

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma / Kone- ja laitossuunnittelu

Antti Pitkäoja

VEDEN KALTAISTEN AINEIDEN JA PAPERIMASSAPUTKISTON MITOITUS

Opinnäytetyö 2014

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma

PITKÄOJA, ANTTI

Veden kaltaisten aineiden ja paperimassaputkiston mitoitus

Opinnäytetyö

81 sivua + 9 liitesivua

Työn ohjaajat

Pt. tuntiopettaja Hannu Sarvelainen

Projektipäällikkö Mika Hämäläinen

Toimeksiantaja

Descal Engineering Oy

Maaliskuu 2014

Avainsanat

putkisto, painehäviö, vesi, massa, epänewtoninen neste, virtausmallinnus, reologia

Opinnäytetyön aiheena oli luoda Descal Engineering Oy:lle uusi putkistojen mitoitusohjelma. Uusi ohjelma korvaa käytössä olevan vanhan DOS-pohjaisen laskentasovelluksen. Vanhalla putkistojen mitoitushjelmalla voitiin mitoitaa vesi, massa ja korkean viskositeetin nesteiden putkistoja. Vanhan laskentasovelluksen kahdesta laskent ominaisuudesta, vesi- ja massaputkistolaskennasta, tehtiin MS Excel -käännös. Koska veden kaltaisten aineiden virtausteoria on yleisesti tunnettua, opinnäytetyössä perehdyttiin erityisesti paperimassan virtausominaisuuksiin, virtausmallinnukseen ja painehäviöiden mitoitusten kannalta olennaisiin laatueroihin.

Opinnäytetyöhön kerättiin tietoa oppikirjoista, käsikirjoista ja tutkimusjulkaisuista. Alussa perehdytään nesteiden ominaisuuksiin, virtaustekniikan peruslakeihin ja veden kaltaisten nesteiden putkistomitoitukseen. Tämän jälkeen työssä käsitellään paperimassan virtausominaisuuksia ja virtausmallinnusta sekä esitellään korrelaatioiden luominen sekä laskentasovellusten rungot. Veden kaltaisten aineiden laskentataulukko perustuu kokoonpuristumattoman nesteen putkistovirtausteoriaan. Massalaskenta puolestaan perustuu vanhasta ohjelmasta purettuihin laskentatuloksiin ja toimeksiantajan materiaaliin.

Opinnäytetyössä purettiin vanha laskentaohjelma käyttäen hyväksi laskentatuloksia, joiden avulla luotiin korrelaatiot putkien painehäviöiden mallintamiseksi. Luodut korrelaatiot ovat kuitenkin luottamuksellisia, joten niitä ei julkaista työn yhteydessä funktio- tai kuvaajamuodossa. Opinnäytetyön tuloksena oli kaksi erillistä MS Excel -laskentataulukkoa. Molemmat taulukot täyttivät niille annetut vaatimukset.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

PITKÄOJA, ANTTI

Bachelor's Thesis

Supervisor

Instructor

Commissioned by

March 2014

Keywords

Water-Like Fluids and Pulp Piping Design

81 pages + 9 pages of appendices

Hannu Sarvelainen, Lecturer

Mika Hämäläinen, Project Manager

Descal Engineering Oy

pipng, pressure loss, water, pulp, non-newtonian fluid,
flow modeling, rheology

The purpose of this thesis was to create a new piping design calculation application for Descal Engineering Oy. The new application was created to replace the old DOS based calculation application. With the old application it was possible to design piping for the transportation of water, pulp and high viscosity fluids. In this thesis the old application was converted to MS Excel format. The new application includes design properties of water-like fluids and pulp piping. Because the fluid mechanics of water-like fluids are well known, this thesis focused on the properties of paper stock flow, flow modeling and the differences in stock quality where they affect piping pressure losses.

This thesis sums up the knowledge from books, handbooks and research publications. At the beginning of this thesis, the reader will get acquainted with fluid properties, the basic laws of fluid mechanics and the piping design of water-like fluids. After this, the thesis will cover paper stock flow properties, flow modeling and present how the piping correlations in this thesis are formed. The reader will also get acquainted with Excel worksheets. The worksheet for water-like fluids is based on incompressible liquid fluid mechanics. The pulp worksheet is based on the outcome of the old calculation application and the literature from the commissioner of this thesis.

In this thesis the old calculation application was deblocked using the outcome of the application. With the outcome it was possible to form pressure loss correlations for pipes of different sizes. The correlations created are confidential, so they are not presented in the function form or in any plot in this thesis. The outcome of this thesis was two different MS Excel worksheets. Both of them met the given requirements.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SYMBOLIT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	9
2	NESTEIDEN OMINAISUUDET JA VIRTAAUSTEKNIIKAN PERUSLAIT	10
	2.1 Kontinuumi	10
	2.2 Viskositeetti	10
	2.3 Nesteiden viskositeetin mukainen luokittelu ja reologiset mallit	11
	2.3.1 Newtoninen neste	12
	2.3.2 Epänewtoninen neste	13
	2.4 Reynoldsin luku	16
	2.5 Jatkuvuusyhtälö ja virtauskanavien laskusäännöt	17
	2.5.1 Jatkuvuusyhtälö	17
	2.5.2 Virtausten jakautuminen virtauskanaviin	18
	2.5.3 Painehäviön laskusäännöt	18
	2.6 Virtauksen energiayhtälö	18
	2.6.1 Ideaalinen neste	18
	2.6.2 Kitkallinen virtaus	20
3	VEDEN KALTAISTEN AINEIDEN PUTKISTOMITOITUS	20
	3.1 Virtauksen painehäviö	20
	3.2 Moodyn kuvaaja	21
	3.3 Laminaarisen virtauksen painehäviö	22
	3.4 Turbulenttisen virtauksen painehäviö	22
	3.5 Pienet häviöt	24
	3.6 Laitoksen NPSH-lukema	24
4	PUUKUITUSUSPENSION REOLOGIA JA PUTKISTO MITOITUS	25
	4.1 Suspension luokittelu ja puukuitujen ominaisuudet	25
	4.2 Puukuitususpensiolle sovellettava materiaalimalli	27

4.3	Puukuituvirtaus	28
4.4	Kuitujen kosketusvoimat	30
4.5	Kuituverkoston fluidisaatio	32
4.6	Puukuituspension painehäviö	32
4.7	Massalaadun ja putkiston vaikutus painehäviöön	35
	4.7.1 Sakeuden vaikutus	36
	4.7.2 Virtausnopeuden vaikutus	36
	4.7.3 Putkikoon ja putken karheuden vaikutus	37
	4.7.4 Massalaadun ja prosessoinnin vaikutus painehäviöön	38
4.8	Tulppavirtauksen painehäviöiden vertailu ja mahdolliset syyt eroihin	42
4.9	Putkiston suunnan- ja koonmuutosten vaikutukset painehäviöön	47
4.10	Virtauksen painehäviöiden mallinnus eri virtausalueilla	49
	4.10.1 Veden kaltainen virtaus	49
	4.10.2 Tulppavirtauksen painehäviö	50
	4.10.3 Laminaarinen virtaus	52
	4.10.4 Siirtymävirtauksen ja turbulenttisen virtauksen mallinnus	54
4.11	Suunnitteluohjeita tulppavirtaukselle	58
	4.11.1 Kemiallinen massa	59
	4.11.2 Mekaaninen massa	60
5	SULZER PUMPS PUMPPUJEN PUMPPU -OHJELMAN EXCEL-KÄÄNNÖS	61
	5.1 Pumppujen pumppu -ohjelma	61
	5.2 Ohjelman paperimassaosuuden käänös	62
	5.3 Paperimassan korrelaatioiden määrittäminen	64
	5.4 Laskentataulukoiden todennukset	67
6	LASKENTATAULUKOT	68
	6.1 Veden kaltaiset aineet	68
	6.1.1 Lähtötietojen määrittäminen	69
	6.1.2 Putkiosuustiedot	69
	6.1.3 Raportti	70
	6.1.4 Taulukon käyttöesimerkki: lauhdepumpun nostokorkeuden määrittäminen	70
	6.2 Paperimassa	73

6.2.1	Lähtötietojen määrittäminen	73
6.2.2	Putkiosuustiedot	73
6.2.3	Raportti	74
6.2.4	Taulukon käyttöesimerkki: massanpumppaus levyjauhimelle ja varastosäiliöön	74
7	YHTEENVETO	77
	LÄHTEET	78
	LIITTEET	81

Liite 1. Veden kaltaiset nesteet - Lähtötiedot -välilehti

Liite 2. Veden kaltaiset nesteet - Putkiosuus -välilehti

Liite 3. Veden kaltaiset nesteet - Raportti -välilehti

Liite 4. Paperimassa - Lähtötiedot -välilehti

Liite 5. Paperimassa - Putkiosuus -välilehti

Liite 6. Paperimassa - Raportti -välilehti

Liite 7. Veden kaltaisten aineiden taulukon toimivuuden todennus

Liite 8. Paperimassataulukon toimivuuden todennus 1/2

Liite 9. Paperimassataulukon toimivuuden todennus 2/2

SYMBOLIT JA LYHENTEET

A	pinta-ala
a	vakio
B	turbulentti vakio
C	sakeus (massallinen)
D	halkaisija
F	korjauskerroin, voima
G	liukumuoduuli
$\Delta H/L$	painehäviö pituusyksikköä kohden
h	paine vesipatsasmetreinä
K	konsistenssi, massalaadunvakio
k	relatiivinen karheus
L	pituus
\dot{m}	massavirta
N	ahtautumisnumero (crowding factor)
n	indeksi, kontakti/sidos
P	tuotantonopeus
p	paine
Δp	painehäviö
$\Delta p/L$	painehäviö pituusyksikköä kohden
Q	virtaama
R	säde
Re	Reynoldsin luku
t	aika
u	virtausnopeus
u_C^*	parametri
V	keskimääräinen virtausnopeus
X	kuituihin imeytynyt vesi
y	etäisyys
y_L^+	parametri
y_C^+	parametri
y_H^+	parametri
z	korkeusasema, parametri
α	vakio, parametri
β	vakio, parametri
Γ_C	leikkausnopeusgradientti
γ	vakio
$\dot{\gamma}$	leikkausnopeus
Δ	muutos
δ	paksuus
θ	vakio
κ	von Karman vakio
λ	virtausvastus, parametri
μ	viskositeetti (dynaaminen)
ν	kinemaattinen viskositeetti
ξ	kertavastus
ρ	nesteen tiheys
σ	vakio
τ	leikkausjännitys

ω raekoko

Ylä- ja alaviitteet

<i>abs</i>	absoluuttinen
<i>ap</i>	näennäinen
<i>b</i>	bulkki
<i>c</i>	kriittinen
<i>d</i>	häiritsevä
<i>f</i>	häviö
<i>fl</i>	neste
<i>h</i>	höyry
<i>i</i>	imu
<i>k</i>	kuitu
<i>kok</i>	kokonais
<i>L</i>	lumen
<i>m</i>	massallinen
<i>p</i>	plastinen
<i>v</i>	tilavuudellinen
<i>w</i>	seinämä
<i>y</i>	myötö
δ	vesikerros
<i>v</i>	vesi
+	dimensioton
*	kitka

NPSH Net positive-suction head

CSF Canadian Standard Freeness

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda MS Exceliin perustuva laskentataulukko korvaamaan Descal Engineering Oy:n vanha DOS-pohjainen putkistovirtausten painehäviöiden laskentaohjelmisto. Pumppujen pumppu -ohjelma on Sulzer Pumps Finlandin 80 - 90-lukujen vaihteessa luoma vesi-, massa- ja korkean viskositeetin nesteiden putkistomitoitusohjelma. Laskentaohjelmisto sisältää Karhulan pumpputehtaan empiiristä painehäviötietoa massanvirtauksesta. Nämä tiedot esitetään myös Ahlströmin Massan pumppaus julkaisussa. Tämän opinnäytetyön puitteissa luodaan massasta ja veden kaltaisista aineista erilliset laskentataulukot Exceliin. Kahteen erilliseen laskentataulukkoon päädyttiin sekaannusten ja taulukon suuren koon välttämiseksi. Ohjelman käänös tulee tarpeeseen opinnäytetyön toimeksiantajalle, koska 16-bittiset DOS-ohjelmat eivät enää toimi uusissa 64-bittisissä Windows-käyttöjärjestelmissä.

Tämän opinnäytetyön teoriaosuus sisältää putkistojen mitoitukseen vaadittavan teorian veden kaltaisille nesteille sekä matalan sakeuden paperimassalle. Toimeksiantajan pyynnöstä työssä käsitellään laajasti paperimassan putkistovirtausta ja virtausominaisuuksia. Opinnäytetyössä käsitellään paperimassan putkistovirtausta vallitsevan epänewtonisten nesteiden virtausteorian ja realististen mallien kautta. Opinnäytetyössä käsitellään myös putkivirtauksen lisäksi muita puukuitujen reologisia ominaisuuksia ja massalaadun vaikutusta massan virtausominaisuuksiin. Tällä hetkellä ei ole olemassa Ahlströmin Massan pumppaus käsikirjan lisäksi yhtään hyvää julkista massanvirtausta käsittelevää käsikirjaa, joten työn teoria pohjautuu tähän asti julkaistuihin valikoituihin tutkimustuloksiin.

Työssä luodaan matalan sakeuden paperimassan tulppavirtaukselle korrelaatiot putki-koille DN 80 - DN 500. Virtauksen korrelaatiot luodaan Pumppujen pumppu -ohjelmasta haettavilla painehäviön virtausarvoilla. Ohjelmasta virtausarvot on saatu rakentamalla useita makroja, jotka ohjaavat Windows käyttöjärjestelmää ja Exceliä, koska vanhaan DOS-pohjaisen ohjelmiston ohjelmistokoodiin ei käytännössä ole mahdollista päästä käsiksi. Virtaustietojen perusteella luodut korrelaatiot jäljentävät tarkasti ohjelmasta saatuja painehäviön arvoja ja ne on tarkoitettu käytettäväksi laskentaohjelmistossa, jonka vuoksi työssä ei luoda yleistettyä keskimääräistä korrelaatiota.

2 NESTEIDEN OMINAISUUDET JA VIRTAUSTEKNIIKAN PERUSLAIT

2.1 Kontinuumi

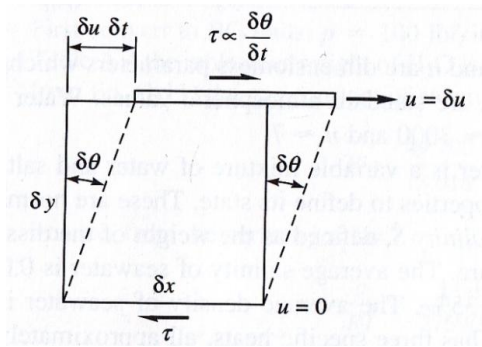
Nestevirtausten matemaattinen käsittely vaatii virtaavan aineen käsittelyn hypoteettisena jatkuvana virtauksena eli kontinuumina. Erona perinteiseen mekaniikkaan on molekyyliarakenteen tarkastelu kokonaisena, kun perinteinen mekaniikka usein tyytyy kiinteän kappaleen partikkelin tai partikkelisysteemin tarkasteluun. Kontinuumimekaniikan soveltaminen nesteen virtaukseen edellyttää nesteen olevan jatkuvassa tilassa sekä homogeeninen. Jatkovana tilana voidaan pitää nesteen virtausta äärellisen rajapinnan, kuten putken, sisällä. Kontinuumimekaniikassa pätevät mekaniikan jatkuvuusyhtälöt:

- massan säilyminen
- liikemäärän säilyminen
- liikemäärän momentin säilyminen
- systeemin energian säilyminen

Epänewtonisen nesteen tapauksessa tarvitaan kuormituksen ja muodonmuutoksen välille aineen käyttäytymistä kuvaava yhtälö sulkemaan mekaniikan yhtälöt. Yhtälön kehittäminen on yksi epänewtonisen aineen kontinuumimekaniikan ja reologian avainasioista. (1, 3 - 5.)

2.2 Viskositeetti

Nesteen viskositeetti (μ) kuvaa nesteen kykyä vastustaa vierekkäisten kerrosten välisiä siirtymiä. Viskositeetti luonnehtii siis nesteen nestemekaanista käyttäytymistä. Viskositeetti on myös nesteen termodynaaminen ominaisuus. Viskositeetin suuruuteen vaikuttaa täten nesteen lämpötila ja paine. Tarkastellaan yhdestä tasosta leikkausjännityksellä (τ) leikattavaa neste-elementtiä kuvassa 1. Elementin leikkauskulma ($\delta\theta$) kasvaa niin kauan kuin leikkausjännitys kohdistetaan elementtiin. Elementin yläkerros liikkuu nopeudella (δu), joka on suurempi kuin alemman kerroksen. Yleisesti käytetyillä nesteillä kuten vedellä, öljyllä ja ilmalla on lineaarinen suhde leikkausjännityksen ja muodonmuutosnopeuden ($\dot{\gamma}$) välillä. (2, 20 - 21.)



Kuva 1. Neste-elementin muodonmuutos. (2, 20.)

Kuvassa 1 nähdään leikkausjännityksen muutoksen olevan suoraan verrannollinen ajan suhteen tapahtuvaan leikkauskulman muutokseen (2, 20):

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad (2.1)$$

Leikkausjännitys on lineaarisilla nesteillä verrannollinen nopeusgradienttiin ($\frac{du}{dy}$). Verrannollisuusvakiona käytetään tällöin nesteen viskositeettia:

$$\tau = \frac{\delta\theta}{\delta t} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

Newtonisilla nesteillä viskositeetista puhutaan usein dynaamisena viskositeettinä (μ). Viskositeetti voidaan ilmaista myös kinemaattisena viskositeettina seuraavasti:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.3)$$

missä ρ on nesteen tiheys.

Käytännössä viskositeetti voidaan havaita nesteiden erilaisena juoksuuksina. Suuren viskositeetin aineet juoksevat "sakeasti" ja pienen viskositeetin aineet "ohuesti".

2.3 Nesteiden viskositeetin mukainen luokittelu ja reologiset mallit

Monet nesteet voidaan luokitella nesteiden viskositeetin perusteella. Viskositeetti esitetään usein leikkausjännitys-muodonmuutosnopeuskuvaajassa. Muodonmuutosnopeudesta saatetaan myös puhua leikkausnopeutena. Leikkausjännitys-muodonmuutosnopeuskuvaaja havainnollistaa nesteiden leikkauksen vastustuskykyä,

joka on yksi nesteiden tärkeimmistä reologisista ominaisuuksista. Reologia on tieteenala, joka tutkii nesteiden ominaisuuksia ja mm. nesteiden leikkauksenalaista käyttäytymistä.

Reologisesti nesteet luokitellaan leikkauksen vastustuskyvyn mukaan kahteen luokkaan, newtonisiin ja epänewtonisiin nesteisiin (2, 21 - 25). Nesteiden luokittelua havainnollistetaan kuvassa 2, jossa esitetään nesteen käyttäytyminen leikkausjännityksen alaisena. Nesteen leikkausjännityksen alainen käyttäytyminen on havaittu myös olevan ajasta riippuvainen (2, 25). Tällöin jatkuvan leikkausjännityksen alaisen nesteen leikkauksen vastustuskyky muuttuu ajan funktiona. Kuva 3 havainnollistaa nesteen kuormitusvastuksen riippuvuutta ajasta.

Epänewtonisten nesteiden luvussa esitetään erityisesti puukuitususpensiolle yleisesti käytettyjä reologisia materiaalimalleja. Yleisimmät reologiset materiaalimallit vaativat kontinuumimekaniikkaa perustakseen. Reologista mallia tarvitaan kuvaamaan epänewtonisen virtauksen leikkausjännityksen ja muodonmuutoksen suhdetta. Monet nestevirtaukset noudattavat kontinuumi mekaniikan säilymlakeja, jonka ansiosta reologisilla malleilla voidaan kuvata käyttäytymiseltään monimutkaisiakin virtaustilanteita. Kuitenkin useammat reologiset mallit edellyttävät mallinnettavan nesteen olevan homogeenistä. (1, 5.)

2.3.1 Newtoninen neste

Newtonisella nesteellä on lineaarinen riippuvuus leikkausvoiman ja muodonmuutosnopeuden välillä. Lineaarinen riippuvuus esiintyy homogeenisillä nesteillä kuten vedellä. Newtonisella nesteellä pätee yhtälö 2.4. Yhtälöstä 2.5 saadaan newtonisen nesteen eli vakioviskositeettisen nesteen keskiverto leikkausnopeus (3, 22).

$$\mu(\dot{\gamma}) = \text{vakio} \quad (2.4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{8V}{D}, \quad (2.5)$$

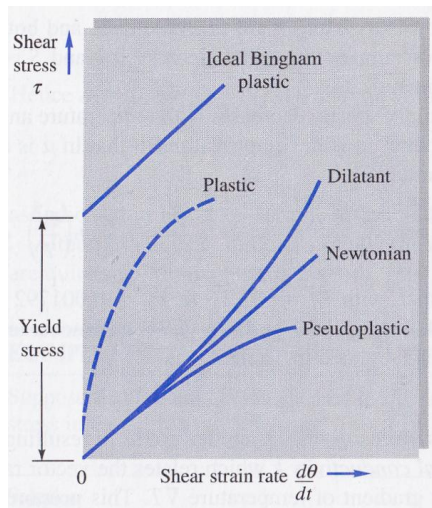
missä Q on virtaama, R on putken säde, V on virtausnopeus ja D on putken halkaisija. Vakioviskositeetin reologinen malli, joka luo riippuvuuden leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden välille, voidaan kirjoittaa kaavan 2.6 mukaan (2, 21).

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \quad (2.6)$$

2.3.2 Epänewtoninen neste

Nesteet, jotka eivät noudata lineaarista yhtälöä 2.4 voidaan luokitella epänewtonisiksi. Epänewtonisia nesteitä on olemassa kahden tyyppisiä: ajasta riippuvaisia ja ajasta riippumattomia. Ajasta riippumattomia yleisiä malleja esitetään usein kirjallisuudessa neljä kappaletta (2, 25). Malleille ominaista on kasvava tai vähenevä leikkausvastus kun materiaalia leikataan kasvavalla leikkausjännityksellä. Aikariippuvaisia yleisiä malleja esitetään kirjallisuudessa kaksi kappaletta (2, 25). Newtonisella nesteellä vastustuskyky pysyy ajan funktiona vakiona ja epänewtonisilla nesteillä vastustuskyky voi kasvaa tai laskea ajan funktiona. Tällöin vakiona pysyvän muodonmuutosnopeuden ylläpitämiseksi on leikkausjännitystä kasvatettava tai laskettava. Yleisiä ajasta riippumattomia epänewtonisten nesteiden materiaalimalleja ovat neljä seuraavaa:

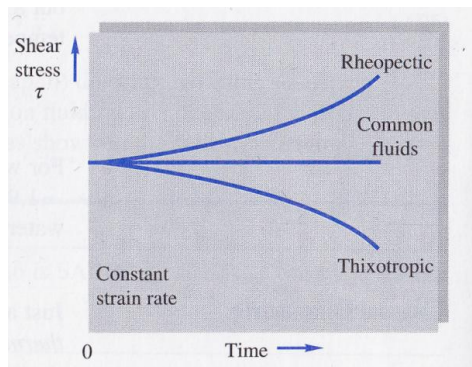
- **Dilatantti** - Leikkaussaostuva neste, nesteen leikkausvastus kasvaa siihen kohdistettavan jännityksen suuretessa.
- **Pseudoplastinen** - Leikkausoheneva neste, nesteen leikkausvastus pienenee siihen kohdistettavan jännityksen suuretessa.
- **Plastinen** - Voimakkaasti leikkausoheneva neste, nesteen leikkausvastus pienenee voimakkaasti heti, kun nesteeseen kohdistetaan jännitys.
- **Bingham -plastinen** - Alkujännityksen vaativa neste, nesteeseen on kohdistettava nesteen myötöjännityksen suuruinen leikkausjännitys virtauksen aikaansaamiseksi. Ideaalisessa Bingham -nesteessä myötämisen jälkeinen leikkausvastus kasvaa lineaarisesti newtonisen nesteen tavoin. Mahdollista nesteelle on myös vastuksen epälineaarinen käyttäytyminen.



Kuva 2. Leikkausjännitys-leikkausnopeuskuvaaja. Kuvaajassa esitetään leikkausjännitys ajan suhteen tapahtuvan kulmamuuoksen eli tässä tapauksessa leikkausnopeuden funktiona. (2, 26.)

Yleisiä ajasta riippuvaisia malleja ovat seuraavat:

- **Reopektinen** - ajan funktiona sakeneva neste, vakio muodonmuutosnopeus vaatii jatkuvasti kasvavan leikkausjännityksen.
- **Tiksotrooppinen** - ajan funktiona oheneva neste, vakio muodonmuutosnopeus vaatii jatkuvasti laskevan leikkausjännityksen.



Kuva 3. Leikkausjännityksen aikariippuvuus. (2, 26.)

Power law -neste

Ostwald de Waele Power law -materiaalimallilla voidaan kuvata materiaalin leikkaus-tihenevä tai leikkausoheneva muodonmuutos (4, 10). Power law -malli kirjoitetaan yhtälön 2.7 mukaisesti.. Verrattaessa kaavaan 2.6 voidaan huomata sen olevan lähtöisin newtonisen nesteen teoriasta.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

Kaavassa 2.7 K ja n ovat materiaalista riippuvia materiaalivakioita. Kaavassa K tarkoittaa konsistenssia, joka kuvaa aineen viskositeettia. Power law -indeksiksi sekä myös leikkausindeksiksi kutsuttu vakio n kuvaa nesteen epänewtonisuutta. Arvolla $n = 1$ aine on newtoninen neste, jos arvo poikkeaa lukemasta, on aine tällöin epänewtoninen neste. Jos indeksi $n < 1$, aine on tällöin pseudoplastinen ja, kun $n > 1$, neste on dilatantti.

$$\mu_{ap} = K\dot{\gamma}^{(n-1)} = \frac{\tau}{8V/D}, \quad (2.8)$$

Power law -materiaalimallia noudattavan nesteen näennäinen viskositeetti (μ_{ap}) voidaan määrittää kaavalla 2.8, kun $n = 1$ on näennäinen viskositeetti sama kuin dynaaminen viskositeetti (4, 10). Kaavan 2.8 toinen muoto on Duffyn (5, 75) esityksen mukainen.

