

Pumpun mitoittaminen paineen- tuottoyksikköön

Sami Vähätalo

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021

Konetekniikka
Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan koulutus
Älykkäät koneet

Vähätalo Sami
Pumpun mitoittaminen paineentuottoyksikköön

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Huhtikuu 2021

Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Lappeenrannassa sijaitsevan Flowrox Oy:n kanssa. Flowrox Oy:llä on käynnissä tuotekehitys painesuodattimelle, jonka lisälaitteeksi haluttiin paineenkorotusyksikkö. Paineenkorotusyksikön tehtävänä on nostaa tilavuusvirta riittävän suureksi, jotta painesuodattimessa oleva kangas pystytään pesemään. Painesuodattimessa on kiinnitettynä pesulaitteisto. Pesulaitteistossa on suuttimia, jotka tilavuusvirran kasvaessa tuottavat riittävän paineen kangasta kohti. Kankaalla on mahdollisuus tukkeutua, jos riittävää painetta ei pystytä tuottamaan. Opinnäytetyön tarkoituksena oli mitoittaa kyseiselle paineenkorotusyksikölle pumppu.

Työ toteutettiin tiiviissä yhteistyössä toimeksiantajan nimeämän ohjausryhmän kanssa. Ohjausryhmältä saatiin vaatimukset pumppausprosessille, kuten putkiston pituus sekä korkeusero. Putkiston aiheuttamat painehäviöt tuli laskea, jotta pystyttiin mitoittamaan asianmukainen pumppu. Pumppu on kiinnitetty laippaliitoksella kiinni vesisäiliöön, josta se imee vettä tuottaen suuren tilavuusvirran kankaalle.

Työn tuloksena löydettiin sopiva keskipakopumppu paineenkorotusyksikölle. Flowrox Oy pyrkii hyödyntämään valittua pumppua sekä paineenkorotusyksikköä muidenkin suodatinten kankaiden pesun yhteydessä. Paineenkorotusyksiköstä tehtiin lisäksi 3D-malli, joka on Flowrox Oy:n käytössä.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Intelligent Machines

Vähätalo Sami
Pump dimensioning for a pressure unit

Bachelor's thesis 42 pages, appendices 2 pages
April 2021

The thesis was made in collaboration with Flowrox Oy located in Lappeenranta. Flowrox Oy is in the process of product development of a tower press filter. They wanted a pressure booster unit as an additional accessory for tower press. Purpose of the pressure booster unit is to increase water flow enough to allow the filter fabric in tower press to be washed. Tower press piping has nozzles attached, which as the water volume increases also produces sufficient pressure towards the filter fabric. The filter fabric has possibility to get clogged if enough pressure cannot be produced. The purpose of the thesis was to dimension a pump for a pressure booster unit.

The thesis was made in close cooperation with guidance group appointed by the client. Requirements for the pumping process were received from guidance group. Requirements were such as the length of the piping and the height difference. Pressure losses caused by the piping had to be calculated in order, to be able to dimension the appropriate pump. The pump is attached to the water tank by a flanged connection. Pump sucks water from the tank and produces a large volume flow on the pressurized side.

As result of the work, a suitable centrifugal pump was found for pressure booster unit. Flowrox Oy intend to utilize the pump and pressure booster unit in other filters fabric cleaning. In addition, a 3D model of the booster unit was made.

Key words: piping, pressure loss, pump

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	FLOWROX OY	8
	2.1 Historia	8
	2.2 Tuotteet	8
	2.2.1 Venttiilit	8
	2.2.2 Pumput	9
	2.2.3 Suodattimet	10
	2.2.4 IloT-Ratkaisut	10
	2.2.5 Ympäristötekniikan ratkaisut	10
3	NESTEEN PUMPPAUS	12
	3.1 Putkiston vaadittavat lähtötiedot	12
	3.2 Putkiston painehäviö	12
	3.3 Virtauslajit putkistossa	13
	3.4 Kitkahäviöt	14
	3.4.1 Painehäviö	17
	3.4.2 Kertavastus	18
	3.4.3 Dynaaminen painehäviö	19
	3.4.4 Staattinen painehäviö	19
	3.4.5 Kokonaispainehäviö	20
4	PUMPPUTYYPIT	21
	4.1 Keskipakopumppu	21
	4.2 Pakkasyöttöpumppu	22
5	PUMPUN MITOITTAMINEN	24
	5.1 Pumpun säätötavat	24
	5.1.1 Kuristussäätö	24
	5.1.2 On-off-säätö	24
	5.1.3 Ohivirtaussäätö	25
	5.1.4 Pyörimisnopeuden säätö	25
	5.2 Ominaiskäyrä	26
	5.3 Nostokorkeus	27
	5.4 Virtausnopeus	28
	5.5 Tilavuusvirta	28
	5.6 Kavitointi	29
6	LASKENTA	31
	6.1 Putkiston laskenta	32
	6.2 Pumpun valinta	35

6.2.1 Grundfos CR45-11-2	35
7 POHDINTA	38
LÄHTEET	39
LIITTEET	41
Liite 1. Veden kinemaattinen viskositeetti – käyrästä.....	41
Liite 2. Putkien absoluuttinen karheus	42

ERITYISSANASTO

Painesuodatin	Nesteen ja kiintoaineen erottamisessa käytetty suodatin.
Kertavastus	Putkistossa olevien liitinten, mutkien ja eri komponenttien aiheuttama vastus.
Kitkahäviö	Putkivirtauksessa syntyvä painehäviö.
NPSH	Net positive suction head arvo on absoluuttinen vähimmäispaine, joka on oltava pumppun imupuolella kavitaation estämiseksi.
Kavitaatio	Ilmiö, jossa neste alkaa kiehua paineen laskun johdosta.
Keskipakopumppu	Keskipakopumppu on yleisimmin käytetty nesteitä siirtävä pumppu prosessiteollisuudessa.

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli mitoittaa pumppu paineenkorotusyksikölle. Opinnäytetyö aloitettiin määrittämällä yhdessä ohjausryhmän kanssa putkiston koko, komponentit sekä pumpun vaadittu tuotto. Tämän jälkeen putkiston painehäviöt laskettiin, joiden perusteella pystyttiin mitoittamaan tarkoituksenmukainen pumppu paineenkorotusyksikölle.

Opinnäytetyön tuloksena Flowrox Oy:llä on paineenkorotusyksikköön soveltuva pumppu. Paineenkorotusasema on suunniteltu taustalla opinnäytetyön yhteydessä. Paineenkorotusyksikön toivotaan soveltuvan myös muille suodattimille. Flowrox tuo markkinoille kyseisen paineenkorotusyksikön.

