiantajan ohjeistuksesta tehdä mahdollisuuksien mukaan etätöitä.

Opinnäytetyö onnistui olosuhteisiin nähden kohtalaisesti. Työn tavoitteista saatiin valmiiksi 3-D mallit ja niissä kulkevat virtaukset saatiin tutkittua. Harmillisesti työn muut tavoitteet jäivät vajaiksi. Työn tulosten jatkokehittelyyn jäi niiden käytännön toimivuuden arviointi, sekä pääosin niiden valmistettavuuden arviointi. Imulaatikon puoleinen virtaus ja sen ongelmat jäivät työstä uupumaan lähes kokonaan, joten jos malleja käytetään pitää asioita tutkia tarkemmin.

## Lähteet

Asikainen, S. 2000. Verkkojulkaisu Clamp-on ultraäänivirtausmittareilla tehtävät mittaukset pienissä vesiputkissa raportista. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Viitattu 28.3.2020. <https://docplayer.fi/7209437-Clamp-on-ultraaanivirtausmittareilla-tehtavat-mittaukset-pienissa-vesiputkissa.html>

Bohl, W. 1984. Teknillinen virtausoppi. 5. painos. Sonator

Calambosi, S., Mizohata, K., Palonen, V., Peura, E., Rauhala, E., Ståhlberg, B., Österberg, K. 2012. Verkkojulkaisu Aineopintojen laboratoriotyöt. Helsingin Yliopisto. Fysiikan laitos. Viitattu 26.4.2020. <http://www.courses.physics.helsinki.fi/fys/oplab/aineopinnot/monisteet/Tyoohje.pdf>

Genick, B.-M. 2013. Sähköinen versio kirjasta Basics of fluid mechanics. Viitattu 20.5.2020. [https://mountainscholar.org/bitstream/handle/20.500.11785/260/OTL\\_BookId-85\\_fluidMechanics.pdf?sequence=1](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/20.500.11785/260/OTL_BookId-85_fluidMechanics.pdf?sequence=1)

Hägglom-Ahnger, U., Komulainen P., 2006. Kemiallinen metsäteollisuus II. Paperin ja kartongin valmistus. 5. painos. Gummerus Kirjapaino. Jyväskylä.

Kananen, J. 2010. Opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Krause, E. 2005. Sähköinen versio Fluid mechanics – With problems and solutions, and an aerodynamics laboratory kirjasta. Viitattu 15.5.2020. [https://www.techylib.com/en/view/poisonmammering/egon\\_krause\\_fluid\\_mechanics](https://www.techylib.com/en/view/poisonmammering/egon_krause_fluid_mechanics)

Laadullinen tutkimus. 2015. Artikkelijyväskylän yliopiston koppa sivustolta. Viitattu 13.3.2020. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/metelmapolkuja/metelmapolku/tutkimusstrategiat/laadullinen-tutkimus>

Idel'chik, E. 1960. Sähköinen versio kirjasta Handbook of hydraulic resistance. Viitattu 10.6.2020. <https://www.nrc.gov/docs/ML1220/ML12209A041.pdf>

Nakayama, Y., Boucher, R.F. 2000. Sähköinen versio kirjasta Fluid mechanics. [https://www.academia.edu/38078520/Introduction\\_to\\_Fluid\\_Mechanics\\_Y\\_NAKAYAMA\\_K\\_E\\_I\\_N\\_E\\_M\\_A\\_N\\_N\\_OXFORD\\_AUCKLAND\\_BOSTON\\_JOHANNESBURG\\_MELBOURNE\\_NEW\\_DELHI](https://www.academia.edu/38078520/Introduction_to_Fluid_Mechanics_Y_NAKAYAMA_K_E_I_N_E_M_A_N_N_OXFORD_AUCKLAND_BOSTON_JOHANNESBURG_MELBOURNE_NEW_DELHI)



Paperitekniiikan ja automaation oppimisympäristö. 2020. Knowpap 20. Viitattu 19.4.2020. [http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/knowpap\\_system/user\\_interfaces/knowpap.htm](http://www.knowpap.com.ezproxy.jamk.fi:2048/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/knowpap.htm)

Tuotekehitys. 2001. Tapani Jokisen teokseen Tuotekehitys perustuva elektroninen julkaisu. Viitattu 3.3.2020. <http://lib.tkk.fi/Reports/2010/isbn9789526033204.pdf>

Tutkimus ja kehitys. 2019. Artikkelin Valmet technologies sivustolta. Viitattu 8.5.2020 <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/tutkimus-ja-kehitys/>

Valmet lyhyesti. N.d. Valmet oy:n sivustolta löytyvä artikkeli. Valmet lyhyesti. Viitattu 15.3.2020. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmet vuosikatsaus. 2019. Valmet oy:n vuosikatsaus 2019. Viitattu 3.3.2020. <https://www.valmet.com/globalassets/investors/reports--presentations/annual-reports/2019/valmet-vuosikatsaus-2019.pdf>

Valmetin toiminnot Suomessa. N.d. Valmet oy:n sivuilta löytyvä artikkeli. Viitattu 3.3.2020 <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-suomessa/>

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Genesis kirjat Oy.

## Liitteet