Bingham-plastinen neste

Eräillä viskoplastisilla nesteillä havaitaan kiinteälle aineelle tyypillistä käyttäytymistä lepotilassa, kuten kiinteä olomuoto. Virtauksen aikaansaamiseksi tarvitaan virtauksen käynnistävä äärellinen voima, jota kutsutaan myötöjännitykseksi. Nestettä, joka myötämisen jälkeen käyttäytyy lineaarisesti leikkausjännitys-leikkausnopeus kuvaajassa, kutsutaan Bingham -nesteeksi. Bingham -malli on Power law -mallin erityistapaus, joka ilmenee leikkausnopeuden indeksinä $n = 0$. Bingham -mallin yleinen muoto:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}, \quad \tau > \tau_y \quad (2.9)$$

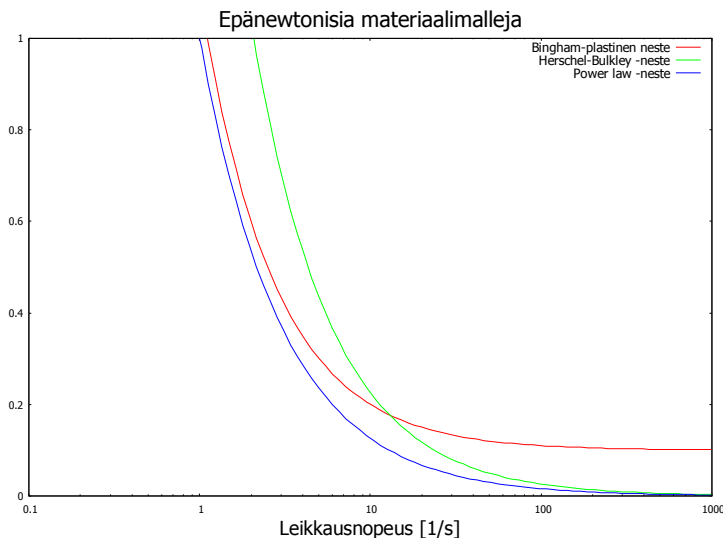
$$\dot{\gamma} = 0, \quad \tau \leq \tau_y \quad (2.10)$$

,missä μ_p on plastinen viskositeetti. (4, 11.)

Näennäinen viskositeetti Bingham-plastiselle nesteelle ilmaistaan leikkausnopeuden funktiona kaavassa 2.11. Viskositeettia rajoittaa virtauksen aikaansaama kriittinen leikkausnopeus ($\dot{\gamma}_c$). Malli ei pysty ilmaisemaan näennäistä viskositeettia hyvin pienellä leikkausnopeudella. (4, 11.)

$$\mu_{ap} = \mu_p + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}}, \quad \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \quad (2.11)$$

Edellä esitetyistä epänewtonisista materiaalmalleista kuitususpension mallintamiseen käytetään kahta viimeisintä. Viskoplastiset mallit, joista etenkin Bingham -malli sekä Herschel - Bulkley -malli ovat enemmän käytettyjä kuin Power law -malli. Korkean konsentraation suspensioilla, joilla ilmenee myötöraja, on Bingham -malli ylivertainen Power law -malliin. Bingham -malli ei kuitenkaan pysty kuvaamaan nesteen leikkausohenemista tai saostumista. Bingham -malli käyttäytyy newtonisen nesteen tavoin nesteen myötörajan ylittymisen jälkeen, jolloin viskositeetti on vakio. Mallilla ei pystytä myöskään kuvaamaan nesteen kimmoista käyttäytymistä pienissä muodonmuutoksissa. (4, 10 - 11.)



Kuva 4. Epänewtonisten materiaalmallien vertailua logaritmisella asteikolla.

2.4 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku (Re) on dimensioton vakio, joka luonnehtii kokoonpuristumattoman virtauksen luonnetta. Reynoldsin luvun mukaan virtaus jaetaan kahteen luokkaan, laminaariseen ja turbulentiin virtaukseen. Reynoldsin luvun suuruus voi vaihdella muutamasta yksiköstä miljooniin. Putkivirtauksessa virtaus on laminaarista, kun $Re < 2320$ ja suuremmilla arvoilla virtaus on luonteeltaan turbulenti (6, 188).

Laminaarista virtausta luonnehditaan virtauksena, jossa neste virtaa kerroksina. Kerrokset liukuvat herkästi ohi toistensa, ja ainoastaan molekyylit vaihtavat keskenään liikemäärää. Virtauksen pyrkimys epästabiliuteen ja turbulenssiin vaimentuu johtuen

leikkausvoimista, jotka vastustavat nestekerrosten liikettä toistensa suhteen. Turbulentissa virtauksessa partikkelien liike on hyvin epätasaista ja molekyyleillä on voimakas taipumus poikittaiseen liikemäärän siirtoon toistensa välillä. Turbulenssia voi esiintyä pienessä ja suuressa skaalassa. Pienen skaalan turbulenssissa virtaus sisältää lukuisia pieniä pyörteitä, jotka nopeasti muuttavat mekaanisen energian palautumattomaksi viskoottiseksi työksi. Virtauksen sisältämät suuren kokoluokan pyörteet luovat pienempiä pyörteitä, jotka luovat suuruudeltaan pientä turbulenssia. Turbulenssin intensiteetti yleisesti riippuu Reynoldsin luvun suuruudesta. (7, 260 -261.)

Reynoldsin luku määritetään seuraavasti:

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu}, \quad (2.12)$$

missä V on keskimääräinen virtausnopeus, D on putken sisähalkaisija, ρ on nesteen tiheys, μ on nesteen dynaaminen viskositeetti ja ν on kinemaattinen viskositeetti. (7, 260.)

2.5 Jatkuvuusyhtälö ja virtauskanavien laskusäännöt

2.5.1 Jatkuvuusyhtälö

Putkivirtauksen jatkuvuusyhtälö kuvaa putkikoon ja virtausnopeuden suhdetta putken poikkipinta-alan (A) muuttuessa. Jatkuvuusyhtälöä voidaan soveltaa pääasiassa kokoonpuristumattomalle virtaukselle. Jatkuvalle virtaukselle vakiona pysyvällä tilavuusvirralla (Q) poikkipinta-alan muutos suuremmaksi saa virtausnopeuden (V) laskemaan ja pinta-alan pienentyessä nesteen virtaamaan nopeammin. Putkipituudella, jolla tarkastelu tehdään, on virtaaman pysyttävä vakiona. (2, 307.)

$$Q_1 = Q_2 = \text{vakio} \quad (2.13)$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = V_2 = \frac{Q_2}{A_2} \quad (2.14)$$

2.5.2 Virtausten jakautuminen virtauskanaviin

Virtauksen jakautumiselle useampiin virtauskanaviin pätee sähkötekniikastakin tunnetut sarja- ja rinnankytkentäsäännöt. Rinnankytketyssä määrässä a samankokoisia putkia virtaus jakautuu tasaisesti jokaiseen putkeen. (2, 342 - 344.)

$$Q_1 = a Q_2 \quad (2.15)$$

Kahteen suuntaan haarautuvassa putkessa on virtaukselle voimassa yhtälö 2.16, jossa kokonaisvirtaus on haarautuvien virtausten summa (2, 345).

$$Q_{kok.} = Q_1 + Q_2 \quad (2.16)$$

2.5.3 Painehäviön laskusäännöt

Suorassa putkessa virtauksen painehäviöt noudattavat sarjakytkennän sääntöä. Sarjakytkennässä kokonaispainehäviö on kytkennän osien summa (6, 182).

$$h_{f.kok.} = h_{f1} + h_{f2} \quad (2.17)$$

Putkien rinnankytkennässä putkien painehäviö on yhtä suuri jokaisessa rinnankytketyssä putkessa ja kokonaishäviö on yhden putken suuruinen (6, 182).

$$h_{f.kok.} = h_{f1} = h_{f2} \quad (2.18)$$

2.6 Virtauksen energiayhtälö

2.6.1 Ideaalinen neste

Systeemin energian säilymistä kuvastava energiayhtälö on yksi virtaustekniikan perusyhtälöistä ja erityisen tärkeä putkiston suunnittelussa. Systeemissä, jossa neste virtaa sisälle yhdestä rajapinnasta ja poistuu toisesta voidaan ideaalisen virtauksen energiayhtälö kirjoittaa seuraavasti (2, 150):

$$\dot{m}_1 g z_1 + \frac{\dot{m}_1 p_1}{\rho} + \frac{\dot{m}_1 V_1^2}{2} = \dot{m}_2 g z_2 + \frac{\dot{m}_2 p_2}{\rho} + \frac{\dot{m}_2 V_2^2}{2} \quad (2.19)$$

Virtauksen jatkuvuudesta seuraa massavirran (\dot{m}) pysyvyys vakiona systeemin rajapintojen välillä:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \text{vakio} \quad (2.20)$$

Tällöin voidaan energiayhtälöstä 2.19 poistaa massavirtauksen termi puolittain ja saadaan yhtälö uuteen muotoon:

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} \quad (2.21)$$

Yhtälössä 2.21 jätetään huomioimatta systeemin lämmönsiirto, koska oletetaan nesteen lämpötilan pysyvän vakiona systeemin rajapintojen välillä. Huomioimatta jätetään myös systeemin tekemä ja systeemin tehtävä työ. Lähemmin tarkasteltaessa kaavaa 2.19 havaitaan sen koostuvan kolmesta eri komponentista. Kaavan 2.19 ensimmäinen termi ($\dot{m}gz$) sisältää systeemin potentiaalienergian. Systeemin potentiaalienergian suuruus riippuu systeemiin vedettävästä nollassasta. Ensimmäisessä termissä (z) tarkoittaa geodeettista korkeutta. Kaavan toinen termi ($\frac{\dot{m}p}{\rho}$) on paineenergian osuus. Kaavassa p on staattinen paine ja ρ on nesteen tiheys. Häviöttömässä systeemissä paine on sama virtauksen tulon rajapinnassa, kuin myös lähdön rajapinnassa. Häviöllisessä systeemissä virtauksen kitka aiheuttaa systeemissä painehäviötä, jolloin paine rajapinnoissa ei ole enää yhtä suuri. Kolmas termi ($\frac{\dot{m}V^2}{2}$) on virtauksen kiineellinen energia. Kaavassa V on nesteen virtausnopeus. Systeemin liike-energian osuus pysyy vakiona ideaalisessa systeemissä, jos rajapintojen välillä ei tapahdu virtausnopeuden muutosta. Virtausnopeus voi muuttua, jos systeemin virtauskanavan suuruus on lopussa eri kuin alussa.

Energiayhtälön termit voidaan muuntaa vesipatsasmetreiksi jakamalla jokainen termi painovoimalla. Muunnos helpottaa systeemiin tarvittavan virtauskoneen, kuten esimerkiksi pumpun valintaa, koska yhtälöstä saadaan suoraan systeemissä tarvittava pumpun nostokorkeuden arvo. (2, 150.)

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.22)$$

2.6.2 Kitkallinen virtaus

Virtauksessa esiintyy aina kitkaa, kun käsitellään todellista virtausta. Virtauksen kitka on seurausta nesteen viskoosisesta häviöstä, jossa mekaaninen energia muuttuu talteenottokelvottomaksi sisäiseksi energiaksi ja lämmöksi (2, 151). Kitkakomponentti lisätään energiayhtälön oikealle puolelle positiivisena.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_f \quad (2.23)$$

3 VEDEN KALTAISTEN AINEIDEN PUTKISTOMITOITUS

3.1 Virtauksen painehäviö

Nesteensiirron suunnittelu vaatii lähtökohtaisesti putkilinjan häviöiden tuntemista. Suunnittelijan puutteellinen tuntemus virtauksen mekaniikasta johtaa helposti liian pienen tai suuren pumpun valintaan ja loppukäyttöpaikan painetason jää usein virheelliseksi. Nesteen virtauksessa syntyy painehäviöitä, jotka voi johtua monesta eri tekijästä, mutta merkittävin painehäviön mekanismi on virtauksen kitka. Kitka voi esiintyä virtauksessa putken seinämän ja väliaineen välisenä kitkana, jonka osuus kokonaispainehäviöstä on yleensä suurin. Virtaavan aineen painehäviön on siis perinteinen mekaniikan ilmiö, jossa virtauksen energia muuttuu kitkan luomasta virtausta vastustavasta voimasta sisäiseksi energiaksi ja lämmöksi (2, 151).

Putkivirtauksen painehäviö voidaan ratkaista, jos putken seinämän leikkausjännitys pystytään korreloimaan virtausolosuhteisiin. Leikkausjännitykseen syntyyn vaikuttavat tekijät voidaan esittää funktiona yhtälön 3.1 mukaan. (2, 308.)

$$\tau_w = F(\rho, V, \mu, D, k), \quad (3.1)$$

missä k on putken seinämän relatiivinen karheus.

Virtaukselle voidaan johtaa Darcy - Weisbachin painehäviön kaava 3.2, joka pätee kaiken muotoisille putkille. (2, 309.)

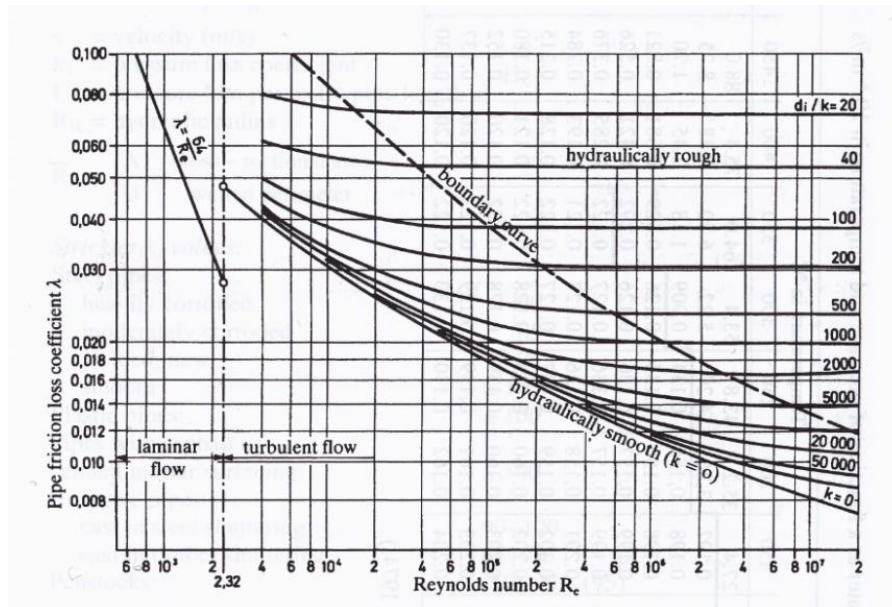
$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3.2)$$

Putkiston kertavastukset on myös syytä ottaa huomioon painehäviössä, jolloin voidaan Darcy - Weisbachin kaavaan 3.2 lisätä kertavastuksen virtausvastusvakio (ξ) ja muuntaa kaava muotoon 3.3 (2, 335). Nyt pystytään yhden kaavan avulla määrittämään painehäviö putkilinjaan, joka sisältää suoran putken lisäksi putkistokomponentteja.

$$h_f = \left(\lambda \frac{L}{D} + \Sigma \xi \right) \frac{v^2}{2g} \quad (3.3)$$

3.2 Moodyn kuvaaja

Moodyn kuvaaja on tunnetuin, ja ehkä käytännöllisin kuvaaja virtaustekniikassa. Moodyn kuvaaja esittää painehäviön vastuskertoimen riippuvuuden Reynoldsin luvusta ja putken suhteellisesta karheudesta. Moodyn kuvaajan avulla voidaan välttyä hankalien turbulენტtisten kaavojen käytöltä, jos tietokonetta ei ole käytettävissä laskemisen apuna. Kuitenkin tarkkaa tulosta haettaessa on turvauduttava kaavojen käyttöön, koska Moodyn kuvaajan tarkkuus on vain $\pm 15\%$ (2, 317).



Kuva 5. Moodyn kuvaaja. (6, 189.)

Moodyn kuvaaja esitetään kuvassa 5. Kuvaajassa on kolme erilaista virtausaluetta, jotka ovat laminaarinen alue ja kaksi erilaista turbulენტtista aluetta, jotka riippuvat putken Reynoldsin luvusta: siirtymäalue ja täydellisesti turbulентti alue. Laminaarinen alue rajautuu kuvaajassa Reynoldsin luvun arvon 2320 alapuolelle, jonka jälkeen alkaa turbulентti alue. Siirtymäalue alkaa Reynoldsin arvon 2320 jälkeen, ja se rajoittuu

katkoviivoitettuun rajakäyrään. Täysin kehittynyt turbulenti alue löytyy rajakäyrän yläpuolelta. (2, 318.)

Moodyn kuvaajan laminaarisen osuuden vastuskerroin lasketaan kaavasta 3.5, joka on johdettu Hagen - Poiseuillen kaavasta. Laminaarisella virtauksella ei huomioida putken pinnankarheutta, koska sillä ei ole vaikutusta vastuskertoimen suuruuteen. Yleisesti tiedetään laminaarisen virtauksen esiintyvän putkivirtauksessa, kun $Re < 2320$, ja tähän pisteeseen laminaarisen virtauksen kaavat rajoittavat laminaarisen virtausalueen käytön (6, 188). Virtauksen muutoksen kriittisen rajapinnan arvioidaan kuitenkin alkavan alhaisemmalla arvolla, kun $Re > 2000$ (2, 317).

Moodyn kuvaajassa väli $2000 < Re < 4000$ on jätetty osittain tyhjäksi, koska väliltä ei ole saatavissa luotettavia painehäviön vastuskertoimia. Alueen epävarmuus johtuu virtauksen siirtymäalueesta, jossa laminaarinen virtaus muuttuu turbulenttiseksi. (2, 317.)

3.3 Laminaarisen virtauksen painehäviö

Laminaarisen virtauksen painehäviö voidaan ratkaista Hagen - Poiseuillen yhtälöstä 3.4 (7, 271).

$$\Delta p = \frac{128\mu LQ}{\pi d^4} \quad (3.4)$$

Virtausyhtälöä kehittämällä voidaan johtaa Darcyn kitkayhtälö 3.5, jolla voidaan määrittää laminaarisen virtauksen virtausvastus (2, 311).

$$\lambda = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} = \frac{8(8\mu V/d)}{\rho V^2} = \frac{64\mu}{\rho V d} = \frac{64}{Re} \quad (3.5)$$

3.4 Turbulenttisen virtauksen painehäviö

Turbulenttiselle virtauksen painehäviölle on olemassa useita eri kaavoja, jotka luokitellaan putkiston karheuden ja Reynoldsin luvun mukaan. Putken karheuden mukainen kaava määritetään epäyhtälöiden 3.6 - 3.8 mukaan. Epäyhtälön tuloksen ollessa alle 65, tulee laskennassa käyttää hydraulisesti sileän putken kaavoja 3.9 - 3.11. Kolmesta vaihtoehdosta kaava valitaan Reynoldsin luvun rajoituksen mukaan. Jos epäyhtälön

tulokseksi saadaan yli 1300, tulee käyttää hydraulisesti karhean putken kaavaa 3.12. Kun epäyhtälön tulos on välillä 65 - 1300, käytetään välitilan kaavaa 3.13. (6, 187.)

Karheuden vertailun epäyhtälöt

$$Re \frac{k}{d} < 65 \quad (3.6)$$

$$Re \frac{k}{d} > 1300 \quad (3.7)$$

$$65 < Re \frac{k}{d} < 1300 \quad (3.8)$$

Hydraulisesti sileän putken kaavat

$$\lambda = 0,3164 Re^{-0,25} \quad 2320 < Re < 10^5 \quad (3.9)$$

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 Re^{-0,237} \quad 10^5 < Re < 5 \cdot 10^6 \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad Re > 10^6 \quad (3.11)$$

Hydraulisesti karhea putki

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{d}{k} + 1,14 \quad (3.12)$$

Välitilan putki

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d} \cdot 0,269 \right] \quad (3.13)$$

Yhtälöt 3.11 ja 3.13 ovat työläitä ratkaista, minkä vuoksi on kehitetty kirjallisuudesta löytyviä approksimaatioita vaihtoehtoisiksi ratkaisuuksi. Jos kuitenkin yhtälöt halutaan ratkaista, on käytettävä ratkaisutapana iterointia, joka käytännössä vaatii aina tietokoneen käyttöä.

Putken karheus vaikuttaa turbulenttisen virtauksen painehäviöön. Tätä karheuden vaikutusta ei havaita laminaarisella virtauksella. Putken karheudella ei siis ole merkitystä laminaarisessa virtauksessa, toisin kuin turbulenttisessa virtauksessa, johon seinämän karheus vaikuttaa voimakkaasti. Karheuden merkitystä voidaan tarkastella Moodyn kuvaajasta, jossa karheuden ja putken halkaisijan suhdelukua kutsutaan relatiiviseksi karheudeksi (d/k). Relatiivisen karheuden ollessa suuri, on turbulenttisen virtauksen

painehäviö myös suuri. Relatiivinen karheuden vaikutus ei juuri muutu suurilla Reynoldsin arvoilla. (2, 315.)

3.5 Pienet häviöt

Putkistovirtauksessa häviöitä syntyy suoran putken lisäksi myös muissa putkiston osissa. Näitä muita häviöitä kutsutaan pieniksi häviöiksi, koska ne yleensä ovat suorien putkiosuuksien häviöitä pienempiä. Pieniä häviöitä aiheuttavat mm. virtaus putkeen ja ulos putkesta, putkiston supistukset ja laajennukset, putkiston kaarteet, t -kappaleet ja muut vastaavat putkistokomponentit sekä venttiilit, mittauslaitteet ja vastaavat laitteet. Väliaineen virtauksesta putkisovitteiden ja venttiilien sisällä tiedetään vielä vähän, koska virtauskuviot putkiston osien sisällä ovat hyvin monimutkaisia, ja teoria virtauksen käyttäytymisestä erityistapauksissa on vielä heikko. Tästä syystä painehäviöiden määrittäminen suoritetaan yleensä kokeellisesti ja mittausten perusteella luodaan kyseiselle putkiston osalle kertavastusarvo (ξ). Kertavastuksen suuruus riippuu olennaisesti virtauksen häiriön suuruudesta. Jyrkillä kaarteilla painehäviö on suurempi kuin loivilla. Säiliön sisäänvirtauksessa painehäviö on suurempi, jos putkenpää on säiliön sisällä kauluksen sijasta. Putkiston kartiosovitteessa paineenpudotus on pienempi kuin laipallisessa sovitteessa. Putkiston kertavastusarvoja löytyy monipuolisesti kirjallisuudesta. (2, 335 -340.)

Venttiileiden kohdalla painehäviö riippuu venttiilityypistä ja usein myös valmistajan venttiilikonstruktioista. Esimerkiksi osittain poratussa venttiilissä painehäviö on suurempi kuin täysiaukkoisessa. Yleisimmät venttiilityypit voidaan laittaa järjestykseen painehäviön mukaan, suurimmasta pienimpään: istukkaventtiili, läppäventtiili, luistinventtiili ja palloventtiili (8).

3.6 Laitoksen NPSH-lukema

NPSH-luku (net positive-suction head) ilmaisee pumpun imupuolen vaatiman paineen. Luku on pumppukohtainen ja ilmoitetaan nesteensiirtoon valittavan pumpun teknisissä tiedoissa. Imupuolen paineen ollessa pienempi kuin pumpun vaatima NPSH-luku pumpussa esiintyy nesteen höyrystymisen seurauksena kavitointia. Kavitointi voidaan havaita pumpun kovana käyntiääninä ja rungon värinä. Kavitoinnin aikana voidaan havaita myös pumpun paineen alenemista ja virtauksen tuoton alenemista. Laitoksen NPSH-luku voidaan määrittää:

$$NPSH = \frac{p_{i.abs}}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} \pm z_i - \frac{p_h}{\rho g} - h_{i.f}, \quad (3.14)$$

missä $p_{i.abs}$ on absoluuttinen imusäiliön paine, V_i on imusäiliön keskiverto virtausnopeus (yleensä pieni), z_i on pumpun korkeusasema imusäiliön nesteen pintaan nähden, p_h nesteen lämpötilaa vastaava höyrynpaine ja $h_{i.f}$ on imuputken painehäviö.

Kun tunnetaan pumpun NPSH-lukema, voidaan tällöin optimoida pumpun korkeusasema imusäiliöön nähden. Kun korkeusaseman etumerkki on positiivinen, on tällöin pumpu imusäiliön alapuolella. Laitoksen NPSH tarkastelussa voidaan usein jättää huomioimatta nopeuskomponentti, koska imusäiliön virtausnopeus on yleensä hyvin pieni. (6, 24 - 29.)

4 PUUKUITUSUSPENSION REOLOGIA JA PUTKISTO MITOITUS

4.1 Suspension luokittelu ja puukuitujen ominaisuudet

Paperin valmistusta varten on vuosien varrella kehitetty useita eri massalaatuja, joissa kemikaalien, mekaanisen toiminnan tai joissain tapauksissa molempien edellisten vaikutuksella saadaan puu kuituuntumaan. Kuidutusmenetelmän perusteella paperimassat jaetaan pääasiassa kahteen pääluokkaan: kemialliseen ja mekaaniseen. Nämä laadut vaikuttavat eri tavoin paperin ominaisuuksiin. Erilaiset raaka-aineen kuidutusmenetelmät onkin kehitetty muokkaamaan raaka-aineen ominaisuuksia valmistettavan paperin kannalta optimaaliseksi. Valmiin paperin rakenteeseen vaikuttavat hyvin paljon raaka-aineen puukuitujen dimensiot sekä kuitujen vesisuspension mekaaniset ominaisuudet. (9, 55.)

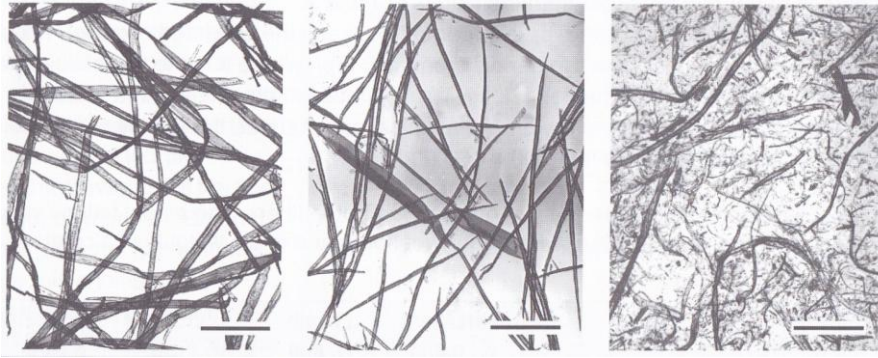
Puukuidut ovat onttoja putkia, joiden tyypillinen keskivertopituus on 1 - 3 mm ja halkaisija 15 - 30 nm. Kuitujen keskimääräinen pituus ja halkaisija voivat vaihdella saman puulajin yksilöissä. Tyypillisesti kuitujen pituus ilmoitetaan keskimääräisenä pituutena. Keskimääräisen pituuden määrittämisessä käytetään painotettua keskiarvoa painottamaan pitkien kuitujen osuutta. (10, 3461.)

Kuitupituus on yksi kuitususpension tärkeimmistä ominaisuuksista. Pitkät kuidut pystyvät muodostamaan lyhyitä kuituja enemmän mekaanisia sidoksia muiden kuitujen kanssa ja täten pystyvät muodostamaan vahvemman kuituverkoston. Pohjoiseurooppa-

laisen männyn kuitupituus voi olla 3,6 mm, kun lehtipuilla kuten koivulla kuitupituus on lyhyempi, 1,3 mm. (9, 59.)

Puukuitujen ominaisuudet vaihtelevat ja riippuvat monista eri tekijöistä, kuten puulajista ja edeltävästä käsittelystä. Kuitujen pituus ja halkaisija vaihtelevat paljon eri puulajeittain. Kuitenkin pääsääntöisesti lehtipuut omaavat huomattavasti lyhyemmän kuitupituuden kuin havupuut. (3, 6.)