Paineenkorotusyksikkö on osa painesuodatin kokonaisuutta. Painesuodattimella erotetaan neste ja kiintoaine toisistaan suodatinkankaan avulla. Kuiva kiintoaine ajetaan pois suodatinkankaalta. Kankaan pesu tapahtuu kangasta ajettaessa eteenpäin määritellyn matkan verran. Paineenkorotusyksikön avulla luodaan riittävän suuri virtaus, jotta painesuodattimessa oleva kangas saadaan puhdistettua ylimääräisestä kiintoaineesta estäen kankaan tukkeutumisen.

2 FLOWROX OY

Opinnäytetyön toimeksiantaja Flowrox Oy on erikoistunut virtauksensäätö-, suodatus- ja ympäristötekniikoihin sekä automaattoratkaisuihin teollisuudessa. (Flowrox Oy, n.d. Parempia tuloksia innovatiivisilla tuotteilla ja ratkaisuilla)

Yritys toimittaa kokonaisratkaisuja ja –palveluja erilaisiin käyttökohteisiin prosessiteollisuudessa. Flowrox tarjoaa huoltoa ja korjausta sekä omille, että muiden valmistajien tuotteille. Erityisesti Flowrox tunnetaan vaativien käyttökohteiden venttiilien ja pumppujen johtavana valmistajana ja toimittajana. (Flowrox Oy, n.d. Suodatin-, pumppu ja venttiilihuolto)

2.1 Historia

Flowrox Oy:llä on kokemusta yli 40 vuoden ajalta virtauksensäätö- ja elastomeeritekniologiasta. Yritys perustettiin 1977, jolloin se vielä oli nimeltään Larox. Larox valmisti vaativiin olosuhteisiin tarkoitettuja painesuodattimia ja letkuventtiileitä. Letkuventtiilit erotettiin myöhemmin omaksi yritykseksi nimeltään Larox Flowsys. Letkuventtiilejä valmistavan Larox Flowsysin nimi vaihtui nykyiseksi Flowrox Oy:ksi vuonna 2011. Flowrox toimittaa nykypäivänä prosessiteollisuuden ratkaisuja eri teollisuudenaloihin. (Flowrox Oy, n.d. Parempia tuloksia innovatiivisilla tuotteilla ja ratkaisuilla)

2.2 Tuotteet

2.2.1 Venttiilit

Flowrox Oy:llä on letku- sekä levyluistiventtiilejä. Letkuventtiilit ovat sulku- tai säätöventtiilejä. Flowroxin venttiilit sopivat vaativiin käyttökohteisiin, joissa venttiilit kuluvat nopeasti voimakkaasta kiintoaineen virtauksesta johtuen. (Flowrox Oy, n.d. Virtauksensäätö, suodatus, ympäristötekniikka ja älykkäät ratkaisut)



Kuva 1. Flowroxin letkuventtiili (Flowrox Oy)

2.2.2 Pumput

Pumppuja Flowroxilla on kattava valikoima erilaisiin käyttötarkoituksiin. Flowroxin pumput on suunniteltu pääasiassa vaativiin olosuhteisiin, joissa käytetään esim. kuluttavia tai syövyttäviä väliaineita. Flowroxilla on myytävänä esim. Siirto- ja anostelupumppuja, Epäkeskoruuvipumppuja ja keskipakopumppuja. (Flowrox Oy, n.d. Virtauksensäätö, suodatus, ympäristötekniikka ja älykkäät ratkaisut)



Kuva 2. Flowroxin Keskipakopumppu (Flowrox Oy)

2.2.3 Suodattimet

Flowrox tarjoaa erilaisia suodattimia teollisuuden tarpeisiin. Flowroxin käyttämä painesuodatusmenetelmä on tehokas teknologia nesteen ja kiintoaineen erotukseen. Toinen arvostettu suodatustapa on kammiosuodatus, joka on suorituskyvyltään erinomainen ja toimintavarma. (Flowrox Oy, n.d. Virtauksensäätö, suodatus, ympäristötekniikka ja älykkäät ratkaisut)



Kuva 3. Kuva Flowroxin painesuodattimesta (Flowrox Oy)

2.2.4 IIoT-Ratkaisut

Flowrox tarjoaa myös prosessien yhdistämistä teolliseen internettiin. Tämän avulla eri laitteista saadaan tietoja tuotantoa varten. Tuotannon optimointi helpottuu reaaliaikaisten tietojen avulla. (Flowrox Oy, n.d. Virtauksensäätö, suodatus, ympäristötekniikka ja älykkäät ratkaisut)

2.2.5 Ympäristötekniikan ratkaisut

Flowrox tarjoaa ympäristötekniikan ratkaisuja virtauksen hallinnasta lietteiden teknisiin käsittelyratkaisuihin. Jäteveden käsittelyratkaisut tuovat säästöjä jäteveden ja prosessinesteiden käsittelyssä sekä edistää turvallisuutta. Esimerkiksi

Plasma Oxidizer puhdistaa ja desinfioi vettä. Plasma Oxidizer hajottaa epäpuhtaudet luonnollisiksi ainesosiksi. (Flowrox Oy, n.d. Virtauksensäätö, suodatus, ympäristötekniikka ja älykkäät ratkaisut)



Kuva 4. Flowroxin tarjoama Plasma Oxidizer (Flowrox Oy)

3 NESTEEN PUMPPAUS

3.1 Putkiston vaadittavat lähtötiedot

Putkistossa tapahtuvien painehäviöiden laskemiseksi tulee tietää, kuinka suuri on veden keskimääräinen virtausnopeus. Virtausnopeudella tarkoitetaan veden etenemistä putkistossa. Mitä suurempi virtausnopeus, sitä enemmän painehäviötä putkistossa syntyy. Toinen merkittävä tekijä painehäviöiden laskemisessa on putkiston koko. Putken pienentyessä tilavuusvirran pysyessä vakiona virtausnopeus putkiston sisällä kasvaa.

3.2 Putkiston painehäviö

Eri nopeudella liikkuvat vesikerrokset hankaavat toisiaan aiheuttaen energiahäviön. Suuremmilla nopeuksilla turbulenssi-ilmiön vaikutuksesta vastus kasvaa huomattavasti. Seinämän karheus vaikuttaa turbulentsissa virtauksessa virtausvastukseen. Virtausvastus aiheuttaa kitkahäviötä putkistossa. (Jokilaakso 1987, 35.)

Nesteen virratessa putkistossa aiheutuu kitkahäviötä, joka tapahtuu virtausvastuksen seurauksena. Putkien kokonaispaine-ero liittyy useisiin tekijöihin, joita ovat esimerkiksi:

- Nesteen ja putken seinämänvälinen kitka
 - Nesteen vierekkäisten kerrosten kitka
 - Kitkahäviö nesteen kulkiessa liittimien, kulmien, venttiilien tai muiden komponenttien läpi (kertavastukset)
 - Nostokorkeuden muutoksesta johtuva painehäviö (jos putkisto ei ole vaakasuuntainen)
 - Pumpun nostokorkeuden aiheuttama häviö
- (Pipeflow, n.d. Pipe pressure drop calculations).

Putkisto sisältää useimmiten rakenneosia eli niin sanottuja kertavastuksia, jotka vaikuttavat suunnan ja tilavuusvirran muutoksiin. Näitä rakenneosia ovat esimerkiksi erinäiset venttiilit ja kuristusosat. (Bohl, 1988, 105.) Putkiosuukien

kitka- ja kertavastushäviöiden sekä hydrostaattisen paine-eron summalla saadaan putkiston kokonaispainehäviö laskettua (Jokilaakso, 1987, 39).

3.3 Virtauslajit putkistossa

Reynoldsin luku määrittää onko putkivirtaus laminaarista vai turbulenttista.

Laminaarisessa eli kerroksittaisessa virtauksessa virtaus liikkuu putken pituus akselin suuntaisesti, eivätkä osaset sekoitu keskenään. Laminaarisessa virtauksessa halkaisijaltaan samankokoisissa ja yhtä pitkissä putkissa virtausvastus ei muutu pinnankarheuden muuttuessa. Pyöreiden putkien kriittinen raja laminaariselle virtaukselle on pienempi kuin 2320. (Bohl, 1988, 87-88.) Esimerkiksi Reynoldsin luvun ollessa 1600 virtaus on laminaarista.

Turbulenttisessa eli pyörteisessä virtauksessa on myös akselin suunnasta katsottuna poikittaisliikettä. Virtauksessa osaset sekoittuvat keskenään. Putkivirtauksessa kitkahäviö riippuu myös putken seinämän karheudesta. Virtausta voidaan pitää turbulenttisena, kun Reynoldsin luku ylittää kriittisen rajan. (Bohl, 1988, 87-88.)

Yleisimmin korkean viskositeetin omaaville nesteille putkivirtaus on laminaarista ja pienen viskositeetin omaaville turbulenttista. Turbulenttisessa virtauksessa tulee huomioida putken karheus. Virtauslaji saadaan laskettua selvittämällä Reynoldsin luku kaavalla 1. (Bohl, 1988, 88 & 94.)

$$Re = \frac{v*d}{\nu}, \quad (1)$$

jossa Re = Reynoldsin luku
 v = Nesteen keskimääräinen virtausnopeus (m/s)
 d = Putkiston sisähalkaisija (m)
 ν = Nesteen kinemaattinen viskositeetti (m²/s).

3.4 Kitkahäviöt

Kitkahäviö tarkoittaa painehäviötä nesteessä, joka aiheutuu nesteen ja putken välisestä kosketuksesta. Pumppausjärjestelmässä syntyy kitkaa pinnoille, joihin neste on kosketuksissa.

Liike johtaa energia- ja painehäviöön, mikä heikentää järjestelmän hyötysuhdetta. Kitkahäviö ilmenee järjestelmän kaikissa osissa, kuten putkistossa, käyriissä ja venttiileissä. Kitkahäviöön voidaan vaikuttaa nesteen virtaamalla, viskositeetilla sekä putken halkaisijalla ja pituudella. Putken karheus vaikuttaa myös kitkahäviöön. Jos putki on sileä, vesi liikkuu helpommin, jolloin kitkahäviö on pienempi. (Grundfos, n.d. Kitkahäviö ja kavitaatio.)

Laminaariselle virtaukselle ympyräputkessa saadaan kitkavastuskerroin lasketua kaavalla (2) (Bohl, 1988, 94.)

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (2)$$

jossa λ = Kitkavastuskerroin
 Re = Reynoldsin luku.

Harvinaisin putkivirtaus on laminaarinen. Laminaarista putkivirtausta esiintyy pääasiassa vain pienillä virtausnopeuksilla pienissä putkissa suuriviskositeettisten aineiden virratessa. Kaavan (2) mukaan laminaarisessa virtauksessa putken sisäpinnan karheudella ei ole vaikutusta kitkavastuskertoimeen. Karheus tulee ottaa huomioon virtauksen ollessa turbulენტtista. Tässä tapauksessa putket voidaan jakaa karheutensa puolesta hydraulisesti sileisiin ja karheisiin putkiin sekä ylimenoalueella oleviin putkiin. (Bohl, 1988, 94-97)

Turbulenttisessa virtauksessa putken karheus vaikuttaa kitkavastuskertoimeen. Kaavan (3) mukaan putki on hydraulisesti sileä. (Bohl, 1988, 96.)

$$Re * \frac{k}{d} < 65, \quad (3)$$

jossa k = putken karheus (mm)
 d = putkiston sisähalkaisija (mm).

Putki on hydraulisesti karhea kaavalla (4). (Bohl, 1988, 96.)

$$Re * \frac{k}{d} > 1300 \quad (4)$$

Ylimenoalue, joka jää sileän ja karhean putken väliin saadaan kaavalla (5). (Bohl, 1988, 96.)

$$65 < Re * \frac{k}{d} < 1300 \quad (5)$$

Hydraulisesti sileälle putkelle voidaan laskea kitkavastuskerroin Reynoldsin luvusta riippuen kaavoilla 6, 7 tai 8. (Bohl, 1988, 96.)

Reynoldsin luvun ollessa $2300 < Re < 10^5$ lasketaan kaavalla 6

$$\lambda = 0,3164 * Re^{-0,25} \quad (6)$$

Reynoldsin luvun ollessa $10^5 < Re < 5 * 10^6$ lasketaan kaavalla 7

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 * Re^{-0,237}. \quad (7)$$

Reynoldsin luvun ollessa $Re > 10^6$ lasketaan kaavalla 8

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 * \lg(Re * \sqrt{\lambda}) - 0,8. \quad (8)$$

Hydraulisesti karhealle putkelle laskukaavana voidaan käyttää Moodyn yhtälöä (kaava 9). (Bohl, 1988, 96.)

$$\lambda = 0,0055 + 0,15 * \left(\frac{k}{d}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

jossa λ = Kitkavastuskerroin

k = Putken karheus (mm)

d = Putken sisähalkaisija (mm).