Puulajikkeen lisäksi merkittävä osuutensa kuitususpension ominaisuuksiin on puun kuidutuksella, valkaisulla ja jauhatuksella. Kuidutusprosessi ja muu kuidutuksen jälkeinen prosessointi synnyttää suspension kuiturakenteeseen merkittäviä eroja. Massa- laatuojen kuitujen välisiä eroja nähdään selvästi kuvasta 6. Kuvassa vasemmalla on kaksi eri kraft-massaa, joiden kuidutus tapahtuu keittämällä puuhaketta alkalipitoisessa liuoksessa. Kuvan oikeassa reunassa on termomekaaninen massa, joka on kuidutettu hiertämällä puuta. Mekaanisella massalla toinen yleinen kuidutustapa on puun hionnin kiveä vasten. Kemiallisen ja mekaanisen massan täysin toisistaan poikkeavat kuidutustavat tekevät puukuitususpension ominaisuuksista hyvin erilaiset. Esimerkiksi mekaaninen massa voi sisältää jopa noin kolmasosan ligniiniä, kun valkaistulla kemiallisella massalla ligniinipitoisuus on lähes olematon. Pieni ligniinipitoisuus antaa kraft-vesikuitususpension kuiduille mm. paremman elastisuuden ja turpoamiskyvyn verrattuna ligniinipitoiseen mekaaniseen massaan. Mekaaninen massa sisältää huomattavan määrän kuidun palasia ja hienoainesta, joiden vaikutus kuiturakenteeseen ja verkoston ominaisuuksiin on huomattava. Hienoainespitoisuus riippuu täysin suspension kuidutuksesta ja suspension lopullisesta freeness-arvosta. Mekaanisten massojen valmistusmenetelmien välillä on tässä suhteessa eroja. Esimerkiksi puun kivihionnassa syntyy huomattavasti enemmän hienoainesta kuin termomekaanisella hiertämisellä. Kemiallisella massalla hienoainespitoisuus on huomattavasti matalampi kuin mekaanisella massalla. Kuitenkin kemiallisen massan laadun optimointi jauhatuksella kasvattaa suspension hienoainespitoisuutta. Puun kuidutusmenetelmällä on merkittävä vaikutus kuidun pituusjakaumaan. Kemiallisesti valmistetuilla kuiduilla pituusjakauma poikkeaa mekaanisesti valmistetuista. Esimerkiksi kemiallisen massan painosuudesta voi jopa 90 % olla peräisin pitkistä kuiduista, kun kivihiotulla mekaanisella massalla vain 20 %. (9, 59 - 63.)



Kuva 6. Kuvassa vasemmalta oikealle jauhamattomat kraft -massat kuusesta ja koi-
vusta sekä termomekaaninen kuusimassa. Viivan pituus kuvan alareunassa on 400 μm .
(9, 60.)

4.2 Puukuitususpensiolle sovellettava materiaalimalli

Puukuitususpensio omaksutaan yleensä homogeeniseksi epänewtoniseksi nesteeksi (5, 74). Käytännössä kuitenkin kuitususpensio ei koskaan ole homogeeninen neste. Suspension sakeuden ollessa tarpeeksi suuri yksittäiset kuidut kietoutuvat toisiinsa ja muodostavat suspensioon flokkeja. Flokit voivat esiintyä virtauksessa yksittäisinä tai massakonsentraationa kuituverkostossa. Suspension kuidut ja flokit voivat olla myös suhteellisen suuria verrattuna virtauskanavan kokoon, minkä vuoksi puukuitususpension virtausta ei voida pitää kontinuumivirtauksena (11, 604). Kuitususpensioon sovelletaan kuitenkin epänewtonisille homogeenisille materiaaleille tarkoitettuja malleja, kuten leikkausohenevaa, saostuvaa sekä Bigham-plastista materiaalimallia (5, 74). Yleisimmät reologiset mallit kuitenkin perustuvat mallinnettavan nesteen kontinuumioletukselle (1, 5). Huhtanen (1, 5) perustelee kuitususpension kontinuumioletusta kuitususpension pohjana olevan veden tai höyryn tilan jatkuvuudella, ja suspension sisältämät kuidut täten vain muokkaavat nesteen jatkuvan tilan mekanismia. Myreen (12, 499) puolestaan oikeuttaa pseudoplastisen mallinsa toteamalla grammassa kuitususpensiota olevan noin miljoona kuitua, minkä vuoksi kuitususpensiota voidaan pitää homogeenisena. Duffy (13) on osoittanut kuitususpension käyttäytyvän erityistapauksessa homogeenisesti. Tutkimuksessa havaittiin kantajanesteen viskositeetin vaikuttavan virtaavan suspension homogeenisuuteen. Duffy havaitsi viskositeetin kasvun saavan kuitususpension käyttäytymään homogeenisen nesteen tavoin. Viskositeetin muuttamisen havaittiin vaikuttavan mm. painehäviön suuruuteen.

Duffyn mukaan puukuitususpensiota ei voida luokitella newtoniseksi tai epänewtoniseksi nesteeksi. Hänen mukaansa kuitususpensio tulisi luokitella omaksi nesteluokak-

seen. Perinteinen nesteen virtausmekaniikka ja epänewtoniset mallit eivät siis päde kuitususpension virtauksen mallinnuksessa, vaan on kehitettävä virtausmekanismien ymmärtämisen pohjalta todenmukaisia virtausmalleja. Mallinnuksessa on tärkeää ottaa huomioon virtaavan suspension kuiturakenne, tila, virtausolosuhteet ja virtauskanavan koko. Prosessiolosuhteiden huomioimisen tärkeys johtuu virtauksen erityisestä mekaniikasta. Kuitujen virtausominaisuuksien seurauksena painehäviö voi olla pienempi karheassa putkessa kuin sileässä putkessa. Pienissä putkissa, joiden $D < 8$ mm, voi virtauksen painehäviö olla virtausnopeudesta riippumatta yhtä suuri kuin vedellä, vaikka suuremmassa putkessa sama kuitususpensio aiheuttaisi vettä suuremman painehäviön. Edellisten esimerkkien valossa voidaan sanoa puukuitususpension selvästi eroavan perinteisistä partikkelislurreista. Puukuitususpension virtauksessa kuidut ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa, yhdistyvät ja kehittävät suspensioon mekaanisen rakenteen. Epähomogeeniset suspension rakenteet aikaansaavat virtauksessa ilmiöitä, joita ei havaita perinteisillä homogeenisillä virtauksilla. (14, 2 - 7.)

4.3 Puukuituvirtaus

Puukuitususpension virtausfysiikkaa hallitsee kuitujen ominaisuus takertua toisiinsa ja muodostaa verkostovirtauksia. Kuitususpensio muodostuu neljästä eri homogeenisesta osasta: kuidusta, flokin esiasteesta, flokista ja verkostosta, joista jokaisella on omat erityispiirteensä. Alhaisella sakeudella kuidut esiintyvät suspensiossa yksittäisinä ja seuraavat hiukkasen tavoin virtausta. Turbulenttisessa virtauksessa kuidut ovat kosketuksessa usean pienen vesipyörteen kanssa yhtäaikaaisesti. Näin ne pystyvät siirtämään liikemäärää ja taipumaan virtauksen vaikutuksesta sekä absorboimaan turbulenttisten pyörteiden energiaa. Duffyn mukaan suspensiolla on edellisistä syistä johtuen pienempi turbulenttisen virtauksen painehäviö kuin vedellä. Sakeuden kasvu saa kuidut takertumaan toisiinsa, koska kuitujen lukumäärän lisääntymisen vaikutuksesta yksittäisten kuitujen liike suspensiossa vaikeutuu. Kuidut muodostavat tällöin pieniä epävakaita kasautumia, flokkien esiasteita. Kuitujen kasautuminen muodostaakin uuden mekanismin virtaukselle. Muodostuneet flokkien esiasteet kehittyvät flokeiksi vain pienellä sakeuden nousulla ja muodostavat mekaanisen rakenteen suspensiolle. Flokkien kuitujen mekaaninen rakenne antaa flokeille erityiset kimmo-plastiset ominaisuudet. (14, 1.)

Kuituvirtauksen huomattavimpia ominaisuuksia onkin kuitujen taipumus muodostaa suuria kasautumia, joita puukuitususpensiossa kutsutaan flokeiksi eli kuitukimpuiksi. Flokkien koko voi vaihdella paljon. Flokkien halkaisijan voidaan kuitenkin sanoa vaihtelevan välillä 3 - 30 mm. Flokit eivät ole yksittäinen ja tietyllä sakeudella esiintyvä ilmiö, vaan käytännössä flokkeja esiintyy kaikilla sakeusalueilla, jotka ovat relevantteja massa- ja paperiteollisuudessa. (3, 7.)

Puukuitususpension flokkien muodostus alkaa, kun $C > 0,5$ %. Flokit ovat hallitseva kuitujen olomuoto monissa käytännön sovelluksissa ja prosesseissa. Teollisuudessa käytettävät putkistot ovat tarpeeksi suuria flokkien esiintymiseen rinnakkain. Flokkien koko vaihtelee, mutta koon keskiarvo riippuu kuitutyypistä ja kuidun ominaisuuksista. (14, 1 - 7.)

Suurin virtauksessa esiintyvä suspension olomuoto on kuituverkosto. Verkosto muodostuu toisiinsa kiinnittyneistä flokeista. Verkoston muodostuminen vahvistaa entisestään suspension lujuusominaisuuksia. Virtauksen muodostumiseksi on verkostoon synnyttävä riittävän suuri leikkaava voima, joka dispersoi kuituverkoston ja saa aikaan virtauksen kuitususpensiossa. Verkosto muodostuu tyypillisesti säiliöiden pohjalla tai putkiin alhaisella virtausnopeudella. On olemassa monia tilanteita, jossa kaikki neljä kuitususpension rakennetta voivat esiintyä yhtaikaisesti, jolloin kuiturakenteiden yksittäiset vaikutukset johtavat hyvin tärkeään käyttäytymismekanismiin, joka havaitaan painehäviökäyrässä vettä pienempänä painehäviönä. (14, 1 - 7.)

Kuitususpensio on matalalla sakeudella kahden faasin slurri. Kuitususpensio koostuu matalalla sakeudella vedestä ja kuiduista (15, 2). Keskisakeudella kuitususpensio on kuitenkin kolmen faasin heterogeeninen slurri, koska veden ja kuitujen lisäksi suspensiossa esiintyy ilmaa kuplamaisena tai suspensioon sitoutuneena (16, 13). Matalan sakeuden suspensiolla suspension sakeutta kuvataan usein kiintoaineen massatilavuutena. Kuitenkin korkean sakeuden suspensiossa esiintyy huomattavissa määrin ilmaa sitoutuneena tai vapaana, minkä vuoksi suspension sakeuden kuvaamisessa on hyödyllisempää käyttää tilavuussakeutta (C_v) (15, 2).

$$C_v = C_m \left(\frac{1}{\rho_k} + \frac{x_v}{\rho_v} + V_L \right) \rho_b, \quad (4.1)$$

missä C_m on kuitujen massallinen sakeus, ρ_k on kuitujen tiheys, X on kuituihin imeytynyt vesi ($kg\ vettä / kg\ kuitu$), ρ_v on veden tiheys, V_L on lumenin rajaavan tyhjän putkimaisen reiän tilavuus massayksikköä kohden ($m^3 / kg\ kuitu$) ja ρ_b on bulkin tiheys.

4.4 Kuitujen kosketusvoimat

Paperiteollisuudessa käytetään laajaa puukuitususpension sakeusalueetta. Puukuitujen reologiset ominaisuudet vaihtelevat paljon koko käytettävällä sakeusalueella (11, 598). Putkisto- ja prosessilaitesuunnittelijan on hyvä tuntea kuitujen reologiaa, koska se vaikuttaa merkittävästi kuitususpension virtaukseen ja virtauksen synnyttämiin painehäviöihin. On tärkeää tiedostaa kuitujen taipumus muodostaa paikallisia massakonsentraatioita eli flokkeja (11, 598). Puukuitujen suuri poikkipintasuhde, 40 - 100, on merkittävä kuitujen kontakteja synnyttävä tekijä (15, 3). Kuitujen pituudella on vahva vaikutus suspension flokkien kokoon ja kuitujen raekolla on puolestaan vaikutus flokkien vahvuuteen (17, 38). Sakeuden kasvattaminen aikaansaa yksittäisten kuitujen yhteen kietoutumista, kunnes ne lopulta muodostavat kiinteän kuituverkoston (15, 3). Alhaisella sakeudella kuidut virtaavat suspensiossa ajoittain törmäten toisiinsa, kunnes sakeuden nostaminen pakottaa kuidut kosketuksiin toisiensa kanssa. Kuitujen määrän kuvaamiseen on kehitetty ns. ahtautumisnumero (crowding factor, N) (17, 33). Ahtautumisnumero kuvaa kuitujen lukumäärää pallon muotoisessa tilavuudessa, jonka halkaisija on yksi kuidun pituus. Ahtautumisnumero on kuitujen flokkiintumista kuvaava suure (17, 32).

Ahtautumisnumero voidaan ratkaista yhtälöstä:

$$N = \frac{2}{3} C_v \left(\frac{L_k}{D} \right)^2 = \frac{5C_m L_k^2}{\omega}, \quad (4.2)$$

missä C_v on suspension kuitujen tilavuudellinen sakeus, L_k on kuidunpituus, D on kuidun halkaisija, C_m on suspension kuitujen massallinen sakeus ja ω on kuidun raekoko (17, 33).

Kuituverkosto sisältää satunnaisesti jakautuneita homogeenisiä kuituja. Verkoston ollessa homogeeninen voidaan ahtautumisnumeron osoittaa olevan suoraan sidoksissa kuitujen välisiin kontakteihin (n),

$$N \cong \frac{4\pi n^3}{3(n-1)} \quad n \gg 1 \quad (4.3)$$

Suspension kuitujen liikkuvuus ja homogeeninen jakautuneisuus vaihtelevat suuresti ahtaumisnumeron arvoilla $1 \leq N \leq 130$. Kun $N < 1$ kuidut ovat vapaita liikkumaan toistansa suhteen translaatiossa. Tällöin kuidut voivat ajoittain törmätä toisiinsa ja kiinnittyä pysyvästi. Ahtaumisnumeron kasvu saa kuitujen törmäysten määrän kasvamaan ja tarpeeksi suurella arvolla kuidut törmäyvät toisiinsa translaation lisäksi rotaation kautta. (17, 32 - 33.)

Ahtaumisnumerolla $N = 60$ kuiduilla on kolme kosketuspistettä ($n_c = 3$), jolloin kuitujen rotaatioliike toistensa suhteen estyy. $N = 60$ on flokkien mekaanisen vahvuuden syntymisen raja-arvo, jos $N < 60$ flokit ovat löysiä kuitujen kasautumia (15, 4). Välillä $60 < N < 130$ kuitujen liikkuvuus kuitenkin vähenee merkittävästi, jolloin suspension flokit saavuttava mekaanisen vahvuuden (17, 38).

Martinez ym. ovat työssään *Characterizing the mobility of papermaking fibres during sedimentation (2001)* todenneet ahtaumisnumeron $N = 16$ olevan kriittinen suspensiolle. Ahtaumisnumeron ollessa alle arvon $N = 16$ suspensio käyttäytyy laimean nesteen tavoin ja arvon ollessa kriittistä arvoa korkeampi kuitujen välillä on vuorovai-
kutusta, mutta ne eivät ole vielä muodostaneet kestäviä mekaanisia sidoksia. (11, 599.)

Celzard ym. (18, 1) luonnehtivat arvon $N = 16$ olevan kytkeytyvyyden raja-arvo, jonka jälkeen kuitujen törmäilyt toisiinsa alkavat. Celzard ym. vahvistavat arvon $N = 60$ suspension flokkien jäykkyyden raja-arvoksi, jonka jälkeen flokit muodostavat mekaanisen vahvuuden.

Flokkiintumista tapahtuu mm. virtauksen muutoksen vaikutuksesta. Yleisin tapaus on vähenevä turbulenssi. Turbulenssia sovelletaan paperikoneen perälaatikossa hajottamaan kuitususpension kuituverkosto. Turbulenttisen tilan jälkeen suspension flokkiintuminen tapahtuu nopeasti, kun virtauksessa esiintyvä pyörteily lakkaa. (11, 602.)

Kuitujen toisiinsa kiinnittyminen tapahtuu mm. kuitujen välisillä mekaanisilla sidoksilla. Mekaanisia sidoksia muodostuu ainakin kahdella mekaanisilla voimia synnyttävällä tavalla. Ensimmäinen näistä on kiertyneiden ja sykkyräisten kuitujen toisiinsa

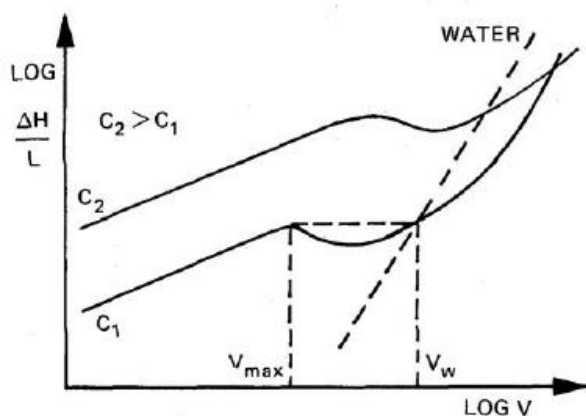
kiinnittyminen, jota edesauttaa mm. kuitujen fibrilloitunut pintarakenne. Tässä kiinnittymistavassa kuidut törmäävät toisiinsa ja takertuvat toisiinsa muodoistansa johtuen. Kuituja pitää paikallaan niiden välille kiinnittymisestä syntyvä kitkavoima. Kuitujen takertumiskiinnittymistä esiintyy erityisen paljon fibrilloituneilla kuiduilla. Kuitujen toisiinsa takertuminen onkin tärkein laimean seoksen kiinnittymismekanismi. Laimealla seoksella kuidut pääsevät herkästi virtaamaan toistensa ohitse, ja ilman takertumista flokkeja ei ala muodostua. Toinen kuitujen välisten sidosten muodostumistapa on kuitujen taipuessa niiden välille syntyvä kitka. Kitkavoimat syntyvät kuitujen välisistä normaalivoimista, jotka syntyvät kuitujen taipumisen seurauksena. Kuituverkoston kuitujen taipuminen on mahdollista, kun kuidut ovat muodostaneet ainakin kolme kontaktia toistensa kanssa. Kuitujen taipumista ei siis esiinny laimeilla seoksilla. (11, 600.)

4.5 Kuituverkoston fluidisaatio

Fluidisaatio on suspension tila, jossa suspension pienet flokit pystyvät liikkumaan toistensa suhteen. Fluidisoitunut kuitususpensio käyttäytyy nesteen tavoin ja tämä mahdollistaa keskisakean massan pumppaamisen keskipakopumpulla syrjäytyspumppun sijaan. Suspension fluidisoimiseksi leikkausvoiman on ylitettävä suspension rajajännitys kauttaaltaan. Vaadittavan rajajännityksen ylittäminen on mahdollista ainoastaan, kun suspensio on turbulenttisisä tilassa. Fluidisointi tapahtuu siis turbulentilla virtausalueella, jolloin irronneet flokit liikkuvat turbulenttisen virtauksen mukaisesti. Verkon hajottamiseen vaadittava leikkausjännitys (τ_d) kasvaa eksponentiaalisesti sakeuden kasvaessa. (19, 495 - 496.)

4.6 Puukuitususpension painehäviö

Puukuitususpension painehäviökuvaajan on lukuisissa tutkimuksissa todettu kemiallisilla massoilla noudattavan ”S” -muotoa. Painehäviö esitetään usein symbolilla $\Delta H/L$, joka tarkoittaa painehäviötä (ΔH) vesipatsasmetreiksi muunnettuna putken pituusyksikköä (L) kohden. Painehäviö esitetään virtausnopeuden (V) tai tilavuusvirtauksen (Q) funktiona. Kuvaajaan on usein muunnettu logaritmiseksi.



Kuva 7. Painehäviö virtausnopeuden funktiona. (20, 3.)

Tutkimalla kuitususpension virtausta on havaittu kuitujen virtaukselle neljä toisistaan poikkeavaa virtausaluetta. Pienellä virtausnopeudella virtausta luonnehditaan tulppavirtaukseksi. Kuvaajassa 7 piste V_{max} kuvaa suurinta virtausnopeutta jolloin tulppavirtaus esiintyy. Tulppavirtausalueella painehäviö kasvaa voimakkaasti virtauksen suurentuessa. Kuitususpension levätessä paikallaan putken seinämää vasten on suspension liikkeelle saamiseksi voitettava suspension ja putken välinen kitkavoima. Putken seinämän kitkavoima (F_f) on suorassa suhteessa seinämän leikkausjännitykseen (τ_w), eli leikkausjännityksen kasvaessa kasvaa myös putken seinämän kitkavoima. (4, 16.)

Virtauksen aikaansaavaa kriittistä leikkausjännitystä (τ_c) ilmaistaan usein myös suspension myötöjännityksenä (τ_y). Kriittinen leikkausjännitys kuvaa putken seinämän ja nesteen välistä vuorovaikutusta. Nesteen sisäinen leikkausjännitys poikkeaa tulpan pinnalta mitattavasta kriittisestä leikkausjännityksestä. Suspension myötöjännityksen mittaamiseen käytetään reologisia mittaumenetelmiä. Tosin on olemassa tapauksia, joissa reologinen mittaus ei ole mahdollinen. Tällöin voidaan suspension myötöjännityksenä pitää kriittisen leikkausjännityksen arvoa, koska todellisuudessa jännitysten välinen ero ei ole suuri. (4, 16.)

Tulppavirtauksessa suspensio virtaa putkessa kiinteän tulpan tavoin. Massatulpan ulkopinnalta kuidut pistävät ulos raapien putken sisäpintaa. Kuitujen hankaaminen putken sisäpintaan aiheuttaa kuitujen irtoamista massatulpasta. Tulpasta irronneet kuidut eivät virtaa vapaasti putkessa, vaan kiinnittyvät lopulta takaisin tulppaan. Tulpasta irronneiden kuitujen liikettä tulpan ja putkiseinämän välillä voidaan verrata liukulaakerin rulliin. (21, 112.)

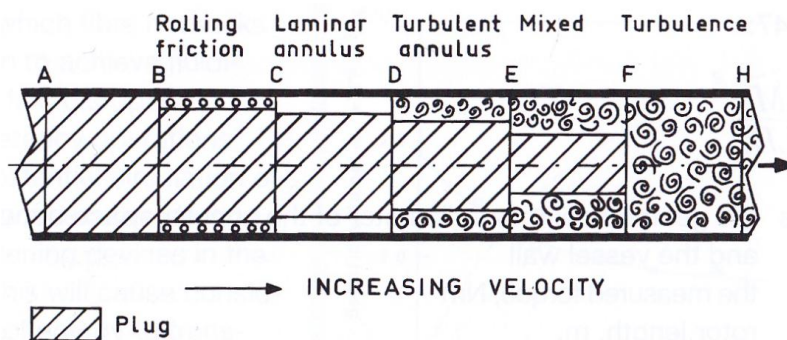
Painehäviön suuruuteen vaikuttaa monia eri tekijöitä, joista yhdeksi voidaan tunnistaa kuitujen poikkeavuus toisistaan. Tämä voidaan havaita painehäviökuvaajan muodosta, joka ei ole täysin yhtenevä kaikilla massalaaduilla. Painehäviökuvaajalta voi puuttua pisteestä V_{max} jyrkkä muutos, joka on ominainen kemiallisille massoille. Loiva kuvaajan muoto pisteessä V_{max} voidaan havaita lyhytkuituisella massalla ja mekaanisella massalla. (22, 2.)

Virtausnopeuden edelleen kasvaessa kuvan 7 pisteen V_{max} jälkeiselle alueelle muodostuu massatulpan ja putken väliseen rajakerrokseen vesikerros. Vesikerros syntyy hydrodynaamisen nostovoiman vaikutuksesta, joka työntää kuituja kohti putken keskiötä. Virtauksen kasvaminen suurentaa kuituihin vaikuttavaa hydrodynaamista voimaa, ja lopulta syntyy kuiduista vapaa vesikerros, jota kutsutaan usein myös vesirenkaaksi tai voitelukerrokseksi. Virtauksen luonne vesirenkaassa on laminaarinen. Laminaarinen vesikerros toimii voiteluaineen tavoin, mikä aikaansaa painehäviön laskemisen. (4, 16.)

Painehäviökuvaajan matalimman painehäviön arvon jälkeen esiintyvää aluetta kutsutaan siirtymävirtauksen alueeksi. Siirtymävirtauksen alueella havaitaan virtauksessa turbulentsuutta, joka vesikerroksessa esiintyy veden epävakaana pyörteilynä. Turbulentti vesikerros paksunee massatulpan samalla pienentyessä. Pisteessä V_w painehäviö on yhtä suuri kuin vedellä. Vesikäyrän leikkauksen jälkeen suspensio ei välittömästi fluidisoidu vaan virtaus on vielä siirtymäalueella. Virtausnopeuden on vielä nouseva, jotta täysin kehittynyt turbulenti virtaus syntyisi putkeen. Kuitususpension painehäviö on pienempi kuin vedellä heti vesikäyrän leikkauksen jälkeisellä virtausalueella, vaikka suspension näennäinen viskositeetti on suurempi kuin veden. (22, 2.)

Yleinen selitys kuitususpension painehäviön pienemmälle arvolle vesikäyrän leikkauksen jälkeisellä alueella, on ollut kuitujen veden pieniä pyörteitä vähentävä vaikutus (5, 2.). Jäsberg (23, 120 - 121) selittää pienemmän arvon johtuvan suspension virtauksessa esiintyvistä myötökerroksesta. Turbulenssin voimakkuus vähenee myötökerroksen kuitujen vaikutuksesta. Puhtaalla vedellä liikemäärän siirto veden pyörteilyn välityksellä on tehokasta, ja se kulutetaan myös tehokkaasti putken seinämän leikkausjännityksen kautta. Puukuitususpension tapauksessa liikemäärän siirto putken keskiosan tulpasta putken seinämälle vähenee myötökerroksen vaikutuksesta. Myötökerroksen olemassaoloa voidaan pitää pääsyynä virtauksen alhaisempaan painehäviöön.

Kuvassa 8 on graafinen esitys virtauksen kehittymisestä putken sisällä. Kuva havainnollistaa suspension virtauksen kehitystä koko putken alan täyttävästä tulpasta veden kaltaiseen fluidisoituneeseen tilaan. Aikaisemmissa kappaleissa käsiteltiin painehäviön neljää osa-alueetta, vaikka kuvassa niitä esitetään viisi. Virtauksen siirtymäalueen tapauksessa turbulenttinen vesikerros voidaan mielestäni sisällyttää siirtymäalueen käsitteeseen, koska virtauksessa turbulenttisella vesikerroksella esiintyy pyörteilyä.



Kuva 8. Suspension virtausalueet. (20, 497.)

4.7 Massalaadun ja putkiston vaikutus painehäviöön

Putkistoja suunniteltaessa on harvoin käytettävissä tarkkaa tietoa massalaadusta tai väliaineen virtaustilasta. Tällaisessa tilanteessa joudutaan usein tyytymään samankaltaisen laadun painehäviötietoihin ja huomioimaan korjauskertoimen avulla vertailukohdan poikkeavuudet. (22, 3.)

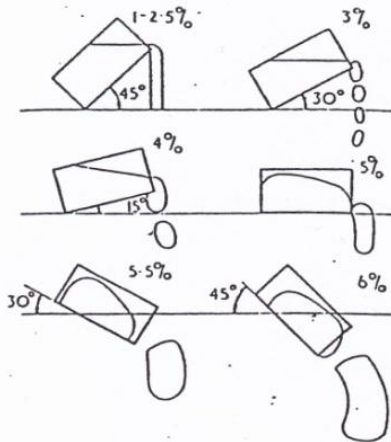
Painehäviöiden mitoitus on perinteisesti tehty tulppavirtauksen painehäviöiden avulla, koska tulppavirtausta seuraavien alueiden mallinnukselle ei ole ollut olemassa riittävä matemaattista pohjaa. Esimerkiksi Ahlströmin käsikirja suosittelee mitoitusmenetelmää tulppavirtauksen jälkeisille alueille ennen massan fluidisoitumista (16, 36). Jos mitoitus tehdään Ahlströmin käsikirjan mukaan, on pystyttävä selvittämään tulppavirtauksen suurin painehäviö. Suurinta painehäviötä voidaan pitää riittävän varmuuden päässä olevana likiarvona tulppavirtauksen jälkeisten virtausalueiden putken mitoitukselle. Menetelmä antaa todellisuutta suuremman painehäviön mutta tuo samalla varmuutta mitoitukselle.

Massavirtauksia on mallinnettu jo lähes vuosisata eikä edelleenkään ole pystytty tarkasti selvittämään kuituvirtauksen mekaniikkaa, vaan saatavissa olevat painehäviötiedot ja virtausmallit perustuvat empiirisesti tutkittuihin painehäviöihin. Tutkimusten

perusteella on kuitenkin pystytty tunnistamaan painehäviön syntyvän mm. seuraavien tekijöiden yhteisvaikutuksesta: massan sakeus, virtausnopeus, putken pinnan karheus, lisäaineet, kuitujen rakenne, kuituverkosto, lämpötila, ilmapitoisuus ja pH (16, 13).

4.7.1 Sakeuden vaikutus

Painehäviökuvaajia voidaan tarkastella mm. Duffyn, Mollerin ja Ahlströmin teoksista (24, 25, 16), joista etenkin kaksi ensimmäistä sisältävät huomattavan määrän yksityiskohtaisia painehäviökuvaajia eri massalaaduille. Ahlströmin käsikirjan kuvaajat ovat valmiita mitoituksukuvaajia, kun Duffyn ja Mollerin kuvaajat ovat enemmänkin perusteluja töissä kehitetyille painehäviömalleille. Näiden painehäviökuvaajien tarkastelun perusteella voidaan todeta suspension sakeuden olevan merkittävin painehäviöön vaikuttavista tekijöistä, koska painehäviö on sitä suurempi, mitä suurempi on sakeus. Kuva 9 havainnollistaa sakeuden muutoksen merkitystä. Suspensio on matalalla sakeudella vielä melko veden kaltaista, mutta sakeuden nousu saa suspension muuttumaan melko kiinteäksi. Kuvan perusteella 5,5 % sakeudessa suspension on jo muodostanut suurikokoisen kuituverkoston, jonka kehitys jatkuu edelleen sakeuden noustessa. Sakeutta 5,5 % voidaan kuvan perusteella pitää keskisakean suspension sakeusalueen alkuna.



Kuva 9. Sakeuden vaikutus suspension virtausominaisuuksiin. (16, 14.)

4.7.2 Virtausnopeuden vaikutus

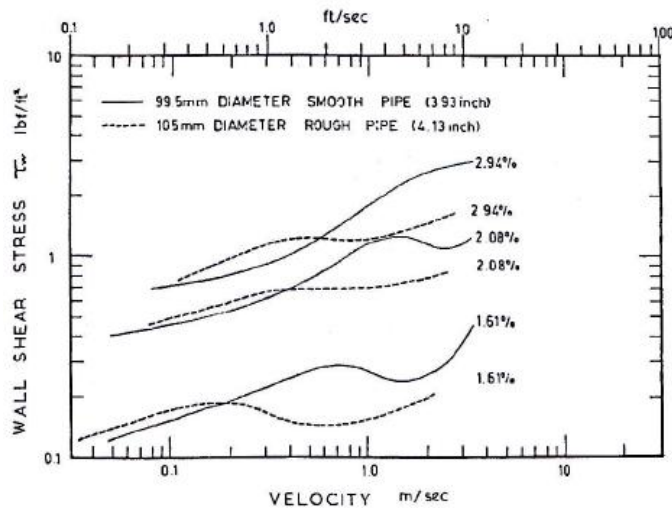
Suspension virtausnopeudella on merkittävä vaikutus painehäviön suuruuteen. Tämä voidaan havaita kaikista painehäviökuvaajista, joissa painehäviö esitetään virtausnopeuden funktiona (kuva 7). Painehäviö kasvaa pienellä virtausnopeudella voimakkaas-

ti, kunnes saavuttaa kriittisen pisteen, jolloin painehäviö alkaa pienetä ja edelleen minimiarvonsa jälkeen kasvamaan. Kuvaajan minimi- ja maksimipisteet kuvaavat virtauksen olomuodon vaihtumista toiseksi. Kuvatun tapainen käyttäytyminen on ominaista kemialliselle massalle (24, 82). Putkistosuunnittelun kannalta kuvaajan muodolla ei välttämättä ole juurikaan merkitystä, jos mitoitus tehdään tulppavirtausalueelle.

4.7.3 Putkikoon ja putken karheuden vaikutus

Yksi painehäviöön vaikuttava tekijä on putkikoko. Tämä voidaan parhaiten havaita Ahlströmin käsikirjan (16, 38 - 46) kuvaajista. Vertailemalla näitä kuvaajia toisiinsa tulppavirtauksen suurimmalla painehäviöllä voidaan havaita painehäviön pienenevän putkikoon suuretsa.

Duffy (24, 155) on tutkinut putken karheuden vaikutusta painehäviöön. Duffy havaitsi tulppavirtausalueella karhean putken aikaansaavan sileää putkea korkeamman painehäviön alhaisella virtausnopeudella. Kuitenkaan painehäviö ei jäänyt pysyvästi korkeammaksi, vaan karhean putken painehäviökäyrä leikkasi sileän putken käyrän ennen tulppavirtauksen painehäviön suurinta arvoa ja täten karhealle putkelle syntyi korkeammilla virtausnopeuksilla pienempi painehäviö. Karheuden vaikutus eri sakeuksilla voidaan tarkastella kuvasta 10. Myöhemmin Duffy (14, 7) on selittänyt suurimman häviön pisteen siirtymisen kuitutulpan flokkien ns. hyppimisellä karheushuipulta toiselle. Ilmiö johtuu vesikerroksen synnystä karheushuippujen välisiin syvänteisiin, joissa vesikerros toimii ns. voitelukerroksena, minkä seurauksena virtausvastus pienenee. Painehäviö pysyy karheassa putkessa alentuneena aina turbulenssin syntymiseen saakka. Duffyn (14, 7) mukaan painehäviö voi olla karheassa putkessa jopa 50 % pienempi kuin sileässä putkessa.



Kuva 10. Putkiston karheuden vaikutus painehäviöön. (26, 332.)

4.7.4 Massalaadun ja prosessoinnin vaikutus painehäviöön

Kaksi kokonaisvaltaisesti painehäviöön vaikuttavista tekijöistä ovat massalaatu ja edeltävä prosessointi. Massalaadun ja prosessoinnin merkitys nähdään Duffyn (24, 82 -107) ja Mollerin painehäviökuvaajissa (25, 92 - 111). Pääasiallisesti massalaadun ja prosessoinnin suurimmat vaikutukset painehäviöön näkyvät vasta tulppavirtauksen jälkeen, mutta niiden vaikutus painehäviöön alkaa kuitenkin jo tulppavirtauksessa.

Duffyn tutkiman mänty kraft-massan painehäviökuvaajan sakeuskäyrät kahden tuuman putkessa ovat sakeudesta riippumatta muodoltaan hyvin samankaltaiset. Painehäviöt ovat lähes identtiset läpi matalan sakeusalueen. Kun samainen kraft-massa jauheetaan, huomataan sakeuden kasvun hillitsevän kuvaajan keskiosan painehäviön laskua. Yli 4 % sakeudessa ei tapahdu kemialliselle massalle tyypillistä painehäviön laskua lainkaan, vaan painehäviökuvaaja vastaa Mollerin mekaanisten massojen jatkuvasti kasvavan käyrän muotoa. Syy massalaadun kuvatuun kaltaiseen käyttäytymiseen on jauhatuksessa tapahtuva kuitujen fibrillaatio, joka vaikuttaa kuituverkoston rakentamiseen (24, 155). Moller on selittänyt kuvaajan keskiosan tasaisen alueen johtuvan kuitujen ja kuitujen palasten pääsystä syntyvään vesikalvoon (25, 121). Duffy havaitsi jauhetun massan tulppavirtauksella 8 % suuremman painehäviön kuin jauhamattomalla laadulla (24, 155). Merkittävin ero laatujen välillä on kuitenkin tulppavirtausalueen suurimman painehäviön arvon huomattava aikaistuminen (24, 121).

Duffy on tutkinut valkaisuomattoman laadun lisäksi myös valkaisuomattua kraft-massaa, jota voidaan pitää kemiallisena kierrätyskuituna, koska kuidut olivat kertaalleen kuivattu ja

muotoiltu selluarkeiksi (24, 120). Valkaistulla laadulla havaittiin jauhettua laatua vastaava painehäviökuvaajan keskiosan muutos laskevasta käyrästä nousevaksi käyräksi sakeuden kasvaessa tarpeeksi suureksi. Yli 2,5 % sakeudessa tutkimuksen putkissa ei havaittu painehäviön laskua, vaan painehäviö pysyi alkuosan suurimman arvon suuruisena, kunnes se turbulenssin vaikutuksesta kasvoi jälleen. Duffyn mukaan kuvatus kaltainen painehäviön käyttäytyminen johtui luultavasti kuivaamisesta, jossa kuidut rutistuivat ja sen seurauksena kuituverkoston lujuus laski (24, 120). Valkaisun ja kuivauksen yhteisvaikutus sai painehäviön laskemaan koko kuvaajan matkalla ja tulppavirtauksen suurimman painehäviön arvon aikaistumaan (24, 121).

Mekaanisella massalla Moller ja Duffy ovat havainneet, että sen painehäviökuvaajasta puuttuu kemiallisen massan laskevan painehäviön alue. Mekaanisen massan painehäviökäyrä on jatkuvasti nouseva ja kemialliselle massalle tyypillinen tulppavirtauksen suurin painehäviön arvo on havaittavissa vain kuvaajan nousun taittumisenä. Mekaanisella massalla voidaan todeta olevan kuvaajan keskivaiheilla melkein tasainen osuus tai lievästi nouseva osuus. Moller selittää tasaisen osuuden johtuvan vesikerroksen sisältämistä kuiduista ja kuidunpalasista, jotka kasvattavat vesikerroksessa vallitsevaa viskositeettia (25, 121). Kuvaajan tasaisen osuuden alku vastaa suurin piirtein kemiallisen massan painehäviön suurinta arvoa ja se esiintyy alhaisemmalla virtausnopeudella, mikä johtuu kuituverkoston heikommasta ja joustavammasta rakenteesta (25, 121).

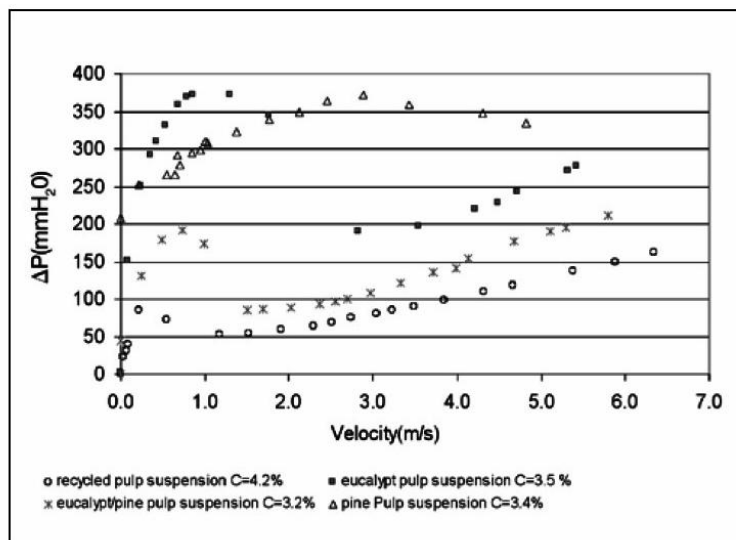
Moller tutki mekaanisen massan lisäksi kanadalaisen koivu kraft-massan painehäviöitä. Koivu kraft-massan kuvaajista voidaan havaita kemiallisen massan tyypillinen käyttäytyminen (25, 92 - 111). Koivun painehäviökuvaajat ovat identtisiä kraftmännyn kanssa, mutta tarkkaa vertailua ei voida tehdä, koska koivun kuituverkosto on muuttunut kuivauksen vaikutuksesta. Painehäviöiden vertailu kuitenkin antaa koivulle huomattavasti pienemmän häviön, minkä perusteella voidaan todeta lyhytkuituisella suspensiolla olevan pitkäkuituista pienempi painehäviö.

Venturan ym. (27) tutkimuksesta saadaan vahvistusta kemiallisten massojen kuitupi-tuuden vaikutuksesta painehäviön suuruuteen. Tutkimuksessa käytettiin monia eri kuitulaatuja kuten kierrätyskuitua, eukalyptusta, mäntyä ja mänty-eukalyptus komposiittia. Kuva 11 havainnollistaa tutkimuksen massalaatujen välisiä eroja painehäviöiden suuruudessa. Kuvassa nähdään mm. pitkäkuituisen männyn ja lyhytkuituisen eukalypt-

tuksen tulppavirtauksen suurimpien painehäviöiden välinen ero. Virtausnopeusero korkeimman painehäviön pisteessä kuitulaatujen välillä on yli 2 m/s. Ventura ym. esittävät virtausnopeuseron johtuvan pitkien kuitujen asettumisesta virtaviivaisesti, mikä stabiloi virtausta matalalla virtausnopeudella.

Venturan ym. tutkimuksen kohteena oli myös kierrätyskuitu, jolla havaitaan kuvassa 10 huomattavan pieni painehäviö merkittävästi suuremmalla sakeudella muihin laatuhiin verrattuna. Kierrätyskuidun pienemmän painehäviön syyksi Ventura ym. antavat kuidun vanhenemisen, joka johtaa kuidun rakenteen muutokseen. Vanhenemisefekti vahvistettiin, kun teollisen mäntykuidun annettiin vanheta viikon ajan. Vanhenemisen seurauksena putkivirtauksessa syntyi pienempi painehäviö, kuin ns. "tuoreen" kuidun virtauksessa.

Ventura ym. tutkimuksessa suspension komposiittirakenteen vaikutus painehäviöön havaittiin samankaltaisena kuin Duffylla (24). Suspension komposiittirakenne saa painehäviön suurimman arvon siirtymään alempaan virtausnopeuteen. Ventura ym. käyttivät komposiitissa 10 % lehtipuupitoisuutta, jolloin suurimman painehäviön virtausnopeuden arvo putosi huomattavasti, mutta painehäviö pysyi puhtaan mäntykuidun luokassa. Duffy käytti omassa komposiitissaan 20 % lehtipuupitoisuutta, jolloin suurin virtausnopeus ja painehäviö laskivat merkittävästi (24, 121). Duffy havaitsi komposiitin vaikuttavan vain vähän tulppavirtauksen kokonaispainehäviöön (24, 122).



Kuva 11. Painehäviötä eri massalaaduilla. (27, 21.)

Ahlströmin massan pumppaus käsikirja (16) on yksi laajimmista julkaistuista painehäviötutkimuksista. Käsikirjassa on putkikoille DN 80 - DN 500 painehäviöiden mitoituskäyrät, joiden avulla pystytään mitoittamaan monipuolisesti paperiteollisuuden putkistoja. Käsikirjassa esitetään massalaadun vaikutus painehäviöön laatukohtaisen korjauskertoimen avulla. Tosin käsikirja ei huomioi tulppavirtauksen suurimman painehäviön virtausnopeuden vaihtelua eri massalaaduilla. Ahlströmin tutkimukseen pohjautuvasta Pumppujen pumppu -ohjelmasta luotiin tämän opinnäytetyön yhteydessä korrelaatioita, joita voidaan helposti verrata Duffyn kemiallisen massan korrelaatioon (28, 163). Painehäviöitä laskettaessa Duffyn korrelaatiolla 4.4, on käytettävä Imperialista yksikköjärjestelmää metrisen sijasta, mikä pätee myös Mollerin korrelaatioihin 4.5 ja 4.6.

$$\frac{\Delta H}{L} = 16,8 V^{0,33} (C - 0,65)^{1,33} D^{-1,22} \quad (4.4)$$

Tekemässäni korrelaatioiden vertailussa havaitsin Pumppujen pumppu -ohjelmasta luotujen korrelaatioiden olevan matalalla sakeudella samassa kokoluokassa Duffyn korrelaation kanssa. Koska tulokset ovat lähellä toisiaan, voidaan molempien tutkimuksien tuloksia pitää käyttökelpoisina kuitenkin rajoittaen Duffyn kaavan ainoastaan pieniin putkiin ja 3 % sakeuteen.

Verrattaessa Ahlströmin kuvaajia suoraan Duffyn (24) ja Mollerin (25) kuvaajiin, voidaan huomata Ahlströmin kuvaajien antavan kemialliselle massalle pienemmän tulppavirtauksen suurimman painehäviön. Tosin vertailua ei pystytä tekemään mittavassa kokoluokassa, koska Ahlströmin käyrät alkavat pääasiallisesti 2 % sakeudesta ja yhteensopivia putkikokoja on vain kaksi. Kuvaajia vertailtaessa silmään pistää erityisesti erot virtausnopeuksissa painehäviön suurimman arvon kohdalla. Pääsääntöisesti Ahlströmin kuvaajissa virtausnopeus on jonkin verran pienempi suurimman painehäviön pisteissä. Tämä voi selittyä sillä, että käsikirjassa jokaisella massalaadulla virtauksen muutos tulppavirtauksesta laminaariseen tapahtuu aina samassa virtauksen pisteessä. Tällöin tulppavirtauksen suurin virtausarvo on määritettävä pienimmän virtauksen tarvitsevan massalaadun mukaan tai keskiarvoisesti.

Mekaanisen massan painehäviöille käytetään Ahlströmin käsikirjassa korjauskerrointa. Moller on tutkimuksessaan määrittänyt mittausten perusteella korrelaatiot hiokkeelle ja hierteelle ja julkaissut ne mm. artikkelissa, joka käsittelee hyvin laajasti me-

kaanisia massoja (26, 328). Korrelaatioissa on huomattava käyttää Imperialista yksiköjärjestelmää.

Hioke ja hierre

$$\frac{\Delta H}{L} = 3,32 V^{0,27} C^{2,37} D^{-0,85} \quad (4.5)$$

$$\frac{\Delta H}{L} = 3,32 V^{0,18} C^{2,34} D^{-1,09} \quad (4.6)$$

Mollerin kaavoissa painehäviön nousu on tulppavirtauksella huomattavasti jyrkempi kuin Duffyn kemiallisen massan kaavassa. Mollerin kaavat poikkeavat kemiallisen massan kaavoista myös sillä, että ne sisältävät laminaarisen alueen tasaisen osuuden. Mollerin kaavoja voidaan verrata Ahlströmin käsikirjaan perustuviin korrelaatioihin. Hioketta vertailtaessa on Pumppujen pumppu -ohjelman korrelaatiot kerrottava Ahlströmin hiokkeen kertoimella, jotta päästään samaan kokoluokkaan Mollerin hiokkeen kanssa. Edellä esitetty Mollerin toinen hierteelle tarkoitettu korrelaatio antaa samaa kokoluokkaa olevan painehäviön kuin Pumppujen pumppu -ohjelman sulfaatin painehäviö. Hiokkeen ja hierteen korrelaatioiden yläraja on kuitenkin 3 % sakeus, koska erot raja-arvon jälkeen ovat merkittäviä.

Putkistosuunnittelun lähtökohtana voidaan pitää Ahlströmin käsikirjaa, johon voidaan verrata muiden tutkimusten antamia painehäviötietoja. Ahlströmin käsikirja voidaan esittää vertailulähtökohdaksi, koska käsikirjaan perustuvalla laskentaohjelmalla on jo yli 20 vuoden ajan tehty putkien mitoituksia juuri ongelmitta. Kuitenkin mekaanisen massan kohdalla, käsikirjan ohessa voidaan mitoituksen suuntaviivana käyttää myös Mollerin kaavoja.

4.8 Tulppavirtauksen painehäviöiden vertailu ja mahdolliset syyt eroihin

Viime luvussa esiteltiin miten eri massalaadut eroavat toisistaan putkiston painehäviön suhteen ja kuinka suspension kuidutuksen jälkeinen prosessointi vaikuttaa putkiston painehäviöihin. Matalan virtausnopeuden tulppavirtauksessa havaittiin kaksi laatukohtaisesti vaihtelevaa virtauksen ominaisuutta. Ensimmäinen vaihteleva ominaisuus oli laminaarisen virtauksen syntymiseen vaadittava virtausnopeus. Syy tarvittavan virtausnopeuden vaihtelulle saattoi olla massalaatujen vaihtelevassa hydrodynamisten voimien vastustuskyvyssä. Toinen havaituista vaihtelevista ominaisuuksista

oli painehäviön suuruus, jossa tulppavirtaus muuttui laminaariseksi virtaukseksi. Edellisen luvun tapausten kohdalla painehäviön suuruus vaikutti riippuvan kuitutulpan verkostolujuudesta. Teoreettisen tiedon pohjalta voidaan pohtia eri massalaatujen vaikutusta kuitutulpan nostevoiman vastustuskykyyn ja painehäviön suuruuteen. Ensin kuitenkin on syytä kartoittaa aikaisemmat olennaiset havainnot virtauksen tilasta ja tilan muutoksista.

Kun hydrodynaaminen nostevoima putkessa on tarpeeksi suuri, syntyy laminaarinen vesikalvo kuitutulpan ja putken väliin (1, 18; 23, 104). Kuitupituus vaikuttaa kuituverkoston lujuteen, koska pidemmät kuidut pystyvät muodostamaan suuremman määrän mekaanisia sidoksia toisten kuitujen kanssa (9, 57).

Soszynskin (29, 115) mukaan laminaarinen vesikalvo syntyy putken ja tulpan väliin, kun kuidut venyvät aksiaalisesti virtauksen vaikutuksesta. Venymisen seurauksena kuituverkosto pitenee aksiaalisesti ja kapenee säteittäisesti. Säteittäisen kapenemisen seurauksena kantajaneste muodostaa tulpan ympärille kuiduista vapaan vesikalvon, jonka paksuus riippuu kuitutulpan supistumisen suuruudesta. Soszynski mukaan puolestaan virtauksessa, jossa kuituverkosto supistuu aksiaalisesti, supistuminen jatkuu niin kauan, kunnes tasapainotila verkoston säteittäisen laajenemisen ja hydrodynaamisten voimien välillä saavutetaan. Puukuitujen kuvatun kaltainen yhtäaikainen venyminen ja kapeneminen ovat tyypillistä kimmoiselle materiaalille.

Jäsbergin (23, 104) mukaan virtauksen mekanismiin vaikuttaa pumpun ym. laitteiden synnyttävän turbulenttisen energian varastoituminen kuitutulppaan ja sen ilmentyminen tulpan kimmoisena energiana. Kimmoisesta energiasta syntyy tulpan kimmainen vastusvoima, joka vastustaa vesikerroksen muodostumista putken ja tulpan väliin. Tulppavirtausalueella energia on kokoluokaltaan suurempi kuin nostevoima, koska tulppa on kosketuksissa putken pinnan kanssa. Tällöin painehäviö syntyy tulpan ja putken välisestä vuorovaikutuksesta. Virtausnopeuden kasvaessa hydrodynaamisesta nosteesta muodostuu kimmoista voimaa suurempi, minkä seurauksena syntyy kuiduista vapaa vesikalvo.

Hydrodynaamisen nosteen suuruuden voidaan olettaa riippuvan virtausnopeudesta. Tulpan nosteenvastustuskyvyn poikkeavuus pitkällä ja lyhyellä kuidulla voi olla syy sille, että Venturan ym. ja Mollerin tutkimuksissa havaitaan kuitupituuden vaikuttavan virtausnopeuteen, jossa putkeen syntyy vesikalvo. Vesikalvon synnyn lisäksi Ventu-

ralta ym. sekä Mollerilta nähdään suspensioiden painehäviöiden suuruusero. Tulppavirtauksen painehäviön suuruus voi olla suhteessa kuituverkoston lujuteen, koska kemiallisilla massoilla havaitaan suuremman verkostolujuuden vaikutuksesta suurempi painehäviö. Tällaisessa tapauksessa on verkostolujuuden vaikutettava tulpan ja putken väliseen vuorovaikutukseen. Selitys voi olla, että lujan tulpan virtauksen vastus on suurempi kuin heikomman, minkä vuoksi se ei kulje putken pintaa pitkin yhtä liukkaasti kuin heikompi tulppa.

Edellisessä luvussa kemiallisilla massoilla havaittiin tulppavirtauksen suurimman painehäviön arvojen voivan poiketa toisistaan eri massalaaduilla, kuten havupuulla ja lehtipuulla (27, 21). Havupuun tulppavirtauksen suurin painehäviönarvo on lehtipuuta suurempi ja se esiintyy suuremmalla virtausnopeudella. Mollerin tutkimus vahvistaa havainnon. Mollerin saamaan tulokseen kuitenkin vaikuttaa se, että hänen käyttämänsä kuitususpensio oli kerran kuivattua (25, 117). Venturan ym. tutkimuksessa virtausnopeuksien ero pitkä- ja lyhytkuituisen suspension välillä on huomattavan suuri. Kuitenkin, jos vertailua tehdään laskennallisesti *TIP -0410-14* mukaan, saadaan 3,5 % sakeudessa virtausnopeuksien eroksi pitkäkuituisella kraft-massalla ja kerran kuivatulla kraft-koivulla noin 2 m/s, mikä vastaa Venturan ym. tulosta.