Ylimenoalueella kitkavastuskerroin voidaan laskea kaavalla 10. (Bohl, 1988, 96.)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \lg \left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d} * 0,269 \right), \quad (10)$$

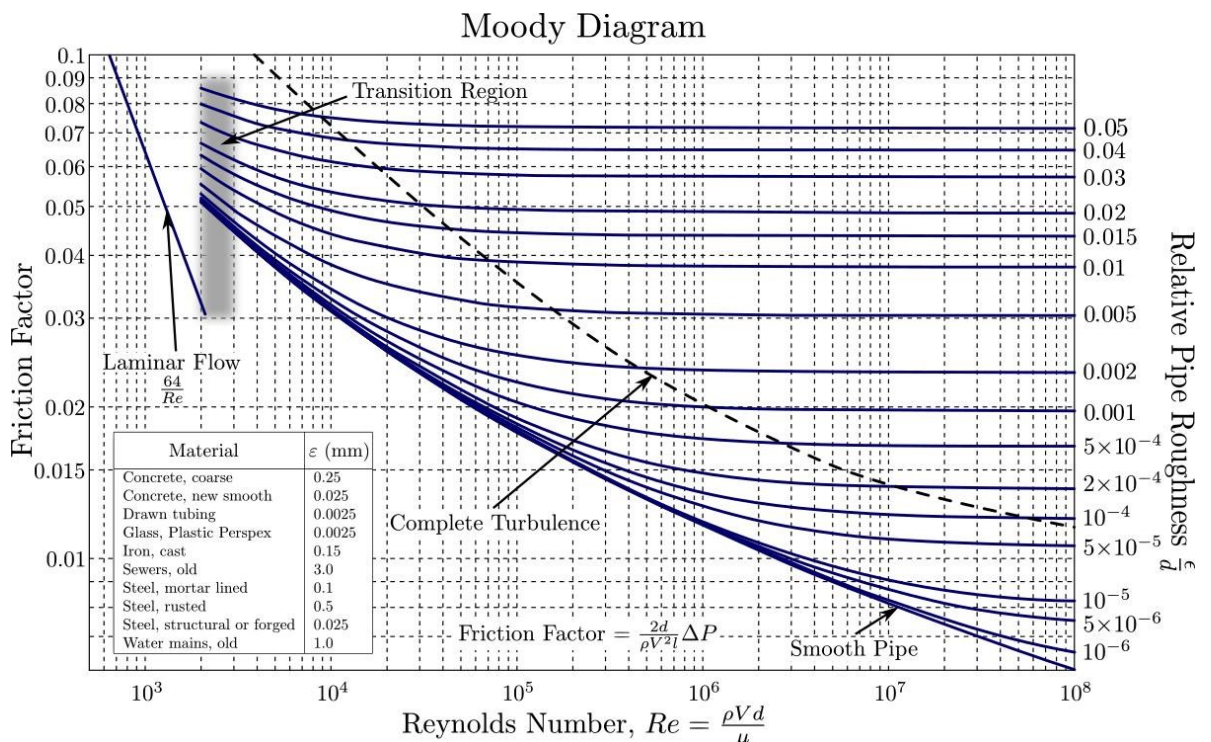
jossa λ = Kitkavastuskerroin

Re = Reynoldsin luku

k = Putken karheus (mm)

d = Putken sisähalkaisija (mm).

Kitkavastuskerroin on melko haastava laskea kaavasta 10. Kuviossa 1 on Moodyn käyrästä, josta kitkavastuskerroin voidaan lukea.



Kuvio 1. Moodyn diagrammi (Engineersedge, n.d. Moodys Chart.)

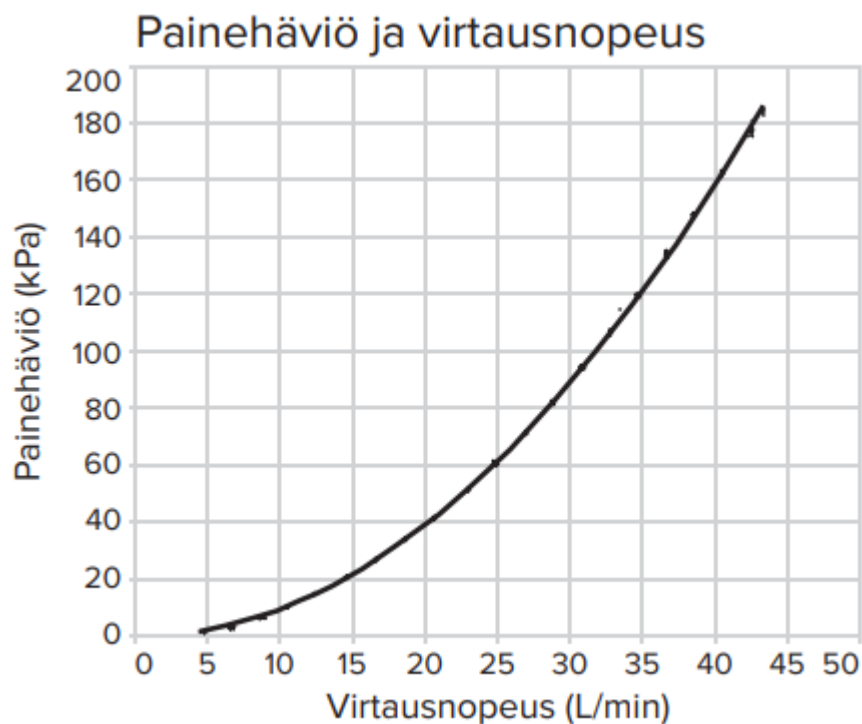
Putken karheusarvot ovat yleisesti ottaen noin arvoja, karheus voi hieman heitellä pääasiassa tähän vaikuttaa putken ikä sekä sisäpinnan likaantuminen. Liitteessä 2 on esitetty erilaisia karheusarvoja eri materiaaleille (Scribd, n.d. Pipe absolute roughness).

3.4.1 Painehäviö

Kaavalla 11 lasketaan virtausvastus suoralle putkelle. Virtausvastuksen laskentaa voidaan käyttää vain putkiosuudella, joka pysyy vakiona. (Bohl, 1988, 98.) Putken sisähalkaisijan muuttuessa tulee putkiosuudet laskea erikseen ja summata yhteen.

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} * \frac{\rho}{2} v^2, \quad (11)$$

jossa Δp = Painehäviö
 λ = Kitkavastuskerroin
 L = Putken pituus
 d = Putken sisähalkaisija
 ρ = Nesteen tiheys.



Kuvio 2. Virtausnopeuden suhteesta painehäviöön. (Muovitech, n.d. Turbo-collector)

Kuviosta 2 nähdään virtausnopeuden muutoksen suhde painehäviöön. Virtauksen kaksinkertaistuessa painehäviö nelinkertaistuu. (Muovitech, n.d. Turbo-collector.) Kitkavastus vaikuttaa putkiston ja/tai pumpun mitoitukseen. Käytännössä tehohäviön laskeminen perustuu kokeellisiin mittatuloksiin, joten täysin laskennallisesti on vaikea määrittää häviön suuruus. (Jokilaakso, 1987, 35.)