Kemiallisella massalla kahdesta eri kuitulaadusta koostuvalla komposiitinsuspensiolla suspension rakenne poikkeaa puhtaista laaduista. Komposiittirakenne voidaan muodostaa, kun pitkien puukuitujen sekaan lisätään lyhyitä kuituja. Tämän kaltaisessa rakenteessa pitkät ja lyhyet kuidut muodostavat keskenään erisuuruisia flokkeja, mikä saa verkoston lujouden vaihtelevaan paikoittain. Venturan ym. sekä Duffyn tutkimuksen perusteella voidaan todeta komposiitin pitkien ja lyhyiden kuitujen lukumääräisen suhteen vaikuttavan hydrodynaamisen nosteenvastukseen sekä kuitutulpan ja putken pinnan väliseen reaktioon. Komposiittirakenteen nosteenvastus havaitaan pienemmäksi, koska vesikerros kuitujen ja putken välissä esiintyy alhaisemmalla virtausnopeudella. Lyhyiden kuitujen suhteellisen osuuden ollessa verkostossa noin 10 % eli vielä pieni, voidaan arvioida lyhyistä kuiduista suurimman osan esiintyvän tulpan pinnassa, jossa nosteen ja sen vastuksen vuorovaikutus on suurin. Duffyn tutkimuksessa lyhyiden kuitujen osuus komposiitissa on noin 20 %, jolloin virtauksen muutos laminaariseksi havaitaan alhaisemmassa virtausnopeudessa sekä alhaisemmalla painehäviöllä kuin puhtaalla pitkällä kuidulla. Verrattaessa 10 % ja 20 % pitoisuuksia, voidaan havaita lyhyiden kuitujen suuremmalla osuudella kuituverkoston lujuden jo

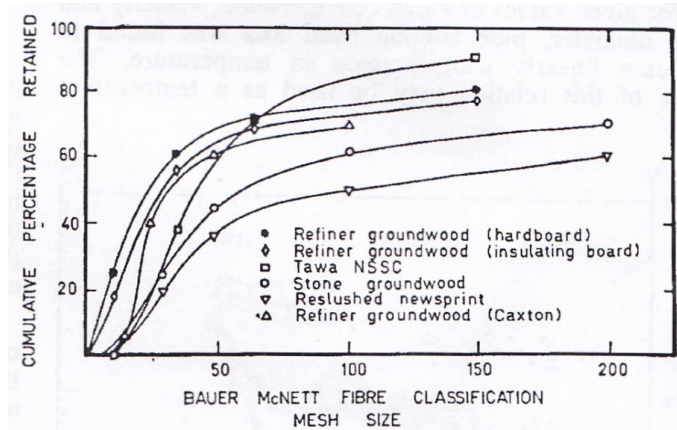
merkittävästi muuttuneen, ja alhaisemman nosteen vastustuskyvyn lisäksi painehäviön pienentyneen.

Edellisissä kappaleissa usein mainittu kemiallisen massan tulppavirtauksen suurin häviö ei ole virtauksen fyysinen ominaisuus vaan pikemminkin virtauksen tila. Suurimman arvon syntyyn vaikuttavat putken ja kuitutulpan välinen vuorovaikutus sekä tulpan nosteenvastustuskyky. Edellä lueteltujen tekijöiden yhteisvaikutukset määräävät suurimman painehäviön pisteen sijainnin painehäviökuvaajassa. Monissa tapauksissa tulppavirtauksen suurin painehäviö kuvastaa suoraan kuituverkoston verkostolujuutta, minkä vuoksi sitä voidaan pitää eräänlaisena kuituverkoston lujuutta kuvaavana suureena.

Mekaanisella massalla painehäviökäyrän syntymekanismi ei ole yhtä yksinkertainen. Mekaaninen massa sisältää huomattavan määrän lyhyitä kuituja ja hienoainesta (9, 60). Mekaanisella massalla hienoainepitoisuuden on todettu vaikuttavan merkittävästi verkoston rakenteeseen ja lujuuteen (9, 63). Hienoaineella on suspensiossa erityisen suuri pinta-alue johtuen hienoaineen pienestä partikkelikoosta (9, 64). Pinta-alueen suuruuden seurauksena hienoaines parantaa kuitujen välisten sidosten muodostumista (9, 64). Puun hiominen ja hiertäminen fibrilloivat kuidut sisäisesti ja ulkoisesti. Sisäisessä fibrillaatiossa kuituseinämä osittain delaminoituu. Delaminointi vaikuttaa kuituseinämän turpoamiskykyyn, joustavuuteen ja yhdenmukaisuuteen. Ulkoisessa fibrillaatiossa kuidun pinta hajoaa, jolloin pintaan muodostuu fibrillejä, jotka edesauttavat kuitujen sitoutumista keskenään. Nämä kaikki neljä tekijää yhdessä parantavat kuitujen välistä vuorovaikutusta, jolloin kuitujen mekaaninen kiinnittyminen toisiinsa paranee, mikä kasvattaa verkoston lujuusominaisuuksia (9, 62). Mekaanisilla valmistusprosesseilla on kuitenkin eroa syntyvän suspension kannalta. Hiomisessa syntyy hienoainesta ja suhteellisen paljon pitkiä leikkautumattomia kuituja, jolloin suspension kuitujen sidostenmuodostuskyky on hyvä (30, 44). Hiertämisessä syntyy hienoainesta ja hiomista enemmän lyhyitä kuituja (31, 302). Lyhyiden kuitujen määrä kuitenkin riippuu jauhatuksen intensiteetistä. Lyhyiden kuitujen muodostusta on syytä välttää, koska se vähentää kuitujen välistä sitoutumista (31, 302).

Voidaan siis sanoa mekaanisen massan sisältävän vähän pitkiä kuituja, jolloin suspensio muodostaa pienempiä flokkeja, joiden verkostolujuus ei muodostu pelkkien kuitujen vaikutuksesta vaan kuitujen ja hienoaineen yhteisvaikutuksesta. Kuvassa 12 ver-

taillaan mm. hiokkeen ja hierteen kuitujen ja hienoaineen pituusjakaumia. Jakaumista on mahdollista tehdä suuntaa-antavia päätelmiä. Kyseisen artikkelin korrelaatioita tarkastelemalla voidaan karkeasti sanoa painehäviön kasvavan mekaanisella massalla kuvassa 12 alhaalta ylöspäin, kuitenkin kemiallinen käsittelyn pois lukien (26, 329).



Kuva 12. Vertailua mekaanisten massojen Bauer McNett-fraktioista. (26, 329.)

Mollerin mukaan mekaanisella massalla vesikalvo syntyy tulpan ja putken seinämän välille alhaisemmassa virtausnopeudessa kuin kemiallisella massalla. Mekaanisella massalla voidaan tästä syystä todeta olevan heikompi hydrodynaamisen nosteen vastustuskyky. Moller havaitsi tutkimuksessaan, että mekaaniselta massalta puuttuu laskevan painehäviön alue. Soszynski on selittänyt tämän johtuvan mekaanisen massan lyhyemmistä kuiduista, jotka eivät pysty venymään pitkien kuitujen tavoin, minkä vuoksi kuitujen supistuminen säteittäisessä suunnassa on pienempi (29, 115). Tulppavirtauksella tulpan pinnan ja putken välillä on kuituja ja hienoainesta, jotka toimivat laakerin rullien tavoin. Kun putkeen muodostuu vesikalvo, ei tulpasta irti oleva aines sitoudu tulppaan vaan jää vapaaksi syntyvään kalvoon.

Kivihiokkeen tulppavirtauksella on havaittu merkittävästi suurempi painehäviö kuin kemiallisella massalla. Tämä viestii hiokkeen laakeri-ilmiön olevan huonompi kuin pitkäkuituisella suspensiolla. Hierteellä on puolestaan havaittu pienempi painehäviö kuin kivihiokkeella. Moller havaitsi kivihiokkeen pienellä sakeudella painehäviön olevan yhtä suuri kuin mänty kraft-massan. Puolestaan hierteellä painehäviö oli samaa kokoluokkaa hänen tutkimansa koivun kanssa. Kuitenkin yli 3,5 % sakeudessa molemmat mekaaniset massat aiheuttivat suuremman painehäviön kuin pitkäkuituinen mänty kraft-massa (25, 116 - 117).

4.9 Putkiston suunnan- ja koonmuutosten vaikutukset painehäviöön

Putkiston suunnan- ja koonmuutosten vaikutusten tutkimiseen on vuosien varrella panostettu vain vähän. Kaikista laajin tutkimus, joka antaa selkeitä numeerisia arvoja painehäviölle, on Ahlströmin Massan pumppaus tutkimus (16). Moller ja Norman (32) ovat tutkineet putkiston osien vaikutusta virtauksen käyttäytymiseen. Tutkimuksen perimmäisenä tarkoituksena oli kuitenkin tutkia virtauksen stabiiliutta, joten he eivät juuri kiinnittäneet huomiota paineenpudotukseen. Yksittäisten välikommenttien lisäksi ei kirjallisuudesta juuri löydy tutkimustietoa putkistokomponenttien vaikutuksesta. Tästä syystä Ahlströmin tutkimuksen tuloksia ei pystytä vahvistamaan toisista julkisista lähteistä.

Ahlströmin Massan pumppaus tutkimus käsittää putkiston painehäviökuvaajien lisäksi kuuden erilaisen putkiston suunnan- tai koonmuutoksen painehäviötiedot. Komponenttien tiedot löytyvät putkikoille DN 80 - DN 500 ja ne on taulukoitu sakeuden ja virtausnopeuden mukaan. Painehäviöt löytyvät 1 % sakeudesta 6 % sakeuteen ja virtausnopeudesta 0,5 m/s nopeuteen 3 m/s. Matalalla sakeudella arvot kattavat alueen tulppavirtauksesta fluidisoituneeseen virtaukseen.

Ahlströmin tutkimusta nopeasti silmäilemällä havaitaan kääntyvän virtauksen painehäviön laskevan sakeuden kasvaessa. Virtausnopeuden kasvu puolestaan lisää painehäviötä. Jos putken kokoa kasvatetaan sovitteella alkuperäistä putkea kaksi kertaa suuremmaksi, pienenee painehäviö sakeuden ja virtausnopeuden kasvun vaikutuksesta. Kuitenkin muutettaessa putki kaksi kertaa pienemmäksi on painehäviöllä havaittavissa suunnanmuutosta vastaava käyttäytyminen sakeuden ja virtauksen suhteen, eli sakeuden kasvu pienentää painehäviötä, ja virtausnopeuden kasvu suurentaa painehäviötä.

Tutkiessaan kuitususpension virtausta suorakulmaisen putkikäyrän jälkeisessä putkessa Moller ja Norman (32) havaitsivat käyrän jälkeisen painegradientin vaihtelevan. Putkiston paine oli kaarteiden jälkeen suurempi kuin ennen kaarretta. Paine kuitenkin laski virtauksen stabiloituessa. Moller ja Norman eivät kuitenkaan ottaneet kantaa painehäviön kokonaispudotukseen suunnanmuutoksen seurauksena. Mollerin ja Normanin kuitutulpan käyttäytymisessä havaitsema ilmiö voi viestiä suspension kyvystä vastustaa kuiturakenteen häiriötä, joka syntyy käyrässä. Kuiturakenteen vahvuuteen voi vaikuttaa mm. sakeus. Matalalla sakeudella kuituverkosto voi hajota täysin, kun

korkealla sakeudella vain ehkä osa suspension kuituverkostosta hajoaa loppuosan käyttäytyessä kimmoisesti.

Ahlströmin tutkimuksessa (16, 38 - 46) havaitaan painehäviön laskevan putken suunnanmuutoksissa sakeuden nousun seurauksena. Tutkimuksesta voidaan tehdä muitakin hyviä havaintoja. Suspension ollessa tulppavirtauksella, ei virtausnopeuden muutos vaikuta nostavasti painehäviöön. Havainto voidaan tehdä useammassa sakeudessa, mutta pääasiassa vain yli 3 % sakeuksilla, koska alemman sakeuden suspensiot ovat jo taulukon arvoilla seuraavan virtausalueen puolella. Kuitenkin vesikerroksen syntyminen tulpan ja putken väliin saa painehäviön nousemaan suunnanmuutoksissa virtausnopeuden funktiona. Tämä on tyypillistä mm. puhtaalle vedelle. Poikkeuksen tulppavirtausalueen painehäviöihin tekee t - risteys, jossa kääntyvällä virtauksella kuitutulppa häiriintyy, mutta 6 % sakeudella häiriötä ei esiinny samalla tavalla kuin alemmissa sakeuksissa.

Tapauksessa, jossa putkisto supistetaan kaksi kertaa pienemmäksi, voidaan havaita tulppavirtauksen painehäviön suurimman arvon pisteessä painehäviöiden pysyvän suurin piirtein yhtä suurena sakeudesta riippumatta. Duffy on tutkinut putkiston laipallista supistusta, jossa kuitutulppa virtaa suuremmasta pienempään putkikokoon (14, 7). Duffyn mukaan putken laipallisessa supistuksessa kuitutulpasta leikkautuvat ulommat kerrokset irti, jolloin tulpan halkaisija pienenee. Kuituverkoston lujuus, joka kasvaa aina sakeuden suurentuessa, ei taulukon mukaan vaikuta tulpan leikkautumisesta aiheutuvaan painehäviöön. Tulppavirtauksen pienemmillä virtausnopeuksilla ei virtaustietojen vertailu kuitenkaan onnistu niin hyvin, että voitaisiin esittää päätelmiä painehäviön riippuvuudesta. Myöskään vesikerroksen vaikutusta ei pystytä juuri toteamaan, koska kuvaajista ei ole mahdollista tunnistaa laminaarisen ja turbulenttisen kerroksen vaihtumista. Ahlströmin taulukoiden perusteella putkiston äkillisesti laajentuessa virtausnopeuden ja sakeuden nousu tekevät suspension virtauksesta muutoksen yli jouheampaa. Suspension virtausalue ei tällöin näyttäisi vaikuttavan painehäviöön.

Ahlströmin tutkimuksessa putkiston osien painehäviö kasvaa aina putkikoon suurentuessa. Mittauksia suoritettaessa on myös tiedostettu se, että suora painehäviön mittaus heti ennen tai jälkeen virtauksen suunnanmuutoksen ei tule kyseeseen virtauksen epästabiiliuden vuoksi, koska paine on käyrän jälkeen suurempi kuin ennen käyrää. Tau-

lukoissa ilmoitetaan painehäviö ekvivalenttina putkipituutena, joka on epäsuora painehäviön mitta.

4.10 Virtauksen painehäviöiden mallinnus eri virtausalueilla

Kuitususpension virtausmallinnus on hyvin monimutkaista perinteisten newtonisiin nesteiden rinnastettaessa. Virtauksen painehäviöiden määrittäminen newtoniselle nesteelle kuten vedelle on melko yksiselitteistä, jonka vuoksi vedelle ja veden kaltaisille nesteille virtausteoria on kehittynyt nykyiseen muotoonsa lähes 100 vuotta sitten. Perinteiset yhden faasin laskentayhtälöt eivät päde kuitususpensioon, koska kuitususpensio on aina poikkeuksetta kahden faasin virtaus ja suurilla sakeuksilla ilman läsnä ollessa kolmen faasin virtaus. Koska virtausteoria puutteellinen, on painehäviöiden mallinnukseen kehitetty empiirisiä laskentamenetelmiä. Kuitenkaan yhdellä yhtälöllä tai menetelmällä ei pystytä mallintamaan jokaista kuitususpension virtausaluetta. Kuitususpension painehäviöt on määritettävä useammalla eri mallilla ja mallit vaativat poikkeuksetta referenssikseen kokeellisesti määritetyn painehäviökuvaajan. On myös olemassa korrelaatioita, jotka vaativat pohjakeseen painehäviöiden lisäksi myös putken sisäisen virtausprofiilin määrittämisen. Monimutkaisten ja epävarmojen yhtälöiden vuoksi käytännössä mitoituksessa tyydytään likiarvoiseen menettelyyn, jossa tulppavirtaus mallinnetaan empiirisen kaavan perusteella ja muiden alueiden painehäviönä pidetään empiirisen kaavan suurinta painehäviötä, kunnes suspensio fluidisoituu. Tässä luvussa esitellään muutama kuitususpension virtausmallinnukseen kehitetty korrelaatio sekä muita likiarvoisia laskentayhtälöitä.

4.10.1 Veden kaltainen virtaus

Matalalla sakeudella voidaan virtaus mallintaa olettamalla virtaava väliaine vedeksi. Matalalla sakeudella kuidut eivät ole muodostaneet verkostoa ja saaneet tästä mekaanista vahvuutta. Kuidut virtaavat pääsääntöisesti irrallaan toisistaan partikkelien tavoin. Veden kaltaistus on mahdollinen alle 0,5 - 0,7 % sakeudessa, jota pidetään flokkien muodostumisen alarajana (5, 74). Virtaus voidaan mallintaa turbulenttisen virtauksen yhtälöllä seuraavasti:

$$\frac{\Delta P}{L} = 0,158 \rho_v^{3/4} \mu_v^{1/4} D^{-5/4} V^{7/4}, \quad (4.7)$$

missä ρ_v on veden tiheys, V on veden virtausnopeus, μ_v on veden dynaaminen viskositeetti ja D on putken halkaisija. (23, 70; 2, 314.)

4.10.2 Tulppavirtauksen painehäviö

Tulppavirtaukselle on jo usean vuosikymmenen ajan käytetty yleistä kaavaa 4.8, johon saatetaan viitata myös nimellä empiirinen kaava (25, 146; 5, 77; 21, 4). Kaava esitetään usein yleisessä muodossa, jolloin siitä puuttuvat numeeriset vakiot. Kaavalla pystytään kuvaamaan hyvällä tarkkuudella kuitususpension painehäviö ennen painehäviökäyrän laskevan painehäviön aluetta. Malli rajoittuu painehäviön suurimpaan arvoon, joka löytyy pisteestä ennen laskevan painehäviön aluetta. Kaavan hyvä toiminta riippuu sen parametrisoinnista. Kaavalla ei kuitenkaan pystytä kuvaamaan kerrallaan enempää, kuin yhtä massalaatua. Yksinkertaiset numeeriset parametrit eivät aina ole riittävät kuvaamaan laajaa sakeusaluetta. Parametrisointia varten ei myöskään välttämättä ole aina saatavilla tarpeeksi mittavaa referenssiaineistoa. Parametrisointi usein perustuukin vanhoihin tutkimuksiin, koska uutta julkaistua aineistoa ei ole saatavilla. Vanhaan aineistoon on kuitenkin suhtauduttava varauksella, koska painehäviökäyrän muotoon vaikuttaa käytetty testiputkisto. Testiputkistossa tulee olla riittävän pitkä suora osuus ennen mittausasemaa, jotta virtaus ehtisi tasaantua ennen mittausta (23, 94).

Yksi tunnetuimmista kuitususpension painehäviöiden mitoituskäsikirjoista on *Tappi TIP 408-4*, joka on julkaistu ensimmäisen kerran vuonna 1981. Käsikirjan uusin päivitys on julkaistu vuonna 2012 ja sen nykyinen nimi on *TIP 0410-14*. Käsikirja perustuu vanhoihin empiirisiin tutkimuksiin, joiden avulla painehäviön korrelaatiot on muodostettu eri massalaaduille. Käsikirjan kaavat antavat painehäviölle konservatiivisen suuruuden, jonka muodostamalle pohjalle mitoitus voidaan tehdä. Käsikirjan korrelaatioiden antamiin painehäviöihin on suunnittelijan lisättävä oma korjauskertoimensa, jolla arvioidaan putkistokomponenttien painehäviöt, putken pinnankarheus, lämpötila, kuitujen ikääntymisen vaikutus sekä edeltävän prosessoinnin vaikutus painehäviöön.

Lämpötilan vaikutus viskositeetin kautta painehäviöön arvioidaan käsikirjassa olevan noin 1 % asteelta. Käsikirjassa korostetaan kuitenkin käsikirjan kaavojen ohella myös muiden laskentakaavojen käyttöä painehäviön määrittämiseen. Painehäviön mahdollisimman tarkka määrittäminen on tärkeää, koska epäonnistunut mitoitus johtaa suureen energian kulutukseen tai jopa pumpun vaihtoon. Painehäviön laskentakaava on käsi-

kirjassa rajoitettu sakeusalueelle 2 - 6 % (21, 1). Käsikirjassa esitetty painehäviön empiirinen kaava on seuraava:

$$\frac{\Delta P}{L} = F K V^\alpha C^\beta D^\gamma, \quad (4.8)$$

missä F on korjauskerroin lämpötilalle ja putken pinnankarheudelle, K on massanlaidunvakio, V on virtausnopeus ja D on putken halkaisija. Korrelaatio on yleensä muodostettu painehäviölle 100 m putkipituutta kohden.

Painehäviölle on kehitetty teoreettinen malli 4.9, joka perustuu tulpan kimmoiseen muodonmuutokseen (33, 831). Tulpan pinnan leikkausjännitys syntyy, kun putken seinämän ja kuitutulpan välille muodostuu ideaalisen ohut vesikerros. Teoreettinen malli:

$$\frac{\partial P}{\partial l} = [48^{1/3} G^{2/3} \mu^{1/3}] U^{1/3} D^{-4/3}, \quad (4.9)$$

missä G on liukumoduuli, joka on suoraan suhteessa suspension sakeuteen. Kaava voidaan työstää myös toiseen muotoon (5, 78):

$$\frac{\Delta P}{L} = [K \mu^{1/3}] C^{1,85} U^{0,33} D^{-1,33}, \quad (4.10)$$

Malli huomioi lämpötilan muutoksesta aiheutuvan viskositeetin muutoksen.

Yksi tunnetuimmista korrelaatioista on Bodenheimerin korrelaatio. Korrelaatio ilmoitetaan toimivaksi keskisakeudella, mutta sitä pidetään myös käyttökelpoisena matalalla sakeudella (22, 5). Bodenheimerin kaavaa on käytetty keskisakeusalueen 8 - 18 % painehäviöiden mitoituksessa. Osa pumppuvalmistajista on käyttänyt Bodenheimerin kaavaa painehäviön määrittämisessä (22, 5; 34, 1). Bodenheimerin julkaisemaa kaavaa voidaan pitää kyseenalaisena, koska Bodenheimer ei teoksessaan *Channeling in Bleach Towers and Friction Losses in Pulp Stock Lines* (1969) Duffyn mukaan julkaissut tutkimustuloksia, joihin kaava perustuu (24, 38). Bodenheimerin kaavaa voidaan pitää käyttökelpoisena, jos tiedetään kaavan parametrien perustuvan vertailukelpoiseen empiiriseen tutkimustietoon. Bodenheimerin kaava keskisakeudelle voidaan parametrisoidussa muodossa esittää seuraavasti:

$$H = 482 F_1 F_2 F_3 C^{2,35} P^{0,15} D^{-1,3}, \quad (4.11)$$

missä C on sakeus, P on tuotantonopeus ($admt/d$), D on putken halkaisija, F_1 , F_2 ja F_3 ovat massalaadun, ph:n ja lämpötilan korjauskertoimet. Kaavasta saatu painehäviö on 100 m putkipituutta kohden ja kaavaa voidaan soveltaa sakeudelle 8 - 18 % (19, 504).

Uudempia painehäviön kaavoja edustaa Power law -materiaalimalliin pohjautuva korrelaatio 4.12. Huhtanen on esittänyt kaavan mm. väitöskirjassaan (1, 41). Huhtanen on osoittanut korrelaation toimivaksi tutkimuksissaan (4; 1). Korrelaatio perustuu yksinkertaistukselle, joka olettaa painehäviön olevan yhtä suuri kuin putkenseinämän leikkausjännitys. Lähtökohtaisesti on myös virtaavan aineen oltava mahdollinen kuvata Power law -materiaalimallilla. Painehäviön Power law -funktio on seuraavanlainen:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2K\bar{V}^n(3+1/n)^n}{R^{(n+1)}} \quad (4.12)$$

Funktiolla voidaan hyvin tarkasti kuvata kuitususpension tulppavirtauksen painehäviö. Yhtälö kuitenkin vaatii referenssikseen empiiristä tutkimustietoa, jonka avulla voidaan konsistenssien ja indeksien arvot määrittää painehäviötä vastaaviksi. Kaavan soveltaminen edellyttää putken säteen ja keskimääräisen virtausnopeuden tuntemista.

4.10.3 Laminaarinen virtaus

Virtauksen mekaniikkaa pystytään yksinkertaistamaan, kun putken sisäpinnalle muodostuu laminaarisesti virtaava vesikerros. Tosin numeerista tarkastelua varten on saatavissa oltava empiiristä tietoa suspension painehäviöstä. Teoreettinen yksinkertaistettu tarkastelu laminaariselle virtaukselle tehdään seuraavaksi Huhtasen (4, 15 - 18) esittämän teorian mukaan.

Kuitususpensio lepää putkessa kosketuksessa putken sisäpintaan. Suspensio on painovoimasta johtuen vuorovaikutuksessa putken kanssa kohdistuen painovoiman suuruisen voimakomponentin putken pintaan. Putki vuorostaan kohdistaa suspensioon tukivoimakomponentin, joka on yhtä suuri kuin suspension painovoima. Kitkavoima, joka vaikuttaa suspension ja putken välillä voidaan määrittää, kun tiedetään putkenseinämän leikkausjännitys. Kitkavoimalle voidaan esittää kaava:

$$F_f = \tau_w/A, \quad (4.13)$$

missä A on leikkausvoiman alainen putken seinämän pinta-ala.

Kuiduista vapaan vesikerroksen muodostuessa kuituverkoston ja putkenseinämän väliin, voidaan arvioida seinämän leikkausjännityksen vaikuttavan vesikerrokseen lähes kokonaan. Putkivirtauksessa muiden voimien kuin paine ja kitkavoimien kokoluokat voidaan arvioida pieniksi ja merkityksettömiksi. Voimien tasapainotilassa pätee:

$$\pi R^2 \Delta p = 2\pi RL\tau, \quad (4.14)$$

missä Δp on putken painehäviö, R on putken säde ja L on putken pituus. Edelleen voidaan kaava johtaa yleisempään painehäviön muotoon:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{2\tau_w}{R}, \quad (4.15)$$

missä $\Delta p/L$ tarkoittaa putken painehäviötä putken pituudella L . Olettamalla paineen aikaansaaman leikkausjännityksen vaikuttavan kokonaisuudessaan vesikerroksen voidaan putkenseinämän leikkausjännityksen avulla ratkaista virtauksen painehäviö. Putken seinämän leikkausjännitys voidaan ratkaista, kun tunnetaan veden dynaaminen viskositeetti (μ_v), putken keskimääräinen virtausnopeus (V), jota voidaan pitää myös kuituverkoston reunakerroksen virtausnopeutena ja, kun tunnetaan vesikerroksen paksuus (δ_v).

$$\tau_w = \mu_v \frac{\partial u}{\partial r} = \mu_v \frac{\bar{V}}{\delta_v}, \quad (4.16)$$

Vesikerroksen leikkausnopeus voidaan edellisen perusteella esittää seuraavana:

$$\dot{\gamma} = \frac{\bar{V}}{\delta_v} \quad (4.17)$$

Approksimaatio vesikalvon paksuudelle painehäviön funktiona voidaan kirjoittaa edellä esitettyjen kaavojen 4.15 ja 4.16 perusteella seuraavasti:

$$\delta_v(\Delta p) = \frac{2\mu_v \bar{V}}{R \left(\frac{\Delta p}{L}\right)} \quad (4.18)$$

Yhtälö 4.18 voidaan myös esittää dimensiottomassa muodossa:

$$\frac{\delta_v(\Delta p)}{L} = \frac{2\mu_v\bar{V}}{R\Delta p} \quad (4.19)$$

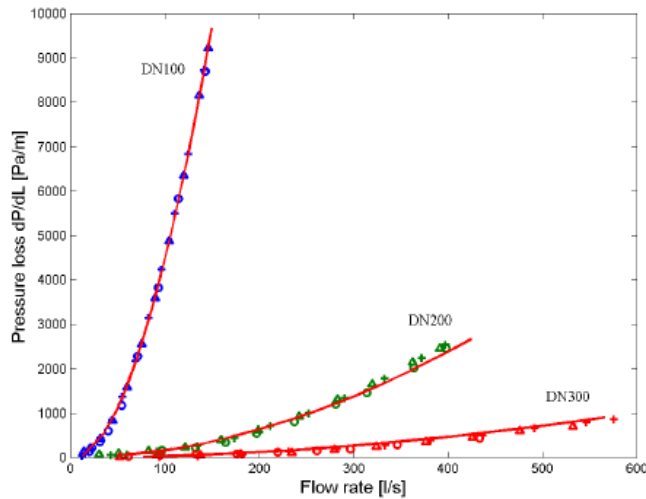
Yhtälössä on huomioitava sen soveltuvuus ainoastaan suoriin pyöreisiin putkiin. Kaavaa voidaan käyttää laskennassa, jos tunnetaan painehäviö koko putken pituudella tai vaihtoehtoisesti putken painegradientti. Kaavaa ei voida soveltaa putkiston komponentteihin, kuten putkimutkiiin ja koonmuutoksiin. Muihin yleisiin virtauspintoihin kuten levyihin voidaan soveltaa kaavaa 4.16.

Putkenseinämän ja suspension välisen suhteellisen virtausnopeuden noustessa kasvaa vesikerroksen paksuus. Vesikerroksen virtaus approksimoi Coucetten virtausta lineaarisesti kasvavalla virtausnopeudella ja vakiona pysyvällä leikkausnopeudella. Vesikerroksen Reynoldsin numero voidaan laskea yhtälöllä:

$$Re_\delta = \frac{\delta_v\bar{V}}{\mu_v} \quad (4.20)$$

4.10.4 Siirtymävirtauksen ja turbulenttisen virtauksen mallinnus

Suspension turbulenttisen tilan mallintamiselle on Jäsberg (23, 117 - 124, 131 - 134) esittänyt uuden empiirisen menetelmän. Menetelmä on osoitettu tutkimuksissa (23; 35) melko toimivaksi matalalla sakeudella. Jäsbergin tutkimuksen korrelaatio osoittaa putkikoon skaalausyhtälön olemassaolon, mitä demonstroidaan kolmella eri putkella kuvassa 13. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan Jäsbergin siirtymävirtaukselle ja turbulenttiselle virtaukselle tarkoitettua korrelaatiota. Jäsberg on työssään myös määrittänyt korrelaation tulppavirtaukselle ja laminaariselle virtaukselle. Yksityiskohtaisempi kuvaus korrelaation molemmista osista löytyy Jäsbergin väitöskirjasta (23, 109 - 134).



Kuva 13. Kolmen erilaisen suspension painehäviöt 1 % sakeudessa. Jäsbergin korrelaatio on sovitettu putkeen DN 100, josta se on skaalattu kahdelle suuremmalle putkelle. (36, 83.)

Jäsbergin korrelaatio on perinteinen empiirinen korrelaatio, jonka muodostamiseksi tarvitaan mittaustietoja. Korrelaatiolla pystytään mallintamaan siirtymävirtaus ja turbulenttinen virtaus. Tähän asti on jokainen virtausalue täytynyt mallintaa erillisesti, eikä ole ollut olemassa korrelaatiota, joka pystyisi mallintamaan täysin turbulenssin esiintymistä virtauksessa (5, 77 - 79). Korrelaatiota muodostettaessa on oltava saatavissa mittaustietoa painehäviöstä ja putken sisäisestä virtausprofiilista, että saataisiin korrelaatio muodostettua ja toimivuus varmistettua. Korrelaation muodostaminen vaatii suspension putkensisäisen virtausprofiilin tutkimista. Virtausprofiilin tutkimiseen voidaan käyttää ultraääni Doppler -menetelmää (PUDV). PUDV toiminta perustuu virtauksessa olevien rajapintojen ultraääneneijastavuuteen, jolloin saadaan heijastusten kautta kerättyä tietoa virtausprofiilin muodosta. Mitattuun virtausprofiiliin sovitaan teoreettinen newtonisen virtauksen profiili. Turbulenttisen virtauksen seinäkerroksen dimensioton nopeusprofiili määritetään kaavojen 4.21 ja 4.22 mukaan.

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (4.21)$$

$$y^+ = \frac{yu^*}{\nu_{fl}} \quad (4.22)$$

$$u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.23)$$

Kaavassa 4.22 kitkanopeus (u^*) on kaavan 4.23 mukainen ja kaavassa 4.22 ν_{fl} on nesteen kinemaattinen viskositeetti. Kitkanopeuden leikkausjännitys määritetään paine-

häviön mittauksista. Virtauksen nopeusprofiili mallinnetaan logaritmisella newtonisen nesteen turbulenttisella profiililla 4.24, johon on lisätty termi Δu^+ .

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B + \Delta u^+, \quad (4.24)$$

jossa $\kappa = 0,41$ ja $B = 5,5$ ja Δu^+ määritetään seuraavasti:

$$\Delta u^+ = 0 \quad 0 < y^+ \leq y_L^+ \quad (4.25)$$

$$\Delta u^+ = \frac{\alpha}{\kappa} \ln(y^+/y_L^+) \quad y_L^+ < y^+ \leq y_C^+ (\leq y_H^+) \quad (4.26)$$

$$\Delta u^+ = \Delta u_p^+ - \frac{\beta}{\kappa} \ln(y^+/y_L^+) \quad y_C^+ < y^+ \leq R^+ \quad (4.27)$$

Muuttujat y_C^+ ja β määritetään kaavoilla:

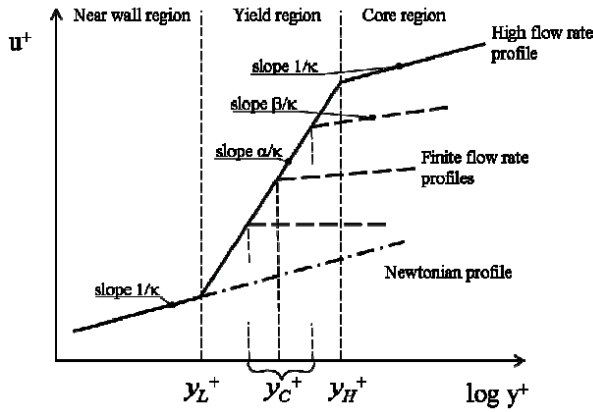
$$y_C^+ = \min(y_H^+, (u^*/u_c^*)^2) \quad (4.28)$$

$$\beta = 1 - (y_C^+/y_H^+)^2 \quad (4.29)$$

Parametrit y_L^+ , y_H^+ ovat vakioita ja tarkoitettu aina tietylle sakeudelle. Parametrien merkitys nähdään kuvasta 14. Kaavan 4.28 parametri u_c^* määritetään kaavan 4.30 perusteella. Parametrin u_c^* määrittämisessä tarvitaan keskiverto nopeusgradienttia (Γ_C), jonka ollessa vakio saadaan u_c^* ratkaistua. Parametrit α , y_L^+ , y_H^+ ja u_c^* ovat vapaita parametreja, joiden määrittäminen tapahtuu sovittamalla teoreettinen virtausprofiili mitattuun.

$$u_c^* = \sqrt{\frac{v\kappa\Gamma_C}{1+\alpha}} \quad (4.30)$$

$$\Gamma_C = \frac{du}{dy}|_{y=y_C} = \text{vakio} \quad (4.31)$$



Kuva 14. Putken puolikkaan virtausprofiilin yksinkertaistettu kuvaaja, jossa esitetään putken dimensioton virtausnopeus (u^+) dimensiottoman seinämäetäisyyden (y^+) funktiona. (23, 120.)

Turbulentin virtausalueen profiili jaetaan kolmeen eri alueeseen. Kuvassa 14 esitetään yksinkertaistetusti eri alueiden esiintyminen virtausprofiilissa. Putken seinämäkerroksen profiilin vaihtuminen myötökerroksen profiiliin tapahtuu parametrin y_L^+ pisteessä. Putken seinämäkerroksessa profiili on yhtenevä puhtaan veden profiilin kanssa, koska putken seinämällä esiintyy vesikerros. Myötökerroksessa virtausnopeus kasvaa pisteeseen y_h^+ asti. Parametri y_C^+ voi saada arvoja väliltä $y_L^+ - y_H^+$. Parametrin y_C^+ suuruus kuitenkin riippuu virtaaman suuruudesta. Parametri y_C^+ kuvaa myötöalueen suurinta arvoa ja tulpan pinnan etäisyyttä. Mainittakoon vielä myötöalueen ylärajan sijaitsevan pisteessä, jossa keskiverto nopeusgradientti on vakio (kaava 4.31). Merkittävä havainto voidaan tehdä kuvasta 14, jossa y_H^+ arvon jälkeinen virtausprofiili vastaa veden profiilia. Profiilin muutos tarkoittaa kuitutulpan fluidisoitumista veden kaltaiseksi, jolloin turbulენტista pyörteilyä esiintyy koko putken alalla.

Turbulenttisen virtauksen virtaamalle pätee seuraava dimensioton yhtälö:

$$Q^+ = Q_0^+ + \Delta Q_1^+ + \Delta Q_2^+, \quad (4.32)$$

missä

$$Q_0^+ = \pi(R^+)^2 \frac{1}{\kappa} \left[\ln R^+ + B\kappa - \frac{3}{2} \right] \quad (4.33)$$

$$\Delta Q_1^+ = \pi(R^+)^2 \frac{\alpha}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{y_C^+}{y_L^+} \right) + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{y_C^+}{R^+} \right)^2 - \left(\frac{y_L^+}{R^+} \right)^2 \right) - 2 \left(\left(\frac{y_C^+}{R^+} \right) - \left(\frac{y_L^+}{R^+} \right) \right) \right] \quad (4.34)$$

$$\Delta Q_2^+ = \pi(R^+)^2 \frac{\alpha}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{y_C^+}{y_L^+} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{y_C^+}{R^+} - 3 \right) \left(\frac{y_C^+}{R^+} - 1 \right) \right] \quad (4.35)$$

ja

$$R^+ = \frac{yu^*}{v_{fl}} \quad (4.36)$$

Yhtälöt 4.33 - 4.35 saadaan integroimalla kuvan 14 virtausprofiilien alueet. Termi Q_0^+ on newtonisen virtausprofiilin osuus ja termi ΔQ_1^+ lisää kokonaisvirtaukseen myötö-alueen virtaaman ja putken keskellä olevan tulpan alueen virtaaman osuuden. Termi ΔQ_2^+ vähentää kokonaisvirtaamasta osuuden, kun kyseessä ei ole suuren virtaaman profiili. Suuren virtaaman profiili ei siis huomioi termiä ΔQ_2^+ eli $\Delta Q_2^+ = 0$. Dimensiolinen virtaus lausutaan dimensiottoman virtauksen avulla seuraavasti:

$$Q = \frac{v^2}{u^*} Q^+ \quad (4.37)$$

Yhtälön 4.37 avulla voidaan mallintaa painehäviö suorassa putkessa. Korrelaatioissa on ensimmäiseksi määritettävä suspension virtausprofiili, josta modifioidun logaritmi- profiilin avulla määritetään profiilikohtainen dimensioton virtaama. Painehäviöiden mittausten perusteella määritetään virtaaman kitkanopeus, jonka yhteys virtaus- profiilin saadaan yhtälöstä 4.23. Korrelaatioyhtälöstä 4.32 voidaan tehdä yksinkertaistus, kun virtauksen mallinnus keskittyy ainoastaan turbulenttisen virtauksen mallintamiseen. Tällöin tarkastelu rajoittuu korkean leikkausjännityksen rajalle, jolloin $y_C^+ = y_H^+$. Yksinkertaistetulla yhtälöllä ei voida mallintaa siirtymäaluetta. Halkaisijaltaan suurissa putkissa ($R^+ \gg y_L^+, y_H^+$) voidaan tehdä seuraavanlainen yksinkertaistus:

$$Q^+ \cong Q_0^+ + \Delta Q_\infty^+, \quad (4.38)$$

missä

$$\Delta Q_\infty^+ = \lambda_1 R^+ + \lambda_2 R^{+2} \quad (4.39)$$

Puuttuvat materiaaliparametrit määritetään seuraavasti:

$$\lambda_1 = 2\pi \frac{\alpha}{\kappa} (y_H^+ - y_L^+) \quad (4.40)$$

$$\lambda_2 = \pi \ln \left(\frac{y_H^+}{y_L^+} \right) \quad (4.41)$$

4.11 Suunnitteluohjeita tulppavirtaukselle

Tässä luvussa esitetään putkiston painehäviöiden laskemisen kannalta suuntaa-antavia ohjeita. Kuitenkaan laskennan kannalta suoria numeerisia ohjearvoja ei esitetä, koska

ne olisivat vain arvioita. Luvussa vertaillaan pääasiassa massalaadun ja prosessoinnin vaikutusta tulppavirtauksen painehäviöön.

4.11.1 Kemiallinen massa

Kemiallisella kraft-massalla on pääasiassa aina huomioitava suspension kuitupituus ja prosessointi. Prosessointi käsittää pääasiassa kuidun jauhatuksen, valkaisuun ja suspension aikaisemman kuivatuksen.

Kokonaispainehäviö

Kuitupituus

Havupuu \geq Lehtipuu

Koska havupuulla on suurempi kuitupituus, on sen painehäviö suurempi. Jos saatavilla ei ole lehtipuun painehäviötietoja, voidaan hyvällä varmuudella mitoitaa putkisto havupuun painehäviöillä.

Jauhatus

Jauhettu laatu > Jauhamaton laatu

660 CSF < 730 CSF (26)

550 CSF > 713 CSF (24)

260 CSF > 725 CSF (26)

Kemiallisen massan jauhaminen saa aikaan kuitujen fibrilloitumista, joka parantaa kuitujen välisiä sidoksia, jolloin painehäviö on suurempi.

Valkaisu ja kuivaus

Prosesoitu laatu < Prosessoimaton laatu

Tarkkaa tietoa pelkän valkaisuun vaikutuksesta kuitujen painehäviöön ei ole saatavilla mutta valkaisu ja kuivaus yhdessä saavat painehäviön pieneneväksi. Kuivauksen kuitenkin tiedetään heikentävän kuituverkostoa, mikä yksinkin aiheuttaa alhaisemman

painehäviön virtaukselle. Pelkän valkaistun laadun mitoitus on tiedon puutteesta johdun parasta tehdä pitkäkuituisen valkaisemattoman laadun mukaan, jotta mitoitus tehtäisiin varman päälle.

Komposiitti (Pitkiä kuituja >> Lyhyitä kuituja)

Puhdas havupuu > Komposiitti

Lyhyiden kuitujen lisääminen saa aikaan pienen painehäviön laskun. Kuitenkin seos-suhde vaikuttaa painehäviön laskun suuruuteen. Putkisto voidaan mitoittaa varman päälle tekemällä mitoitus pitkäkuituisella havupuulla.

Tulppavirtauksen suurin virtausnopeus

Havupuu \geq Lehtipuu

Jauhettu laatu (CSF 550) > Jauhamaton laatu (CSF 713)

Valkaisematon ja kuivaamaton laatu > Valkaistu ja kuivattu laatu

Puhdas pitkäkuituinen laatu > Komposiitti

4.11.2 Mekaaninen massa

Mekaanisen massan painehäviötietoja oli käytettävissä tätä vertailua varten vain muutamalta peruslaadulta. Tietojen perusteella havaittiin hiokkeella olevan hierrettä suurempi painehäviö. Alhaisella sakeudella painehäviöt olivat kraft-massan kokoluokkaa mutta 3,5 % sakeudella häviöt olivat jo merkittävästi suuremmat. Työssä havaittiin painehäviöiden vertailun olevan mahdollista Bauer McNett-fraktioiden avulla. Jakaumasta pystyttiin karkeasti arvioimaan onko laadulla suurempi vai pienempi painehäviö. Vesikalvon muodostumisnopeutta mekaanisella massalla ei ollut saatavilla, koska sen korrelaatiot sisälsivät myös virtauksen laminaarisen osuuden. Seuraavassa vertailussa ei esitetä muuta, kuin peruslaadut kivihioke ja hierre.

Kokonaispainehäviö

Hioke > Hierre

5 SULZER PUMPS PUMPPUJEN PUMPPU -OHJELMAN EXCEL-KÄÄNNÖS

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda Exceliin laskentataulukot veden kaltaisille aineille ja paperimassalle. Laskentataulukot korvaavat Descal Engineering Oy:n, toimeksiantajan, vanhan laskentaohjelman. Laskentaohjelman käänös päätettiin luoda kahdelle Excel-pohjalle, jotta tiedostokoko ei kasvaisi suureksi ja ohjelmien käyttö olisi sujuvampaa. Luotavat laskentataulukot korvaavat vanhan Pumppujen pumppu -ohjelman, joka on Sulzer Pumps Finlandin Oy:n 80 - 90-lukujen taitteessa luoma DOS-pohjainen laskentaohjelma. Ohjelmalla pystytään laskemaan veden-, massan- ja korkean viskositeetin nesteiden putkistovirtauksen painehäviöitä. Luotavat laskentataulukot korvaavat ohjelman massaosuuden sekä veden kaltaisten aineiden osuuden.

5.1 Pumppujen pumppu -ohjelma

Käynnistettäessä Pumppujen pumppu -ohjelma aukeaa ohjelmasta etusivu, joka esitellään kuvassa 15. Laskenta aloitetaan määrittelemällä tiedosto, johon ohjelma kirjoittaa tulokset. Tiedoston määrittämisen jälkeen siirrytään Editoi tiedostoa -osuuteen, jossa määritetään laskennan perustiedot, putkikoot ja putkiosuustiedot. Kuva 16 esittää ohjelman perustietosivua, jossa määritetään mm. laskettava väliaine. Putkikoot osuudessa määritetään eri putkiosuuksilla käytettävät putkikoot. Putkiosuustiedot -sivulla määritetään myös putkiosuuksien sisältämät putkistokomponentit ja laitteet. Laskennan raporttia voidaan tarkastella Tulokset -osiossa, jossa nähdään eritellysti ohjelman laskennan tulokset ja vastuskäyrä. Ohjelmalla voidaan mitoittaa massaputkistoja tulppavirtauksella ja tulppavirtauksen jälkeisille alueille. Tulppavirtauksen jälkeisille alueille ohjelma ei tosin sisällä tarkkoja kuvaajia, vaan mitoitus tapahtuu hieman tulppavirtauksen suurinta arvoa suuremmalla painehäviöllä. Mitoitustapa ei siis anna tarkkaa painehäviötä laskevalle käyrälle, vaan antaa varman päälle olevan painehäviön, jolloin vältetään putkiston alimitoituksilta. Paperimassan lisäksi ohjelmalla voidaan mitoittaa veden kaltaisten aineiden putkistoja perinteisen virtausteorian mukaisesti.



Kuva 15. Etusivu.



Kuva 16. Lähtötietojen määrittäminen.

5.2 Ohjelman paperimassaosuuden käänös

Pumppujen pumppu -ohjelma sisältää empiiristä tietoa kuitususpension tulppavirtauksen painehäviöistä. Ohjelmassa ei kuitenkaan esitetä korrelaatioita, joihin ohjelman painehäviöt perustuvat. Ohjelman rinnalla on käytettävä Ahlströmin Massan pumppaus käsikirjaa, josta ohjelmaan saadaan massalaatujen korjauskertoimet. Ohjelma antaa yhtä suuria painehäviöitä kuin käsikirjan kuvaajat. Epäselvää on se, että sisältääkö ohjelma yksittäisiä mittaustietoja vaiko funktiot jokaiselle putkikoolle. Kuitenkin ohjelma pystyy piirtämään painehäviökuvaajan virtaaman funktiona, mikä viittaa sisäisiin funktioihin yksittäisten pisteiden sijasta. Ohjelman käänös tulee työn toimeksiantajalle tarpeeseen, koska ohjelma ei toimi uusilla 64-bittisillä käyttöjärjestelmillä. Ohjelma on aikanaan luotu 16-bittiseen DOS-ympäristöön, ja se toimii vielä vanhoissa 32-bittisissä käyttöjärjestelmissä.

Ohjelman käänöstä lähdettiin hakemaan tutkimalla mahdollisuuksia ohjelmistokoodin purkamiseen, mutta tämä kuitenkin osoittautui liian vaikeaksi vaihtoehdoksi, jopa melkein mahdottomaksi. Jäljelle siis jäi vaihtoehto jäljentää ohjelman toimintaa saatujen laskentatuloksien perusteella. Tämä vaihtoehto edellytti käyttöjärjestelmää ohjaavien makrojen luomista, koska ohjelman puhdas käsin purkaminen ei ollut käytännössä vaihtoehto.

Makrojen luomista varten hankittiin Macro Recorder -ohjelmisto, jolla pystyttiin nauhoittamaan yksinkertaisia makroja hiiren ja näppäimistön liikkeistä, jolloin saatiin automatisoitua Windows-käyttöjärjestelmän toiminta halutun mukaisesti. Macro Recorder ei yksinään riittänyt tietojen hakemiseen, vaan lisäksi tarvittiin toinen ohjelmisto hakemaan laskennan tulokset Pumppujen pumppu -ohjelman muistitiedostosta. Ohjelma kirjoitti laskennan tulokset tekstitiedostoon, josta ne saatiin helposti haettua Excelin sisäisten toimintojen avulla. Hakua varten oli Exceliin kirjoitettava yksinkertaisia kopioi-liitä makroja, joita jouduttiin luomaan useita kymmeniä tietojen asettelua varten. Tietojen oikea asettelu oli jälkikäsitellyn kannalta erityisen tärkeää. Kuvassa 17 on haussa käytetyn Excel-taulukon etusivun näkymä. Laskentatietojen hakeminen Pumppujen pumppu -ohjelmasta vaati käyttöjärjestelmää ohjaavan makron ja Excelin sisäisten makrojen yhtäaikaista toimintaa. Sujuva yhtäaikainen toiminta ilman Excelin jälkeen jäämistä oli toteutettava käyttäen sopivia käyttöjärjestelmämakron viiveitä. Kun käyttöjärjestelmämakro saatiin toimimaan ongelmitta, voitiin se yksinkertaisesti kopioimalla ja liittämällä laajentaa useiden läpimenokierrosten pituiseksi tarpeen mukaan. Suurin käyttöjärjestelmämakro sisälsi useiden satojen tietopisteiden haun. Käyttöjärjestelmämakron kohdalla ongelmaksi muodostui usein se, että vanha 32-bit kannettavatietokone ei yksinkertaisesti ollut tarpeeksi nopea millisekuntien eroilla tapahtuville muutoksille käyttöjärjestelmämakrossa, joka aiheutti makron ajon keskeytymisen ja uudelleen käynnistämisen. Työssä luoduilla makroilla ei ole painehäviötietojen haun jälkeen mitään käyttöä, koska ne on yksinomaan luotu yhdelle tietokoneella juuri tätä erityistä tarkoitusta varten, joten niiden esittäminen työn yhteydessä on turhaa.

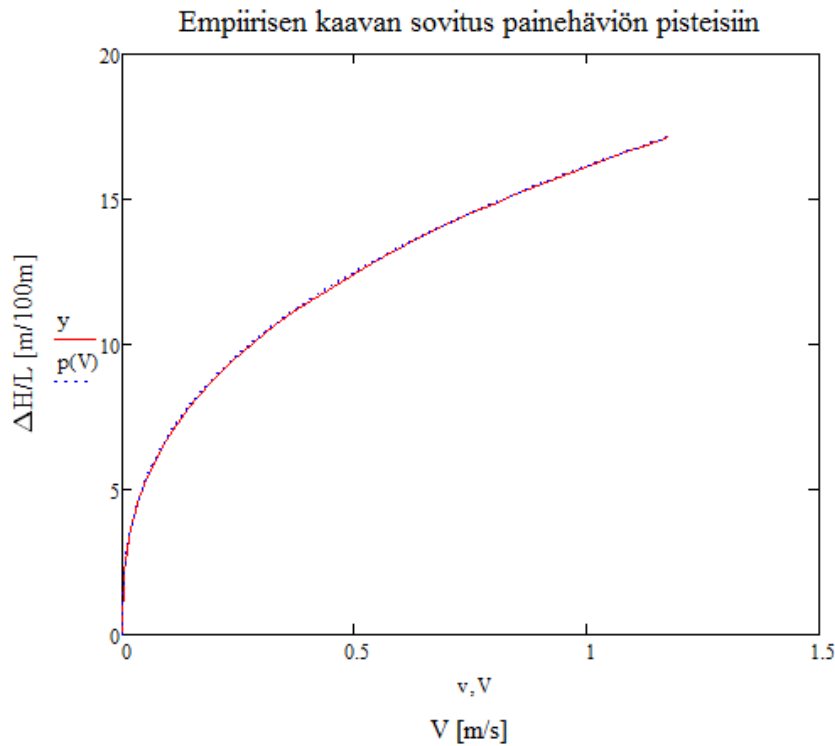
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	VIRT, dm3/s	538,00	539,00	540,00	541,00	542,00	543,00	544,00	545,00		LAMI	0,10	0,32			
2	PUTKIKOKO	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00		LAMI	0,20	0,44			
3	NOPEUS m/s	4,27	4,28	4,29	4,30	4,30	4,31	4,32	4,33		LAMI	0,30	0,54			
4	ALUE	EPM	EPM	EPM	EPM	EPM	EPM	EPM	EPM		LAMI	0,40	0,62			
5	PUTKIPIT,	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		LAMI	0,60	0,75			
6	DYN, DP										LAMI	0,80	0,86			
7	,mvp	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87	13,87		LAMI	0,90	0,91			
8	DYN, DP/l										LAMI	1,00	0,96			1
9	,mvp/100m	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9		LAMI	2,00	1,34			2
10	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii	iiiiiiiiii		LAMI	3,00	1,63			3
11											LAMI	4,00	1,87			4
12			+ [20	0;200 B	T U L O K	S E T + [1	00;100 B				LAMI	5,00	2,08			5
13											LAMI	6,00	2,27			6
14	VIRTAAMA				53	8,00 l/s					LAMI	7,00	2,44			7
15	NOSTOKORKEUS	-SYTTTTPA	INE			0,00 mvp					LAMI	8,00	2,60			8
16		-STAATTIN	EN			0,00 mvp					LAMI	9,00	2,75			9
17		-DYNAAMIN	EN			11	0,98 mvp				LAMI	10,00	2,90			10
18		-PUTK	ISTO	110,	98	mvp					LAMI	11,00	3,03			11
19		-VENT	TIILIT	0,	00	mvp					LAMI	12,00	3,16			12
20		-LAIT	TEET	0,	00	mvp					LAMI	13,00	3,29			13
21		-STVEN	TTIILI			0,00 mvp					LAMI	14,00	3,40			14
22					ÄÄÄÄ	ÄÄÄÄ					LAMI	15,00	3,52			15
23		YHTEENS			11	0,98 mvp					LAMI	16,00	3,63			16
24											LAMI	17,00	3,74			17
25											LAMI	18,00	3,84			18
26											LAMI	19,00	3,94			19
27											LAMI	20,00	4,04			20
28											LAMI	21,00	4,14			21
29											LAMI	22,00	4,23			22
30											LAMI	23,00	4,33			23

Kuva 17. Excelin etusivun näkymä. Exceliin tuotiin tiedot mm. suspension virtausalueesta, virtaamasta ja painehäviöstä.