3.4.2 Kertavastus

Putkistoon yleisesti liitetään erinäisiä mutkia tai venttiileitä, jotka aiheuttavat putkistolle lisäpainehäviötä. Kertavastukset yleensä määrätään kokeellisesti, esimerkiksi venttiileille ilmoitetaan kertavastuskerroin valmistajien toimesta. (Wuori, 1990, 122-123.)

Kertavastuskertoimet ovat yleisesti ottaen noin lukuja. Harvoissa tapauksissa virtausvastus voidaan laskea teoreettisesti, varmempi tapa virtausvastuksen määrittämiseksi on erinäiset testaukset ja kokeet. Kertavastuskertoimien painehäviö saadaan laskettua kaavalla 12. (Bohl, 1988, 105.)

$$\Delta p = \zeta * \frac{\rho}{2} * v^2, \quad (12)$$

jossa Δp = Painehäviö
 ζ = Kertavastuskerroin
 ρ = Nesteen tiheys
 v = Keskimääräinen virtausnopeus.

Erikokoisten putkien liittämässä toisiinsa käytetään supistus- ja laajennuskartioita. Laajennuskartioita kutsutaan diffuusoreiksi ja supistuksia konfusoreiksi tai suuttimiksi. Poikkipinta-alan muutos voi olla vähittäinen tai äkillinen. Äkillisellä muutoksella tarkoitetaan esimerkiksi putkiston päättyessä haluttua paineenkorotusta. (Bohl, 1988, 105-109.)

Putkiston rakenneosien kertavastuskertoimia:

- Konfusori = 0,4
- Sileä putkikäyrä 90° = 0,21
- T-kappale = 1

- Palloventtiili = 0,8
(Bohl s.105).

3.4.3 Dynaaminen painehäviö

Dynaaminen painehäviö saadaan laskemalla yhteen virtausvastuksesta ja kerta-
vastuksesta aiheutuvat painehäviöt. Putken halkaisijan säilyessä vakiona käytetään kaavaa 13. (Jokilaakso, 1987, 39.)

$$\Delta p_{dyn} = \left(\frac{\lambda L}{d} + \Sigma \zeta \right) * \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (13)$$

jossa Δp_{dyn} = Dynaaminen painehäviö (Pa)
 λ = Kitkavastuskerroin
 L = Putken pituus (mm)
 d = Putken sisähalkaisija (mm)
 $\Sigma \zeta$ = Kertavastusten summa
 ρ = Nesteen tiheys (kg/m³)
 v = Keskimääräinen virtausnopeus (m/s).

Jos putki ei pysy vakiona ja halkaisija muuttuu, dynaaminen painehäviö voidaan laskea myös kaavalla 14 (Jokilaakso, 1987, 39.)

$$\Delta p_{dyn} = \Sigma(\lambda L \rho v^2 / 2d) + \Sigma(\frac{1}{2} \zeta \rho v^2). \quad (14)$$

Kaavassa 14 lasketaan yhteen kaikkien putkiosuuksien sekä kertavastuksien summa (Jokilaakso, 1987, 39).

3.4.4 Staattinen painehäviö

Korkeusero putkistossa alku- ja loppupään välillä aiheuttaa staattisen painehäviön putoamiskiihtyvyyden vuoksi. Tätä kutsutaan staattiseksi painehäviöksi. Staattinen painehäviö voidaan laskea kaavalla 15. (Jokilaakso, 1987, 39.)

$$\Delta p_{st} = \rho g (h_2 - h_1), \quad (15)$$

jossa Δp_{st} = Staattinen painehäviö (Pa)
 ρ = Nesteen tiheys (kg/m^3)
 g = Putoamiskiihtyvyys (m/s^2)
 H_2 = Putkiston loppupään pinnankorkeus (m)
 H_1 = Putkiston alkupään pinnankorkeus (m).

3.4.5 Kokonaispainehäviö

Putkistossa tapahtuva kokonaispainehäviö saadaan laskemalla dynaaminen ja staattinen painehäviö yhteen. Kokonaispainehäviö saadaan kaavalla (16) (Jokilaakso, 1987, 39.)

$$\Delta p_{kok} = \Delta p_{st} + \Delta p_{dyn}, \quad (16)$$

jossa Δp_{kok} = Kokonaispainehäviö
 Δp_{st} = Staattinen painehäviö
 Δp_{dyn} = Dynaaminen painehäviö.

4 PUMPPUTYYPIT

Markkinoilla on paljon erilaisia pumpputyyppejä. Pumpulla on oma soveltuvuusalueensa riippuen eri tekijöistä. Yleisimmin käytetty pumpputyyppi on keskipakopumppu. Jos keskipakopumppu ei sovellu, voidaan valita esimerkiksi pakkosyöttöpumppu erilaisiin annostelutehtäviin. Keskipakopumppu ei myöskään sovi hyvin viskoosien nesteiden pumppaukseen. (Jokilaakso, 1987, 52-54.)

Jokilaakson (1987, 52) mukaan pumppujen jaottelu ja nimet eivät ole vakiintuneet. Pumput jaetaan yleisesti eri ryhmiin pumppausmenetelmän perusteella

- Kineettiset pumput
 - Keskipakopumput
 - Sivukanavapumput
- Pakkosyöttöpumput
 - Mäntäpumput
 - Ruuvipumput
 - Hammasrataspumput
 - Kalvopumput
 - Vesirengaspumput

Toinen vaihtoehto on jakaa pumppuja käyttötehtävän mukaan.

- Siirtopumput
- Syöttöpumput
- Tyhjiöpumput
- Annostelupumput

4.1 Keskipakopumppu

Keskipakopumppuja on yleisesti käytössä teollisuudessa erinäisten, raaka-aineiden, välituotteiden ja lopputuotteiden siirrossa sekä veden pumppauksessa. Keskipakopumppuja on saatavilla suurella kapasiteetilla jopa alle 0,01 m³/min aina 400 m³/min asti.

Keskipakopumpun etuja on sen yksinkertaisuus, hinta, tasainen virtaus, tilantarve, alhainen ylläpitokustanne, käyntiääni sekä soveltuvuus moottori- tai turbiinikäyttöön. (Jokilaakso, 1987, 52-54.)

Yksinkertaisimmassa muodossa keskipakopumppu koostuu pyörivästä siipipyörästä. Neste virtaa imupuolelle keskelle siipipyörää, josta siipipyörän läpi paineyhteeseen. Pumpun mekaaninen energia muutetaan nesteen liike-energiaksi keskipakovoimaa hyödyntämällä. Juoksupyörän muotoa, kokoa ja pyörimisnopeutta voi tarvittaessa vaihtaa eri virtausmäärien saavuttamiseksi. Toisessa päässä pumppua on siipipyörä ja toisessa sähkömoottori tai turbiini. (Jokilaakso, 1987, 52-54.)

4.2 Pakkosyöttöpumppu

Pakkosyöttöpumppuja käytetään keskipakopumppujen ohella nesteiden pumpauksessa. Ominaispiirteensä pakkosyöttöpumppuilla on, että ne pyrkivät syöttämään tietyn määrän nestettä yhden kierroksen aikana. Pumppuja on muutamia eri tyyppisiä. Yksi- ja kaksitoiminen mäntäpumppu, sekä erilaisia pyöriviä pumppuja, joista tunnetuin on hammasrataspumppu. (Jokilaakso, 1987, 56.)

Jokilaakson (1987, 56) mukaan pakkosyöttöpumppuja käytetään pääasiassa, kun halutaan pumpata suhteellisen pieniä määriä nestettä korkeaa painetta vastaan. Pumpun virtausmäärään vaikuttaa sen geometria, yhden iskun imetty nestemäärä vähennettynä pumppussa tapahtuvilla vuotoilla.

Yksitoimisessa mäntäpumppussa virtaus on syklittäistä, sillä männän imiessä uutta nestettä ulostulopuolelle tulee tauko. Kaksitoimisen mäntäpumppuun yhdistetään useita sylintereitä, jotta saadaan tasaisempi virtaus. Mekaaninen hyötysuhde mäntäpumppulla on noin 40-50%:sta, pienemmillä pumppuilla päästään jopa 70-90%. (Jokilaakso, 1987, 56.)

Hammasrataspumput, ruuvipumput, epäkeskopumput ja siipipumput ovat esimerkkejä pyörivistä pumppuista. Pyörivien pumppujen liikkuvien osien välillä on

tiukat toleranssit, jotta vuodot ovat minimaaliset. Pyörivät pumput soveltuvat parhaiten puhtaille sekä suhteellisen viskooseille nesteille, kuten kevyt voiteluöljy. (Jokilaakso, 1987, 56.)

5 PUMPUN MITOITTAMINEN

Pumppujen nimitys tulee siitä, että niillä saadaan siirrettyä neste tai kaasu tietyllä paineella eteenpäin. Pumput lisäävät virtaavien nesteiden ja kaasujen kokonaisenergiaa saaden niiden massan liikkeelle. Jos pumpulla pystytään tuottamaan riittävästi tilavuusvirtaa, pystytään sillä nostamaan painetta esim. putkistossa.

5.1 Pumpun säätötavat

Pumppujen säätöön yleisesti käytettyjä tapoja ovat:

- Kuristussäätö
- On-off-säätö
- Ohivirtaussäätö eli takaisinkierrätys
- Kierroslukusäätö taajuusmuuttajalla tai nestekytkimellä
(Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumput.)

5.1.1 Kuristussäätö

Kuristussäätö on yksi yleisimmistä pumppujen säätötavoista. Virtausta rajoitetaan esimerkiksi supistusyhteellä tai venttiilillä. Tämä aiheuttaa painehäviötä, joten se ei ole kovin energiatehokas säätötapa. Venttiiliä säätämällä saadaan säädettyä tilavuusvirtaa. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumput.)

Pumppuja voidaan ajaa asetetulla nostokorkeudella ilman painesignaalia prosessista. Tässä tapauksessa verkossa on yleensä tarvetta korkeampi painetaso ja painetta joudutaan kuristamaan kulutuspäässä. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumput.)

5.1.2 On-off-säätö

On-off-säätöä käytetään, kun pumppua käytetään jaksoittain järjestelmässä eikä pumpun säätäminen ole tarpeen. Tällä tavalla voidaan pitää esimerkiksi paine säiliössä halutun rajan sisällä. On-off-säädettyyn järjestelmään pystytään hyödyntämään muita säätötapoja. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumput.)

5.1.3 Ohivirtaussäätö

Ohivirtaussäädössä osa virtauksesta tuodaan takaisin imupuolelle. Tämä säätötapa on epätaloudellinen, sillä osa nesteestä kierrätetään edestakaisin ja pumpun tuottama teho muuttuu osittain suoraan häviöksi. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumpput.)

5.1.4 Pyörimisnopeuden säätö

Kierrosluvun säädössä muutetaan pumpun pyörimisnopeutta. Pumppu toimii uusilla toiminta-arvoilla ilman, että lisätään merkittävästi pumppauksesta koituvaa häviötä. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumpput.)

Pyörimisnopeutta voidaan muuttaa taajuusmuuttajalla tai nestekytkimellä. Pyörimisnopeutta säätäessä energiatehokkuus pumppausratkaisuissa säilyy. Kierroslukua säädettäessä pumpun hyötysuhde pysyy korkeana, kun kierrosluku pysyy lähellä mitoituspistettä. Toimintapisteen siirtyessä kauemmas mitoituspisteestä pumppauksen hyötysuhde huononee. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumpput.)

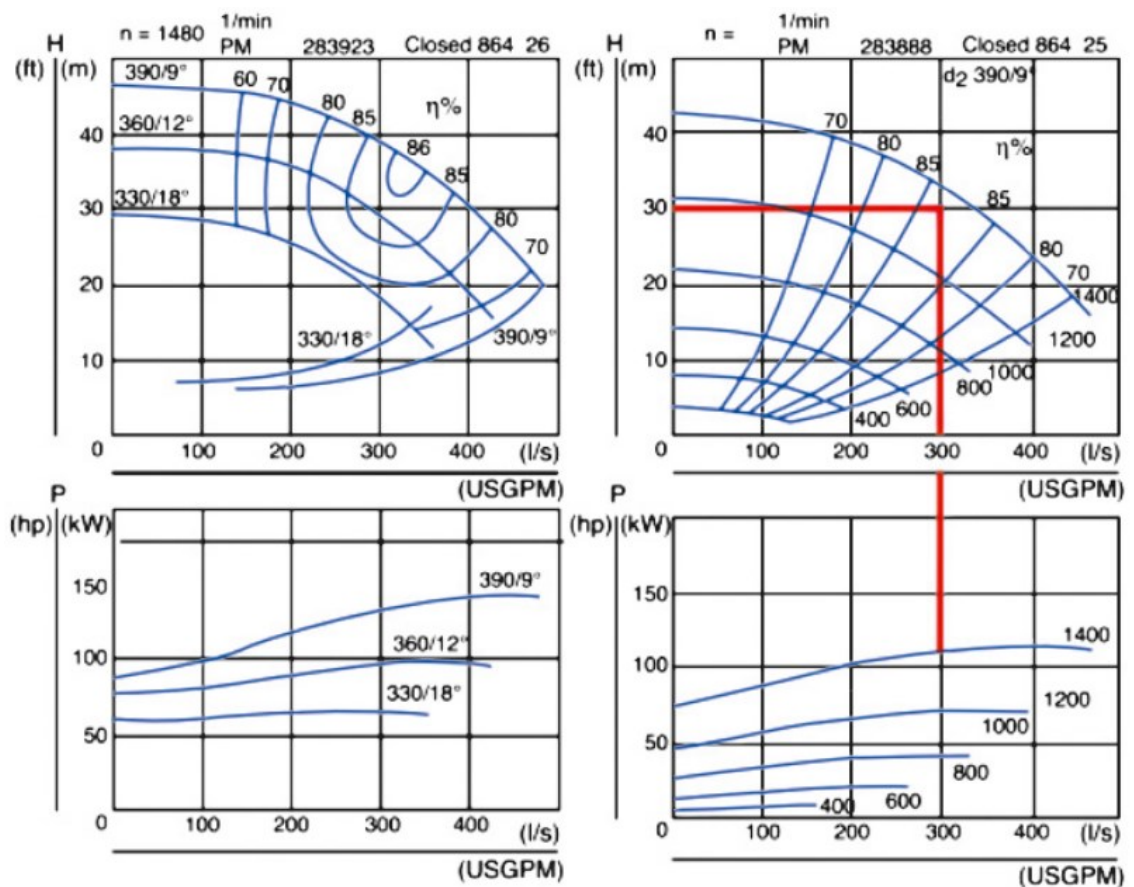
Taajuusmuuttaja on nykyään erittäin hyvä keino pyörimisnopeussäätöön. Taajuusmuuttaja muuttaa nimensä mukaan pumpun käyttämän sähkönsäätäjän taajuutta. Taajuutta muutettaessa pystytään vaikuttamaan sähkömoottorin pyörimisnopeuteen, joka vaikuttaa pumpun pyörimisnopeuteen. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumpput.)