5.3 Paperimassan korrelaatioiden määrittäminen

Korrelaatioiden muodostusta varten taulukoidut painehäviöt ja virtaamat tuotiin Mathcad:iin, jossa korrelaatioiden muodostus onnistui sujuvasti. Tulppavirtauksen korrelaatioiden muodostuksessa työssä turvauduttiin painehäviön empiiriseen kaavaan 5.1. Kuvassa 18 on empiirisen kaavan sovitukset painehäviön pisteisiin, jotka on haettu Pumpujen pumppu -ohjelmasta.

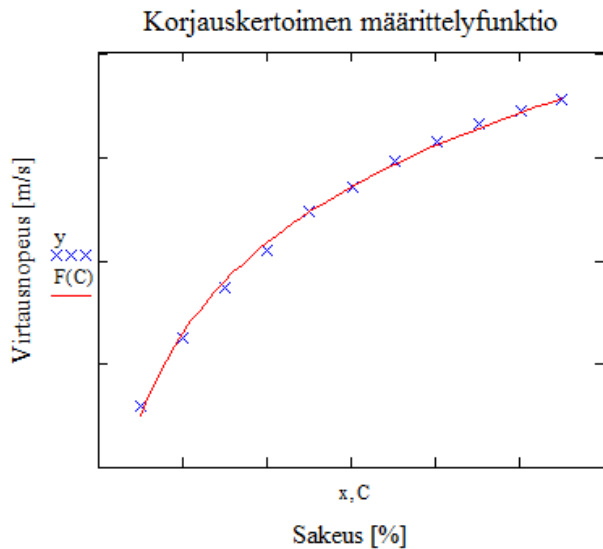
$$\frac{\Delta H}{L} = tFKV^\alpha C^\beta D^\gamma \quad (5.1)$$



Kuva 18. Tulppavirtauksen painehäviö virtausnopeuden funktiona.

Empiirinen kaava tarvitsee pohjaksi painehäviöiden mittaussarjan, johon kaava sovitetaan etsimällä kaavaan sopivat vakiot. Kaava ei kuitenkaan pysty tarkasti mallintamaan laajaa sakeusaluetta ja putkikoon muutosta. Koska Pumppujen pumppu -ohjelman painehäviöitä haluttiin mallintaa tarkasti eikä muodostaa likiarvoista yleistä kaavaa, päädyttiin muodostamaan jokaiselle putkikoolle oma korrelaationsa. Useamman korrelaation käyttö voi monessa käytännön tapauksessa olla ongelmallista, minkä vuoksi usein esitetään vain yksi likiarvoinen kaava. Työssä luodut korrelaatiot tulevat käytettäväksi ainoastaan laskentataulukossa, joten kaavojen paljous ei muodostu ongelmaksi. Empiirinen kaava ei pystynyt täydellisesti tarkasti mallintamaan laajaa sakeusaluetta, joten sen avuksi oli luotava funktiomuotoinen korjauskerroin, joka sovitaa tarkasti korrelaation Pumppujen pumppu -ohjelman painehäviökuvaajiin. Kuvassa 19 on erään putkikoon korjauskerroin määriteltynä kaavan 5.2 mukaan.

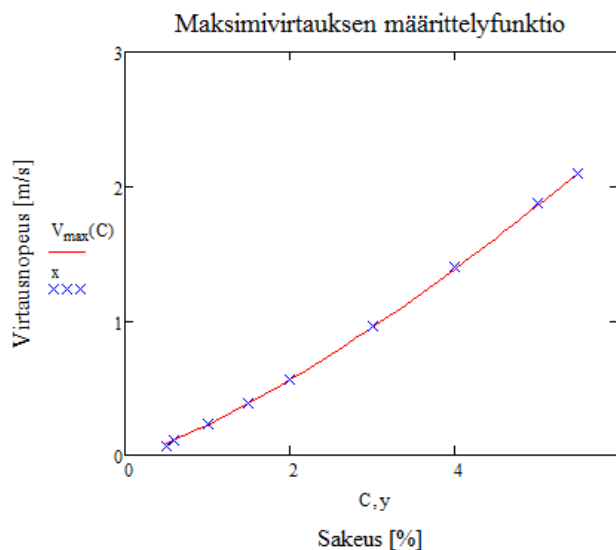
$$F = K_2 C^\theta \quad (5.2)$$



Kuva 19. Erään putkikoon korjauskertoimen määrittelyfunktio.

Painehäviökorrelaation käyttöä oli myös rajoitettava, jotta pysyttäisiin tulppavirtauksen alueella. Rajoitus toteutettiin virtausnopeutta rajoittavalla funktiolla, joka muodostettiin tulppavirtauksen virtausnopeuksien suurimmilla arvoilla. Kuva 20 esittää kaavan 5.3 sovitusta tulppavirtauksen suurimpiin virtausnopeuden arvoihin. Sovituksen tuloksena saatiin virtausnopeuden rajoitusfunktio. Sovitus tehtiin työn jokaiselle putkikoolle. Yhtälöllä 5.3 rajoitettiin myös laskennan virtausnopeus ns. epämääräisellä alueella. Epämääräinen alue sisältää virtauksen laminaarisen alueen ja siirtymäalueen. Epämääräisen alueen ylärajalla massa fluidisoituu, minkä vuoksi tarvitaan rajoitus estämään virtauksen ylivoimaisuutta.

$$V_{max} = K_1 C^\sigma \quad (5.3)$$



Kuva 20. Erään putkikoon maksimivirtauksen määrittelyfunktio.

Tässä opinnäytetyössä luotuja korrelaatioita voidaan verrata aikaisemmin kirjallisuudessa julkaistuihin. Luotuja korrelaatiota voidaan verrata *TIP 0410-14* kaavoihin, Duffyn kemiallisen massan korrelaatioon 4.4 sekä tulppavirtauksen teoreettiseen kaavaan 4.10. Kaikki edellä mainitut ovat kuitenkin yleistettyjä esityksiä, joissa vakiot ovat kiinteitä. Vakioden vertailun perusteella voidaan todeta Pumppujen pumppu -ohjelman painehäviötietojen olevan samassa linjassa muiden julkaisujen kanssa. Yhteenvetona julkaistujen korrelaatioiden vakioden vertailusta voidaan sanoa Duffyn korrelaation pystyvän mallintamaan painehäviöt alle DN 150 putkissa, *TIP 0410-14* käsikirjan korrelaatiot voivat toimia korkeintaan kokoon DN 250 asti, kuten myös teoreettinen kaava 4.10. Pumppujen pumppu -ohjelmasta luodut korrelaatiot poikkeavat vakioden suhteen putkikoilla DN 250 - DN 500 kaikista aikaisemmin julkaistuista korrelaatioista.

5.4 Laskentataulukoiden todennukset

Ennen laskentataulukoiden käyttöönottoa niiden toimivuus oli todennettava. Todennus toteutettiin vertailemalla Pumppujen pumppu -ohjelmasta saatuja tuloksia laskentataulukoihin. Todennuksessa saadut vertailuarvot löytyvät työn liitteistä 7 - 9. Paperimassan tapauksessa todennus tehtiin huomattavasti laajempaan kuin veden kaltaisille aineille. Paperimassalle todennus tehtiin jokaiselle putkikoolle kolmessa eri pisteessä kolmella eri sakeudella. Vertailuun satunnaisesti valitut kaksi ensimmäistä pistettä sijaitsivat tulppavirtauksen alueella ja kolmas ns. epämääräisellä alueella. Näiden kolmen pisteen avulla pystyttiin varmistamaan korrelaation oikeellisuus ja epämääräisen alueen painehäviön oikea suuruus. Paperimassan osuuden käänös onnistui todella hyvin, mikä voidaan todeta todennusasiakirjasta, joka on liitteissä 8 ja 9. Tulppavirtauksella käänöksen ja alkuperäisen ohjelman välillä erot ovat prosenttien luokkaa, mutta korrelaatioista löytyy myös yksittäisiä pisteitä, joissa erot käänöksen ja alkuperäisen ohjelman välillä ovat muutamia prosentteja. Painehäviöiden sovittaminen epämääräiselle alueelle vastaamaan alkuperäistä ohjelmaa vaati pientä painehäviöiden hienosäätöä, minkä vertailuasiakirja osoittaa onnistuneen hyvin. Todennukseen ei otettu mukaan alle prosenttien sakeuksia, koska varsinkin suurien putkien tapauksissa sakeuksilla 0,5...0,8 % painehäviöt olivat ajoittain epämääräisiä. Epämääräisyydet kuitenkin johtuivat painehäviöiden pyöristyksistä lähimpään metrin sadasosaan, minkä vuoksi useammalla virtausnopeudella saattoi olla sama painehäviö. Tiedoista luodut korrelaatiot oli tämän kaltaisissa tapauksissa sovitettava pistejoukon keskelle, kuitenkin hie-

man keskiarvon yläpuolelle. Pumppujen pumppu -ohjelman tuloksiin verrattaessa esiintyvä heitto voi olla muutaman vesipatsasmetrin sadasosan luokkaa.

Veden kaltaisten aineiden todennusasiakirja ei ole kovin laaja, mutta kuitenkin riittävä. Todennuksessa käytiin läpi työn toimeksiantajan yleiset mitoitusilanteet. Todennus suoritettiin veden viskositeetilla 0,8 cP ja viskoottisella aineella, jonka viskositeetti oli 100 cP. Haasteen todennukselle toi se, että Pumppujen pumppu -ohjelmassa ei ollut mahdollista vaihtaa putken karheutta vaan karheus oli aina samansuuruinen. Koska karheus pysyi kokoajan samana, ei ohjelmassa kerrottu käytettyä karheuden suuruutta. Kuitenkin karheuden voidaan olettaa olevan määritetty ohjelmaan uuden hitsatun putken mukaan. Karheus uudella hitsatulla putkella on luokkaa 0,1...0,05 mm. Laskentakaavojen tulosten vertailussa käytettiin molempia ääripäitä ja 0,1 mm havaittiin olevan vaihtoehtoista lähimpänä ohjelmaan määritettyä putken karheutta. Tämän jälkeen tehtiin varsinainen todennus normaalien mitoitusilanteiden mukaan. Kaavojen vertailussa havaittiin myös toimeksiantajan havaitsema tapaus, jossa laskentakaavan vaihtuessa nostokorkeuslaskelman tulos muuttui merkittävästi. Löytämässäni tapauksessa nostokorkeuslaskelman tulos kasvoi laskentakaavan vaihtuessa ilman loogista syytä noin 1000 m, kun Excel-laskenta puolestaan antoi tulokseksi tasaisen nostokorkeuden nousun, mikä vaikutti huomattavasti loogisemmalta tulokselta. Normaalien mitoitusilanteiden vertailu löytyy liitteestä 7 ja sen tulokset osoittavat putken suhteellisen karheuden 0,1 mm olevan oikea laskentakarheus Pumppujen pumppu -ohjelmassa. Tehty vertailu osoittaa ohjelman käännöksen toimivan alkuperäisen ohjelman tavoin.

6 LASKENTATAULUKOT

6.1 Veden kaltaiset aineet

Veden kaltaisten aineiden laskentataulukko perustuu luvuissa 2 ja 3 käsiteltyyn perinteiseen virtausteoriaan. Laskentataulukko koostuu Lähtötietojen määritys -välilehdestä, Putkiosuustietojen -välilehdistä ja Laskentaraaportti -välilehdestä. Taulukko sisältää useita piilotettuja välilehtiä, jotka sisältävät mitoitukseen liittyvää laskentaa. Esimerkiksi jokaiselle putkijonalle on olemassa oma piilotettu laskentasisivunsa.

6.1.1 Lähtötietojen määrittäminen

Lähtötietojen määrittäminen -välilehdelle määritetään tarpeelliset lähtötiedot laskentaa varten ja putkistoon kuuluvat laitteet. Oletusarvoisesti taulukko käyttää laskennassa 0 - 100 °C asteista vettä. Ohjelma sisältää funktion, joka on määritetty antamaan vedelle kyseisellä välillä lämpötilan mukaisen tiheyden ja viskositeetin. Jos ohjelmalla halutaan laskea yli 100 °C asteista vettä tai toista nestettä, on lähtösivulle määritettävä nesteen lämpötila, tiheys ja viskositeetti. Lähtötietoihin on määritettävä myös virtauksen luonne. Jos virtaus on tasainen, määritetään luonteen arvoksi 1. Nestettä pumpattaessa mäntäpumpulla virtaus muuttuu tasaisesta sykkiväksi, jolloin painehäviöt on kerrottava piillä. Sykkivällä virtauksella valitaan pudotusvalikosta luonteeksi pii. Laskentataulukon lähtötietovälilehti löytyy liitteestä 2. Lähtötietovälilehdellä määritetään väliaineen ominaisuudet, käytettävät putkiosuudet ja muut nostokorkeuslaskelmaan liittyvät muuttujat:

- Lämpötila
- Tiheys
- Dynaaminen viskositeetti
- Lämpötilaa vastaava höyrynpaine
- Painetasot
- Korkeustasot
- Pumpun NPSH-luku
- Virtauksen luonne (1 tai π)
- Verkoston säätöventtiili
- Muut laitteet

6.1.2 Putkiosuustiedot

Laskentataulukko sisältää mahdollisuuden laskea samanaikaisesti kuutta eri putkiosuutta. Laskenta tapahtuu täyttämällä putkiosuustiedot laskettavan putken välilehdelle. Liite 3 sisältää yhden putkiosuuden täyttövälilehden. Tarvittavia lähtötietoja ovat:

- Putken sisähalkaisija
- Putken karheus

- Virtaus määrä
- Putkilinjan pituus

Putkiosuuden sisältäessä suunnanmuutoksia, venttiilejä tai muita häviöitä aiheuttavia linjaan kuuluvia osia määritetään ne kyseiselle välilehdelle.

6.1.3 Raportti

Raporttivälilehti sisältää putkistolaskennan tulokset. Raportti sisältää laskennan kannalta olennaiset lähtötiedot ja putkiston häviötiedot. Raportti on huoliteltu dokumentti, joka voidaan luovuttaa asiakkaalle. Raportti on A4-paperiarkin kokoinen. Liite 4 sisältää luonnoksen raportista.


6.1.4 Taulukon käyttöesimerkki: lauhdepumpun nostokorkeuden mitoitus

Lauhdutusvoimalaitoksen höyryturbiinin matalapaineinen höyry lauhdutetaan voimalaitoksen merivesilauhduttimessa. Lauhduttimen lauhde on kylläistä 30 °C asteista vettä. Lauhde pumpataan lauhduttimelta syöttövesisäiliöön, jonka lämpötila on 120 °C. Syöttövesisäiliön vesi on kylläisessä tilassa. Syöttövesisäiliön vedenpinta sijaitsee 6 m pumpun yläpuolella ja lauhduttimen pinta 2 m pumpun yläpuolella.

Taulukko 1. Lauhdepumpun nostokorkeuslaskelman lähtötiedot

Lähtötiedot	Lauhdepumpun nostokorkeuslaskelma
Lauhdutin	T = 30 °C P = 0,042 bar
Kaksivaiheinen esi-lämmitinkokonaisuus	T _{sisään} = 30 °C T _{ulos} = 105 °C Q _{lisäys} = 23 l/s Δp = 3,6 bar
Syöttövesisäiliö	P = 1,985 bar T = 120 °C
Imuputki	Q = 130 l/s Putkikoko DN 300 (d = 318,9 mm) Putkipituus 5 m 1 kpl säiliön ulostuloja
Putkiosuus 1	Q = 130 l/s Putkikoko DN 300 (d = 318,9 mm) Putkipituus 30 m 1 kpl kartiolaajennuksia 4 kpl 90° käyrää 2 kpl istukkaventtiilejä
Putkiosuus 2	Q = 153 l/s Putkikoko DN 350 (d = 350,6 mm) Putkipituus 20 m 1 kpl kartiolaajennuksia 2 kpl 90° käyrää 1 kpl säiliön sisäänvirtauksia 1 kpl istukkaventtiilejä

Kuvat 21 ja 22 sisältävät lähtötietojen määrittelyn ja laskennan lopputuloksen.

 Putkiston mitoituslaskelma

Väliaineet:
Veden kaltaiset nesteet

Projektin tiedot

Asiakas	
Projekti	
Nimitys	
Pumpun positio	
Väliaine	
Laatija	

Lähtötiedot

Lämpötila (vesi)	$0 \leq T \leq 100$	30	°C
Lämpötila	Vapaa-arvo		°C
Tiheys (vesi)		998,5	kg/m ³
Tiheys	Vapaa-arvo		kg/m ³
Dynaaminen viskositeetti (vesi)	$0 \leq T \leq 100$	0,000823423	kg/(m*s)
Dynaaminen viskositeetti	Vapaa-arvo		kg/(m*s)
Kinemaattinen viskositeetti	$0 \leq T \leq 100$	8,27168E-07	m ² /s
Lämpötilaa vastaava höyrynpaine		4,3	kPa
Virtauksen luonne		1	
Imusäiliön paine		0,4	m
Korkeustaso (imupuoli)	0-taso pumpussa	2	m
Korkeustaso (painepuoli)		6	m
Vastapaine		22,25	m
Pumpun NPSH		0	m
Laitoksen NPSH		12,2	OK

Laskennan putkiosuudet

<input checked="" type="checkbox"/>	Imuputki	<input type="checkbox"/>	Putkiosuus 3
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 1	<input type="checkbox"/>	Putkiosuus 4
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 2	<input type="checkbox"/>	Putkiosuus 5

Laitteet

	kpl	Painehäviö	
Säätöventtiili	0	1	Bar
Esilämmitinkokonaisuus	1	3,6	Bar
	0		Bar
	0		Bar
	0		Bar

Kuva 21. Laskennan lähtötiedot.

	Imu	Osuus 1	Osuus 2		
Putken sisähalkaisija [mm]	318,9	318,9	350,6		
Putkilinjan pituus [m]	5	30	20		
Virtaus määrä [l/s]	130	130	153		
Virtausnopeus [m/s]	1,63	1,63	1,58		
Kokonaispainehäviö [m]	0,1	1,6	0,9		
Omat painehäviöt [m]	0,0	0,0	0,0		
Nostokorkeus				Paine	
Imusäiliön paine [m]	0,4			Imusäiliön paine [Bar]	0,0
Vastapaine [m]	22,3			Vastapaine [Bar]	2,2
Staattinen korkeusero [m]	4,0			Staattinen paine [Bar]	0,4
Painehäviö [m]	2,6			Painehäviö [Bar]	0,3
Säätöventtiili [m]	0,0			Säätöventtiili [Bar]	0,0
Muut laitteet [m]	36,9			Muut laitteet [Bar]	3,6
Yhteensä	65,3			Yhteensä	6,4

Kuva 22. Putkiosuustiedot ja nostokorkeuslaskelma.

6.2 Paperimassa

Paperimassan laskentataulukko perustuu Pumppujen pumppu -ohjelman empiirisiin tietoihin ja osittain luvun 2 virtusteoriaan. Taulukolla voidaan mitoittaa painehäviöitä tulppavirtaukselle ja tulppavirtauksen jälkeisille alueille mitoituksen kuitenkin rajoit- tuessa paperimassan fluidisaatioon. Tulppavirtauksen painehäviöiden laskenta perus- tuu Pumppujen pumppu -ohjelmasta määritettyihin korrelaatioihin. Tulppavirtauksen jälkeisten alueiden laskenta puolestaan perustuu tulppavirtauksen suurimman paine- häviön käyttöön painehäviön approksimaationa aina paperimassan fluidisoitumiseen asti. Paperimassan laskentataulukko koostuu Lähtötietojen määritys -välilehdestä, Putkiosuus -välilehdestä ja Laskentaraportti -välilehdestä. Laskentataulukko on raken- nettu ulkoasultaan ja toiminnaltaan mahdollisimman samankaltaiseksi kuin veden kal- taisten aineiden. Paperimassan laskentataulukko sisältää veden kaltaisten aineiden tau- lukon tapaan piilotettuja laskentavälilehtiä.

6.2.1 Lähtötietojen määritys

Välilehdelle määritetään tarpeelliset lähtötiedot laskentaa varten sekä putkistoon kuu- luvat laitteet. Lähtötietovälilehti löytyy liitteestä 5. Tarvittavat lähtötiedot laskennalle ovat:

- Lämpötila
- Lämpötilaa vastaava höyrynpaine
- Massalaatu
- Sakeus
- Painetasot
- Korkeustasot
- Pumpun NPSH-luku
- Verkoston säätöventtiili
- Muut laitteet

6.2.2 Putkiosuustiedot

Laskentataulukko sisältää mahdollisuuden laskea yhtäaikaisesti useita putkia, joiden osuustiedot täytetään omille sivuilleen. Tarvittavia lähtötietoja ovat:

- Korrelaatio
- Putken sisähalkaisija
- Virtaama
- Putkilinjan pituus

Putkiosuuden sisältäessä suunnanmuutoksia, venttiilejä tai muita häviöitä aiheuttavia linjaan kuuluvia osia määritetään ne Putkiosuustiedot -välilehdellä. Massalla laskettaessa käytetään kertahäviöiden sijasta kertavastusten määrittämisessä ekvivalentteja putkipituuksia. Yksi ekvivalentti putkipituus vastaa yhden metrin lisäystä laskettavan putkiosuuden kokonaispituuteen. Kertavastuksia määrittäessä on valittava putkiosuuden virtausnopeutta vastaava ekvivalentti putkipituus. Valinta tapahtuu valitsemalla virtausnopeuden pudotusvalikosta laskentatilannetta lähimpänä oleva virtausnopeuden arvo. Putkiosuuden laskennassa käytettävä korrelaatio valitaan putken nimellimitan perusteella. Valittaessa esimerkiksi ulkomitaksi DN 150 käyttää ohjelma Pumppujen pumppu -ohjelmasta kyseisellä ulkomitalla määritettyä painehäviökorrelaatiota. Putken sisämitta voidaan valita tapauskohtaisesti eikä ohjelma ole sidottu yhteen putken sisämittaan. Korrelaation määrittämisessä käytetty putkikoko löytyy referenssinä putken sisämitan solun vierestä. Yksi putkiosuusvälilehdestä löytyy liitteestä 6.

6.2.3 Raportti

Raporttivälilehti sisältää putkistolaskennan tulokset. Raportti sisältää laskennan kannalta olennaiset lähtötiedot, putkiston painehäviöt ja pumpun nostokorkeuslaskelman. Raportti on huoliteltu dokumentti, joka voidaan luovuttaa asiakkaalle. Luonnos paperimassan raportista löytyy liitteestä 7.


6.2.4 Taulukon käyttöesimerkki: massanpumppaus levyjauhimelle ja varastosäiliöön

Paperitehtaan massasäiliössä pumpataan sakeudeltaan 5 %:sta sulfaattia levyjauhimelle ja jauhattuna uuteen varastosäiliöön. Massan jauhaminen ei kasvata painehäviöiden suuruutta. Lähtösäiliön pinnankorkeus on tapauksessa 8 m pumpun yläpuolella ja tulosaäiliön pinnankorkeus on 5 m. Molemmat säiliön pinnat voivat vaihdella. Linjan säätöventtiili aiheuttaa laskentatapauksessa 2 bar painehäviön ja levyjauhimen terien kuluneisuus 0,9 bar painehäviön. Levyjauhin tarvitsee tulopuolelle 1 bar paineen toimiakseen. Levyjauhimen tulopaineen säätö tehdään säätöventtiilillä.

Taulukko 2. Massapumpun nostokorkeuslaskelman putkiosuustiedot

Lähtötiedot	Massapumpun nostokorkeuslaskelma
Imuputki	Q = 55 l/s Putkikoko DN 200 (d = 215,1 mm) Putkipituus 4 m
Putkiosuus 1	Q = 55 l/s Putkikoko DN 150 (d = 164,5 mm) Putkipituus 13 m 2 kpl 90° käyrää
Putkiosuus 2	Q = 55 l/s Putkikoko DN 150 (d = 164,5 mm) Putkipituus 20 m 3 kpl 90° käyrää

Kuvat 23 ja 24 sisältävät lähtötietojen määrittelyn ja laskennan lopputuloksen.

		Putkiston mitoitusaulukko	
		Väliaine: Päpönimassa	
Projektin tiedot			
Asiakas			
Projekti			
Nimitys			
Pumpun positio			
Laatija			
Laskennan lähtötiedot			
Lämpötila		30	°C
Lämpötilaa vastaava höyrynpaine		4,3	kPa
Laatukerroin	Sulfaatti	0,9	
Sakeus	$0,5 \leq C \leq 5,5$	5	%
Imusäiliön paine		0	m
Korkeustaso (imupuoli)	0-taso pumpussa	8	m
Korkeustaso (painepuoli)		5	m
Vastapaine		0	m
Pumpun NPSH		0	m
Laitoksen NPSH		16,8	OK
Laskennan putkiosuudet			
<input checked="" type="checkbox"/>	Imuputki	<input type="checkbox"/>	Putkiosuus 3
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 1	<input type="checkbox"/>	Putkiosuus 4
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 2	<input type="checkbox"/>	Putkiosuus 5
Laitteet			
		kpl	Painehäviö
Säätöventtiili		1	2 Bar
Levijauhimen kuluneet terät		1	0,9 Bar
		0	Bar
		0	Bar
		0	Bar

Kuva 23. Massanpumpun lähtötiedot

	Imu	Osuus 1	Osuus 2		
Putkikoko	DN200	DN150	DN150		
Putken sisähalkaisija [mm]	215,1	164,5	164,5		
Putkilinjan pituus [m]	4	13	20		
Ekvivalentti putkipituus [m]	0	1	1,5		
a ekvivalentti putkipituus [m]	0	0	0		
Virtaus määrä [l/s]	55	55	55		
Virtausnopeus [m/s]	1,5	2,6	2,6		
Painehäviö [m]	1,1	5,4	8,2		
Nostokorkeus				Paine	
<i>Imusäiliön paine [m]</i>	0,0			<i>Imusäiliön paine [Bar]</i>	0,0
<i>Vastapaine [m]</i>	0,0			<i>Vastapaine [m]</i>	0,0
<i>Staattinen korkeusero [m]</i>	-3,0			<i>Staattinen paine [Bar]</i>	-0,3
<i>Painehäviö [m]</i>	14,7			<i>Painehäviö [Bar]</i>	1,4
<i>Säätöventtiili [m]</i>	20,5			<i>Säätöventtiili [Bar]</i>	2,0
<i>Muut laitteet [m]</i>	9,2			<i>Muut laitteet [Bar]</i>	0,9
Yhteensä	41,4			Yhteensä	4,0

Kuva 24. Putkiosuustiedot ja nostokorkeuslaskelma.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda tarkasti Pumppujen pumppu -ohjelmaa mallintavat laskentataulukot ja perehtyä painehäviöiden syntyyn paperimassan putkistovirtauksessa. Laskentataulukoiden luominen onnistui hyvin. Tämä voidaan todeta liitteistä 7 - 9, jotka sisältävät vertailun alkuperäiseen ohjelmaan. Luodut laskentataulukot vastaavat ominaisuuksiltaan alkuperäistä ohjelmaa. Ohjelman käänös on myös mahdollistanut uusien ominaisuuksien lisäämisen. Uusi laskentasovellus on myös mielestäni sujuvampi käyttää, koska alkuperäisessä ohjelmistossa käyttö oli mahdollista vain näppäimistön kautta. Alkuperäisessä ohjelmassa muutoksien tekeminen laskentaan oli ensimmäisen laskukerran jälkeen turhankin työlästä, laskennan raportin tulostamisesta puhumattakaan. Pumppujen pumppu -ohjelmaan perustuvien laskentataulukoiden luonti, ja erityisesti paperimassan osuus, on ollut melko työläs prosessi ja vaatinut paljon taustatyötä. Lähtötilanne opinnäytetyölle oli se, että minulla oli laskentaohjelma, mutta ei hajuakaan siitä, kuinka se toimii. Teknisesti työn toteutus ollut haasteellista mutta myös hyvin palkitsevaa, koska olen päässyt opettelemaan paljon uutta kuten mm. ohjelmien linkitystä toisiinsa.