Nestekytinten käyttö on yleisempää suuremmissa teholuokissa. Nestekytimen pumppausyksikkö on taajuusmuuttajaa monimutkaisempi ja kunnossapitokustannus suurempi. Nestekytintä ei pystytä ajamaan ylikierroksilla, toisin kuin taajuusmuuttajaa. Kuitenkin nestekytin ei ole yhtä herkkä ohjaustekniikasta tuleville häiriöille kuin taajuusmuuttaja. Suuremmat häiriöt taajuusmuuttajassa voi pysäyttää koko pumppauksen pidemmäksi aikaa. Nestekytimiä käytetään esimerkiksi prosessiteollisuudessa, jossa toimintavarmuusvaatimus on korkealla prosessin luonteen vuoksi. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumpput.)

5.2 Ominaiskäyrä

Pumput tulee mitoittaa prosessin kannalta parhaalla mahdollisella hyötysuhteella. Jos pumppua käytetään vakiopyörimisnopeudella, riippuu nostokorkeus, tehontarve, hyötysuhde ja imukorkeus tilavuusvirrasta. Vakionopeudella ajattaessa keskipakopumpulla tilavuusvirran kasvaessa nostokorkeus pienenee. Ominaiskäyrässä esitetään pumpun toiminta prosessissa. Toimintapiste määrittää ideaaliset toiminta-arvot, jotta tehokkuus pumpussa on parhaimmillaan. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumput.)

Ominaiskäyrällä kuvataan pumpun nostokorkeuden ja massavirran suhdetta. Pumppujen ominaiskäyrät on yleisesti ilmoitettu pumppuvalmistajien toimesta. Ominaiskäyrästä pystytään määrittämään pumpun toimintapiste. Ominaiskäyrästä nähdään nostokorkeus (H), tilavuusvirta (Q), hyötysuhde (η), Tehontarve (P) ja NPSH-arvo (Net positive suction head). (Grundfos, 2019. Asiaa pumppukäyristä.)



Kuva 5. Esimerkkejä pumpun ominaiskäyristä (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumput. 10.)

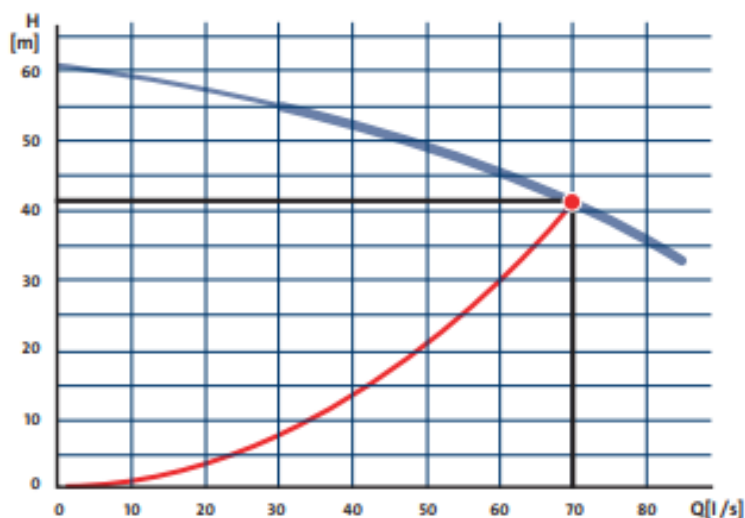
Kuvassa 5 esitetään pumpun ominaiskäyriä. Vasemmanpuoleisissa kuvissa pumpun ominaiskäyrä on näytetty kolmella eri juoksupyörän koolla. Oikeanpuoleisissa kuvissa pumpun ominaiskäyrää kuvataan kuudella eri pyörimisnopeudella. (Motiva, 2011. Energiatehokkaat pumput.)

5.3 Nostokorkeus

Pumpun teoreettista nostokorkeutta ei todellisuudessa saavuteta. Teoreettiseen nostokorkeuteen ei ole huomioitu erinäisiä kiertäviä virtauksia, kitkaa tai sysäyksiä. (Jokilaakso, 1987, 54) Pumpun tulee tuottaa nesteelle painetta, jotta nestettä pystytään siirtämään. Nostokorkeus saadaan laskettua kaavalla 17.

$$\Delta p = \rho g h \rightarrow h = \frac{\Delta p}{\rho g}, \quad (17)$$

jossa Δp = Paineen lisäys (Pa)
 ρ = Nesteen tiheys (kg/m^3)
 g = Putoamiskiihtyvyys (m/s^2)
 H = Nostokorkeus (m).



Kuvio 3. Keskipakopumpun QH-käyrä (Grundfos, 2019, Asiaa pumpppukäyristä.)

Kuviossa 3 nähdään pumpun tuottama nostokorkeus eri virtaamilla. Virtaaman ollessa alhainen pumpun nostokorkeus on suuri, kun taas suuri virtaama aiheuttaa matalan nostokorkeuden. Nostokorkeus ilmoitetaan metreinä vesipatsaasta. Yksikkönä käytetään yleisimmin metriä (m). Pumpatun nesteen tyyppi ei vaikuta QH-käyrään, kun nostokorkeuden mittayksikkö on metri. (Grundfos, 2019. Asiaa pumppukäyristä.)