Työssä tutkimani kirjallisuus on osittain melko vanhaa, koska uusia tutkimustuloksia paperimassan painehäviöistä ei ole julkaistu. Voisinkin olettaa alan kaupallistuneen niin paljon, että tutkimustulokset pysyvät visusti laitostoimittajien käsissä eikä niitä haluta juuri julkaista, koska massan painehäviöiden tutkiminen on hyvin kallista. Vielä nykypäivänä painehäviöiden mitoitus perustuu vanhoihin jopa 1930-luvulla tehtyihin mittauksiin. Kirjallisuutta tutkiessani olen päässyt siihen tulokseen, että Ahlströmin Massan pumppaus tutkimus on ehkä luotettavin lähde painehäviöiden mitoitukselle, vaikka sekin on osittain yksinkertaistettu esitys. Käsikirja Tappi TIP 0410-14 on ymmärtääkseni maailmalla paljon käytetty, mutta hyvin konservatiivinen mitoituksen suhteen. Henkilökohtaisesti tiedän, että Ahlströmin käsikirjaan perustuvan ohjelmiston avulla on toteutettu massaputkistojen mitoituksia useisiin paperitehtaisiin vuosien saatossa, joten mitoituksessa kääntyisin kyseisen käsikirjan puoleen TIP 0410-14 sijasta. Ahlströmin käsikirjan tarkemmilla painehäviötiedoilla on mahdollista saavuttaa pienemmät massanpumppauskustannukset.

LÄHTEET


1. Huhtanen, J.-P. 2004: *Modeling of Fiber Suspension Flows in Refiner and Other Papermaking Processes by Combining Non-Newtonian Fluid Dynamics and Turbulence*. Doctoral Dissertation. Tampere: Tampere University of Technology.
2. White, F. M. 1994: *Fluid Mechanics*. Third Edition. New York: McGraw - Hill.
3. Hammarström, D. 2004: *A Model for simulation of fiber suspension flows*. Licentiate Dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology.
4. Huhtanen, J.-P. 1998: *Non-Newtonian Flows in Paper making*. Licentiate Dissertation. Tampere: Tampere University of Technology.
5. Duffy, G. G. 2003: The significance of mechanistic-based models in fibre suspension flow. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, Vol. 18, no. 1.
6. Sulzer Pumps Ltd. 2008: *Sulzer Pumps Centrifugal Pump Handbook*. Second Edition. Oxford: Elsevier.
7. Streeter, V. L., Wylie, B. E., Bedford, K. W. 1998: *Fluid Mechanics*. Ninth Edition. Boston: WCB/McGraw-Hill.
8. Descal Engineering Oy:n materiaali. Ei saatavissa.
9. Retulainen, E., Niskanen, K., Nilsen, N. 1998: Fibers and bonds. Teoksessa Niskanen, K. (toim.), *Papermaking Science and Technology, Book 16, Paper Physics*. Helsinki: Fapet Oy.
10. Derakhshandeh, B., Kerekes, R., J., Hatzikiriakos, S., G. 2011: Rheology of pulp fibre suspension: A critical review. *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, no. 15.
11. Kerekes, R. J. 2006: Rheology of fibre suspensions in papermaking: An overview of recent research. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, Vol. 21, no. 5.
12. Myreen, B. 1989: Modelling the flow of pulp suspensions in pipes. Part1. *Paperi ja Puu*, no 5/1989.
13. Torsten, P., Duffy, G., Chen, D. 2001: New insights into the flow of pulp suspensions. *TAPPI Peer-Reviewed Papers/ Solutions! for People, Processes and Paper*. Tappi.
14. Duffy, G. G. 2006: Measurements, mechanisms and models: Some important insights into the mechanisms of flow of fibre suspensions. *In Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Vol. 14.
15. Derakhshandeh, B. 2011: *Rheology of low to medium consistency pulp fibre suspensions*. Partial fulfillment of doctoral dissertation. Vancouver: The University Of British Columbia.

16. Kujala, J., Horo, K., Koistinen, T., Niskanen, T. 1983: *Massan pumppaus*. 3. painos. Ahlström: Karhulan pumpputehdas..
17. Kerekes, R. J., Schell, C. J. 1992: Characterization of fibre flocculation regimes by a crowding factor. *Journal of Pulp and Paper Science*, Vol. 18, no. 1.
18. Celzard, A., Fierro, V., Kerekes, R. 2009: Flocculation of cellulose fibres: new comparison of crowding factor with percolation and effective-medium theories. *Cellulose*, Vol. 16, no. 6.
19. Chirat, C., Hostachy, J.-C., Paloniemi, J., Pelin, K., Pohjanvesi, S., Norden, S., Vesala, R., Wennerström, M. 2011: Bleaching. Teoksessa Fardim, P. (toim.), *Papermaking Science and Technology, Book 6, Chemical Pulping Part1, Fibre Chemistry and Technology*, Second Edition. Porvoo: Paperi ja Puu Oy.
20. Generalized method for determining the pipe friction loss of flowing pulp suspensions 2012: *TAPPI Technical Information Papers*, TIP 0410-14, Tappi.
21. Lehtinen, A., Ilmoniemi, E., Wahren, D., Koskimies, J. 1983: Puukuitujen käyttäytyminen vesilietteessä. Teoksessa Arjas, A. (toim.), *Paperin Valmistus, Suomen Paperi-insinöörien Yhdistyksen oppi- ja käsikirja 3, osa 1*. 2. painos. Turku: Suomen Paperi-insinöörien Yhdistys.
22. Lindsay, J., Gullichsen, J. 1994: Pulp Pumping and Hydraulics, Pulp Bleaching – Principles and Practice. *IPST Technical Paper Series Number 524*. Atlanta: Georgia Institute of Technology.
Saataavissa:
<https://smartech.gatech.edu/handle/1853/3352>
[viitattu 20.11.2013]
23. Jäsberg, A. 2007: *Flow Behaviour of Fibre Suspensions in Straight Pipes: New Experimental Techniques and Multiphase Modeling*. Doctoral Dissertation. Jyväskylä: University of Jyväskylä.
24. Duffy, G. G. 1972: *A study of the flow properties of New Zealand wood pulp suspensions*. Doctoral Dissertation: Auckland: The University of Auckland.
25. Moller, K. 1972: *The plug flow of paper pulp suspensions*. Doctoral Dissertation. Auckland: The University of Auckland.
26. Duffy, G. G., Moller, K., Lee, P. F. W., Milne, S. W. A. 1974: Design correlation for groundwood pulps and the effects of minor variables on pulp suspension flow. *Appita*, Vol. 27, no. 5.
27. Ventura, C., Garcia, F., Ferreira, P., Rasteiro, M. 2008: Flow dynamics of pulp fiber suspensions. *Tappi Journal*, August.
28. Duffy, G. G., Titchener, A. L. 1974: Design procedures for obtaining pipe friction loss for chemical pulps. *Tappi Journal*, Vol. 57, no. 5.
29. Soszynski, R. 1991: The plug flow of fiber suspensions in pipes. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, Vol. 6, no. 3.

30. Salmen, L., Lucander, M., Härkönen, E., Sundholm, J. 1998: Fundamentals of mechanical pulping. Teoksessa Sundholm, J. (toim.), *Papermaking Science and Technology, Book 5, Mechanical Pulping*. Helsinki: Fapet Oy.
31. Huusaari, E. 1998: Refining of shives and coarse fibers. Teoksessa Sundholm, J. (toim.), *Papermaking Science and Technology, Book 5, Mechanical Pulping*. Helsinki: Fapet Oy.
32. Moller, K., Norman, B. 1975: Calming lengths in pulp suspension flow. *Svensk papperstidning*, Vol 78, no. 16.
33. Moller, K., Duffy, G. G., Titchener, A. L. 1971: The laminar plug flow regime of paper pulp suspensions in pipes. *Svensk papperstidning*, Vol. 74, no. 24.
34. Day, M. 2000: *Pump TDH Calculation in Medium Consistency Pump Systems*. Gould Pumps.
Saatavissa:
<http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Flocator.gouldspumps.com%2FpumpTDHcalcmediumconsistencypump-sys.html&ei=KB68Up39DtHU4QS8IYGIAw&usg=AFQjCNGJxgh1TmSBy6AryUvesOOEYgKtoQ&bvm=bv.58187178,d.bGE>
[viitattu 26.12.2013].
35. Karinkanta, K. 2007: *Puukuitususpension putkivirtauksen virtausprofiilin symmetrisyys ja sen turbulenttisen alueen mallintaminen*. Pro Gradu -tutkielma. Jyväskylä: Jyväskylän Yliopisto.
36. Jäsberg, A., Raiskinmäki, P., Kataja, M. 2008: Rheology and Flow Behaviour of Fibre Suspensions. Teoksessa Kataja, M. (ed.), *Rheological materials in process industry. ReoMaT Final Report*. Espoo: VTT.

LIITTEET

- Liite 1. Veden kaltaiset nesteet - Lähtötiedot -välilehti
- Liite 2. Veden kaltaiset nesteet - Putkiosuus -välilehti
- Liite 3. Veden kaltaiset nesteet - Raportti -välilehti
- Liite 4. Paperimassa - Lähtötiedot -välilehti
- Liite 5. Paperimassa - Putkiosuus -välilehti
- Liite 6. Paperimassa - Raportti -välilehti
- Liite 7. Veden kaltaisten aineet -taulukon toimivuuden todennus
- Liite 8. Paperimassataulukon toimivuuden todennus 1/2
- Liite 9. Paperimassataulukon toimivuuden todennus 2/2

		Putkiston mitoituslaskenta	
		Väliaineet: <i>Veden kaltaiset nesteet</i>	
Projektin tiedot			
Asiakas			
Projekti			
Nimitys			
Pumpun positio			
Väliaine			
Laatija			
Lähtötiedot			
Lämpötila (vesi)	$0 \leq T \leq 100$	30	°C
Lämpötila	Vapaa-arvo		°C
Tiheys (vesi)		995,5	kg/m ³
Tiheys	Vapaa-arvo		kg/m ³
Dynaaminen viskositeetti (vesi)	$0 \leq T \leq 100$	0,000823423	kg/(m*s)
Dynaaminen viskositeetti	Vapaa-arvo		kg/(m*s)
Kinemaattinen viskositeetti	$0 \leq T \leq 100$	8,27168E-07	m ² /s
Lämpötilaa vastaava höyrynpaine		4,3	kPa
Virtauksen luonne		1	
Imusäiliön paine		0	m
Korkeustaso (imupuoli)	0 -taso pumpussa	0	m
Korkeustaso (painepuoli)		0	m
Vastapaine		6	m
Pumpun NPSH		0	m
Laitoksen NPSH		8,3	OK
Laskennan putkiosuudet			
<input checked="" type="checkbox"/>	Imuputki	<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 3
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 1	<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 4
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 2	<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 5
Laitteet			
		kpl	Painehäviö
Säätöventtiili		0	1 Bar
		0	2 Bar
		0	Bar
		0	Bar
		0	Bar

Paineenmuunnin	
2	Bar
20,5	m/neste



Putkiston mitoitustaulukko

Väliaineet:
Veden kaltaiset nesteet

Imuputki			
Putken sisähalkaisija		200	mm
Putken karheus	Info	0,1	mm
Virtaus		0	l/s
Virtausnopeus		0,00	m/s
Putkiliinjan pituus		1000	m
Reynolds		0	Lam

Kertavastuksia suunnanmuutoksista				
Kaarre				
		kpl	Ref ξ	ξ
90° kaarre		0	0,5	0,5
45° kaarre		0	0,3	0,3
T -kappale				
	A2 = A3 = A1	kpl	Ref ξ	ξ
Suora virtaus		0	1	1
Kääntävä virtaus		0	1,5	1,5
Haarautuva virtaus		0	1,4	1,4

Kertavastuksia koonmuutoksesta				
Säiliö				
		kpl	Ref ξ	ξ
Ulosvirtaus		0	0,5	0,5
Sisäänvirtaus		0	1	1
Kartio				
		kpl	Ref ξ	ξ
Laajennus		0	0,3	0,3
Supistus		0	0,8	0,8

Omat kertavastukset				
		kpl	Ref ξ	ξ
		0		1
		0		
		0		
		0		
		0		
		0		
		0		
		0		
		0		

Kertavastuksia venttiileistä				
Palloventtiili				
		kpl	Ref ξ	ξ
Täysi aukko		0	0,1	0,1
Supistettu aukko		0	0,8	0,8
Läppäventtiili				
		kpl	Ref ξ	ξ
		0	1,5	1,5
Istukkaventtiili				
		kpl	Ref ξ	ξ
Suora istukka		0	4	4
Vinoistukka		0	0,6	0,6
Takaiskuventtiili				
		kpl	Ref ξ	ξ
Läppä		0	1,2	1,2
Istukka		0	5	5
Luistinventtiili				
		kpl	Ref ξ	ξ
Kiila		0	0,3	0,3
Levy		0	0,3	0,3



Putkiston laskentaraaportti

Väliaineet:

Veden kaltaiset nesteet

Päivämäärä 8.3.2014

Asiakas 0

Projekti 0

Nimitys 0

Pumpun positio 0

Lestiji 0

Väliaine 0

Virtauksen luonne 1

Lämpötila [°C] 30

Tiheys [kg/m³] 995

Viskositeetti [kg/(m*s)] 0,0008

	Imu	Osuus 1	Osuus 2	Osuus 3	Osuus 4	Osuus 5
Putken sisähalkaisija [mm]	200	30	30	30	30	30
Putkiliinjan pituus [m]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Virtaus määrä [l/s]	0	0	0	0	0	0
Virtausnopeus [m/s]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Koko nsipainehäviö [m]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Omat painehäviöt [m]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Nostakorkeus

Imusäiliön paine [m] 0,0

Vastapaine [m] 0,0

Staattinen korkeusero [m] 0,0

Painehäviö [m] 0,00

Säätöventtiili [m] 0,0

Muut laitteet [m] 0,0

Yhteensä 0,0

Paine

Imusäiliön paine [Bar] 0,0

Vastapaine [Bar] 0,0

Staattinen paine [Bar] 0,0

Painehäviö [Bar] 0,0

Säätöventtiili [Bar] 0,0

Muut laitteet [Bar] 0,0

Yhteensä 0,0

Descal Engineering Oy

Kauppiamiehenkatu 4, 6. krs

Kotipaikka

Y-tunnus


45100 Kouvola

Kouvola

2024996-2

Puh. 044 500 5900

Fax.

		Putkiston mitoitustaulukko	
		Väliaine: <i>Paperimassa</i>	
Projektin tiedot			
Asiakas			
Projekti			
Nimitys			
Pumpun positio			
Laatija			
Laskennan lähtötiedot			
Lämpötila		30	°C
Lämpötilaa vastaava höyrynpaine		4,3	kPa
Laatukerros	Valkaisematon sulfitti	1	
Sakeus	$0,5 \leq C \leq 5,5$	5	%
Imusäiliön paine		0	m
Korkeustaso (imupuoli)	0 -taso pumpussa	0	m
Korkeustaso (painepuoli)		0	m
Vastapaine		0	m
Pumpun NPSH		0	m
Laitoksen NPSH		9,9	OK
Laskennan putkiosuudet			
<input checked="" type="checkbox"/>	Imuputki	<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 3
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 1	<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 4
<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 2	<input checked="" type="checkbox"/>	Putkiosuus 5
Laitteet			
		kpl	Painehäviö
Säätöventtiili		0	2 Bar
		0	1 Bar
		0	Bar
		0	Bar
		0	Bar



Putkiston mitoituslaskelma

Väliaine:
Paperimassa

Imuputki			
Putkikoko		DN80	
	Referenssi		
Putken sisähalkaisija	85,6	85,6	mm
Virtaus määrä		0	l/s
Virtausnopeus	Laminaarinen alue	0,00	m/s
Putkilinjan pituus		100	m

Kertavastuksia suunnanmuutoksista				
Kaarre		kpl	V [m/s]	ekvl. putkipituus [m]
90° käyrä		0	3	0,2
45° käyrä		0	0,5	0,2
T-kappale		kpl	V [m/s]	ekvl. putkipituus [m]
Suora virtaus (2 → 3)	A2 = A3 = A1	0	3	0,6
Kääntyvä virtaus (2 → 1)		0	0,5	0,2

Kertavastuksia koonmuutoksesta				
Koon muutos		kpl	V [m/s]	ekvl. putkipituus [m]
Laajennus (2X)		0	0,5	0,1
Supistus (2X)		0	2	0,2

Omat kertavastukset				
		kpl		ekvl. putkipituus [m]
		0		0,8
		0		
		0		
		0		

Kertavastuksia venttiileistä			
Palloventtiili		kpl	ekvl. putkipituus [m]
Täysi aukko		0	0,1
Supistettu aukko		0	0,8
Läppäventtiili		kpl	ekvl. putkipituus [m]
		0	1,5
Istukkaventtiili		kpl	ekvl. putkipituus [m]
Suora istukka		0	4
Vinoistukka		0	0,6
Takaiskuventtiili		kpl	ekvl. putkipituus [m]
Läppä		0	1,2
Istukka		0	5
Luistinventtiili		kpl	ekvl. putkipituus [m]
Killa		0	0,3
Levy		0	0,3



Putkiston laskentaraaportti

Väliaine:

Paperimassa

Päivämäärä 8.3.2014
 Asiakas 0
 Projekti 0
 Nimitys 0
 Pumpun positio 0
 Laittaja 0

Lämpötila [°C] 30
 Messuletku Valkaisematon sulfiitti
 Saakeus [%] 5

	Imu	Osuus 1	Osuus 2	Osuus 3	Osuus 4	Osuus 5
Putkikoko	DN80	DN100	DN500	DN100	DN100	DN250
Putken sisähalkaisija [mm]	85,6	111,1	111,1	111,1	111,1	269,7
Putkiliinjen pituus [m]	100	100	100	100	100	100
Ekvivalentti putkipituus [m]	0	0	0	0	0	0
Oma ekvivalentti putkipituus [m]	0	0	0	0	0	0
Virtausmäärä [l/s]	0	0	0	0	0	0
Virtausnopeus [m/s]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Painehäviö [m]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nostakorkeus			Paine			
Imusäiliön paine [m]	0,0				Imusäiliön paine [Bar]	0,0
Vastapaine [m]	0,0				Vastapaine [m]	0,0
Staatinnainen korkeusero [m]	0,0				Staatinnainen paine [Bar]	0,0
Painehäviö [m]	0,000				Painehäviö [Bar]	0,0
Säätöventtiili [m]	0,0				Säätöventtiili [Bar]	0,0
Muut laitteet [m]	0,0				Muut laitteet [Bar]	0,0
Yhteensä	0,0				Yhteensä	0,0

Descal Engineering Oy
 Kauppamiehenkatu 4, 6. krs
 Kotipaikka
 Y-tunnus

45100 Kouvola
 Kouvola
 2024996-2

Puh. 044 500 5900
 Fax.

Pumppujen pumppu -ohjelman Excel käänneksen oikeellisuuden todennus														Kertavastuksia ei huomioitu		12.3.2014			
vesi laskennan osuus														T = 30 °C		p = 995 kg/m ³		L = 1000 m	
D[mm] (sisä)	Q[l/s]	V [m/s]	Pumppu			viskoottinen aine - vesi			Excel			viskoottinen aine - vesi			vesi		viskoottinen aine		
			h[m] (0,80 cP)	h[m] (100 cP)	k[mm]	Ero[m]	Ero[%]	h[m] (0,82 cP)	h[m] (100 cP)	k[mm]	Ero[m]	Ero[%]	Ero[m]	Ero[%]	Ero[m]	Ero[%]	Ero[m]	Ero[%]	
50	2	1,02	27,27	133,56	?	106,3	389,8	27,5	133,5	0,1	106,0	385,5	0,2	0,8	-0,1	0,0			
	4	2,04	104,25	267,11		162,9	156,2	104,9	267,0		162,1	154,5	0,7	0,6	-0,1	0,0			
	6	3,06	230,72	400,67		170,0	75,7	231,8	400,5		168,7	72,8	1,1	0,5	-0,2	0,0			
	8	4,07	406,7	534,22		127,5	31,4	408,2	534,0		125,8	30,8	1,5	0,4	-0,2	0,0			
100	8	1,02	11,39	33,39		22,0	193,2	11,5	33,4		21,9	190,4	0,1	1,0	0,0	0,0			
	16	2,04	43,62	66,78		23,2	53,1	43,9	66,8		22,9	52,2	0,3	0,6	0,0	0,0			
	24	3,06	96,6	190,37		93,8	97,1	97,2	202,8		105,6	108,6	0,6	0,6	12,4	6,5			
	32	4,07	170,33	338,44		168,1	98,7	171,1	335,5		164,4	96,1	0,8	0,5	-2,9	-0,9			
200	32	1,02	4,83	8,35		3,5	72,9	4,9	8,3		3,4	69,4	0,1	1,4	0,0	-0,6			
	64	2,04	18,51	42,3		23,8	128,5	18,7	41,9		23,2	124,1	0,2	1,0	-0,4	-0,9			
	96	3,06	43,02	85,51		44,5	108,5	41,3	85,3		44,0	106,5	0,3	0,7	-0,2	-0,2			
	128	4,07	72,36	140,99		68,6	94,8	72,8	141,0		68,2	93,7	0,4	0,6	0,0	0,0			
400	128	1,02	2,07	5,27		3,2	154,6	2,1	5,2		3,1	147,6	0,0	1,4	-0,1	-1,3			
	256	2,04	7,95	17,45		9,5	119,5	8,0	17,6		9,6	120,0	0,0	0,6	0,2	0,9			
	384	3,06	17,64	35,37		17,7	100,5	17,8	35,8		18,0	101,1	0,2	0,9	0,4	1,2			
	512	4,07	31,12	58,57		27,5	88,2	31,3	59,3		28,0	89,5	0,2	0,6	0,7	1,2			

Pumppujen pumppu -ohjelman Excel käynnöksen oikeellisuuden todennus paperimassan osuus										6.3.2014	
Vertailun putkiosuuden pituus on 100m					Kertavastuksia ei ole huomioitu						
Laminaarinen alue					Epämääräinen alue						
	Excel	Pumppu				Excel	Pumppu				
DN80	Q [l/s]	h [m]	h [m]	Ero [m]	Ero (%)	Q [l/s]	h [m]	h [m]	Ero [m]	Ero (%)	
1%	0,5	1,19	1,2	-0,01	-0,8	4	1,63	1,59	0,04	2,5	
	1	1,5	1,5	0	0,0						
3%	1	13,5	13,54	-0,04	-0,3	9	22,63	22,7	-0,07	-0,3	
	4	21,37	21,35	0,02	0,1						
5%	3	53,93	53,95	-0,02	0,0	12	77,67	78,2	-0,53	-0,7	
	6	67,79	67,74	0,05	0,1						
DN100	1%	1	0,9	0,91	-0,01	-1,1	5	1,15	1,13	0,02	1,8
		1,5	1,05	1,05	0	0,0					
3%	2	10,48	10,43	0,05	0,5	9	17,1	17,08	0,02	0,1	
	5	14,44	14,42	0,02	0,1						
5%	2	29,13	28,97	0,16	0,6	20	60,46	60,46	0	0,0	
	6	42,79	42,74	0,05	0,1						
DN150	1%	2	0,54	0,55	-0,01	-1,8	7	0,74	0,75	-0,01	-1,3
		4	0,7	0,71	-0,01	-1,4					
3%	3	5,75	5,72	0,03	0,5	20	11,7	11,59	0,11	0,9	
	8	8,26	8,24	0,02	0,2						
5%	8	22,98	22,88	0,1	0,4	50	42,59	42,55	0,04	0,1	
	40	41,69	41,66	0,03	0,1						
DN200	1%	3	0,36	0,37	-0,01	-2,7	15	0,59	0,58	0,01	1,7
		8	0,55	0,56	-0,01	-1,8					
3%	2	2,79	2,83	-0,04	-1,4	45	9,77	9,76	0,01	0,1	
	26	8,21	8,24	-0,03	-0,4						
5%	10	15,29	15,37	-0,08	-0,5	90	36,43	36,31	0,12	0,3	
	40	27,38	27,39	-0,01	0,0						
DN250	1%	5	0,3	0,31	-0,01	-3,2	20	0,48	0,48	0	0,0
		12	0,45	0,45	0	0,0					
3%	20	5,11	5,1	0,01	0,2	80	7,99	8,01	-0,02	-0,2	
	50	7,65	7,64	0,01	0,1						
5%	20	14,19	14,16	0,03	0,2	150	29,66	29,7	-0,04	-0,1	
	100	28,81	28,8	0,01	0,0						

DN300											
1%	5	0,2	0,21	-0,01	-4,8	20	0,38	0,39	-0,01	-2,6	
	15	0,33	0,34	-0,01	-2,9						
3%	10	2,55	2,57	-0,02	-0,8	150	7,49	7,48	0,01	0,1	
	80	6,65	6,68	-0,03	-0,4						
5%	20	9,79	9,82	-0,03	-0,3	250	29,84	29,3	0,54	1,8	
	150	24,75	24,75	0	0,0						
DN350											
1%	10	0,22	0,23	-0,01	-4,3	30	0,35	0,35	0	0,0	
	22	0,33	0,33	0	0,0						
3%	20	2,86	2,86	0	0,0	200	6,43	6,43	0	0,0	
	100	6,1	6,09	0,01	0,2						
5%	50	12,26	12,21	0,05	0,4	300	25,09	24,84	0,25	1,0	
	200	23,53	23,45	0,08	0,3						
DN400											
1%	10	0,18	0,18	0	0,0	50	0,31	0,31	0	0,0	
	30	0,3	0,31	-0,01	-3,2						
3%	30	2,76	2,76	0	0,0	200	6,31	6,32	-0,01	-0,2	
	150	5,99	5,97	0,02	0,3						
5%	30	7,67	7,67	0	0,0	400	25,55	25,53	0,02	0,1	
	200	19,08	19,04	0,04	0,2						
DN500											
1%	10	0,13	0,13	0	0,0	40	0,26	0,26	0	0,0	
	30	0,22	0,23	-0,01	-4,3						
3%	100	3,74	3,77	-0,03	-0,8	300	5,47	5,49	-0,02	-0,4	
	200	5,33	5,35	-0,02	-0,4						
5%	100	10,34	10,41	-0,07	-0,7	500	22,43	22,39	0,04	0,2	
	400	20,98	20,96	0,02	0,1						