5.4 Virtausnopeus

Virtausnopeus tarkoittaa aikayksikössä kuljettua matkaa, samoin kuten kiinteiden kappaleiden mekaniikassa. Keskimääräinen virtausnopeus v määräytyy tilavuusvirran Q ja läpivirtauspoikkipinnan A perusteella kaavasta (17). (Bohl, 1988, 51-52.)

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (18)$$

jossa v = Keskimääräinen virtausnopeus (m/s)

Q = Tilavuusvirta (m³/s)

A = Pinta-ala (m²)

d = Putken sisähalkaisija.

5.5 Tilavuusvirta

Tilavuusvirraksi kutsutaan pumpun siirtämää nesteen määrää tietyssä ajassa. Virtausnopeudet ovat kääntäen verrannollisia siirryttäessä vastaaviin poikkipintoihin. Poikkipinnan pienentyessä nopeus kasvaa ja päinvastoin. Tilavuusvirta lasketaan kaavalla (18) (Bohl, 1988, 53-54.)

$$Q = Av, \quad (19)$$

jossa Q = Tilavuusvirta (m³/s)

A = Pinta-ala (m²)

v = Keskimääräinen virtausnopeus (m/s).

Virtausputken läpi kulkeva tilavuusvirta muuttuvapoikkipintaisessa putkessa on vakio, jos putken seinämä on läpäisemätön, ilma- tai kaasukuplaton sekä stationäärinen. Tämä voidaan todeta kaavalla (19) (Bohl, 1988, 53-54.)

$$Q = A_1 * v_1 = A_2 * v_2 = A_3 * v_3, \quad (20)$$

jossa Q = Tilavuusvirta (m^3/s)
 A = Pinta-ala (m^2)
 v = Keskimääräinen virtausnopeus (m/s)

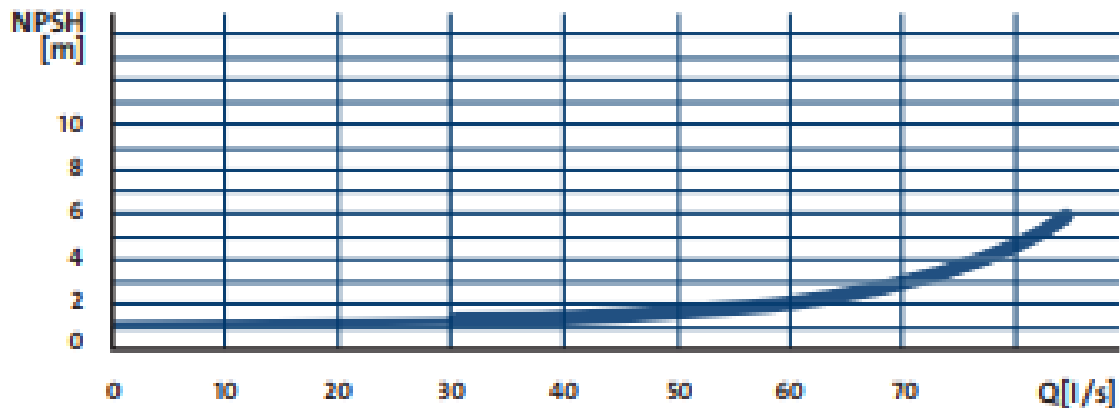
Kaavasta 20 voidaan päätellä virtausnopeuden olevan kääntäen verrannollinen vastaaviin poikkipintoihin. Poikkipinnan pienentyessä nopeus kasvaa ja päinvastoin. (Bohl, 1988, 53-54.)

5.6 Kavitointi

Kavitaatio tarkoittaa, että neste alkaa kiehua paineen laskun seurauksena ja siihen tulevat höyrykuplat luhistuvat. Yleensä vesi kiehuu 100 asteessa, mutta järjestelmän paineen laskiessa myös kiehumispiste laskee. Paineen laskiessa tietyssä kohdassa esimerkiksi 0,1 bar:in vesi kiehuu näissä kohdissa 45 asteessa. Paineen noustessa uudelleen paikallisten kiehumispisteiden yli, höyrystyneet molekyylit luhistuvat ja muuttuvat nesteeksi. Tätä ilmiötä kutsutaan kavitaatioksi. (Grundfos, n.d. Kitkahäviö ja kavitaatio.)

Kavitaatio ilmenee esimerkiksi naputtavana äänenä putkistossa. Yleisesti putkistoissa jossa pumpataan nestettä, kavitaatio on yleinen ongelma. Kavitaatio on myös yksi yleisimmistä pumppu- ja putkirikkojen aiheuttajista. Mahdollisuutta kavitaatioon voidaan pienentää esimerkiksi laskemalla pumpun tuloputkea, nostamalla painetta ennen pumppua, vähentämällä imuputken kitkahäviötä tai pienentämällä pumpun virtaamaa ja nostamalla vedenpinnan korkeutta imupuolella. (Grundfos, n.d. Kitkahäviö ja kavitaatio.) Kavitaation mahdollisuus vähenee yksinkertaisesti siten, että varmistetaan pumpulle tulevan tilavuusvirran olevan vähintään sama kuin pumpulta lähtevä tilavuusvirta.

Kavitoinnin todennäköisyyden arvioimisessa käytetään NPSH-arvoa. NPSH-arvo tulee pumpun valmistajalta.



Kuvio 4. Esimerkki NPSH-käyrästä (Grundfos, 2019, Asiaa pumppukäyristä)

NPSH-arvo kuvaa absoluuttista vähimmäispainetta, joka pumpun imupuolella tulee olla kavitaaation estämiseksi. Kuvasta voidaan päätellä, että virtaaman kasvaessa NPSH-arvo kasvaa. (Grundfos, 2019. Asiaa pumppukäyristä.) NPSH-arvo voidaan laskea kaavalla (20) (Engineering calculations, n.d. Pump NPSH calculation tutorial.)

$$NPSH = \frac{P_0 - p_v}{\rho g} + \Delta z - h_L, \quad (21)$$

jossa P_0 = Imusäiliön paine (Pa)

P_v = Pumpattavan nesteen höyrystymispaine (Pa)

g = Maan painovoima (m/s^2)

ρ = Nesteen tiheys (kg/m^3)

Δz = Korkeusero pumpun imuaukon ja säiliön nestepinnan välillä (m) Säiliön pinnan korkeuden ollessa pumpun yläpuolella käytetään plusmerkkiä, jos toisinpäin käytetään miinusmerkkiä.

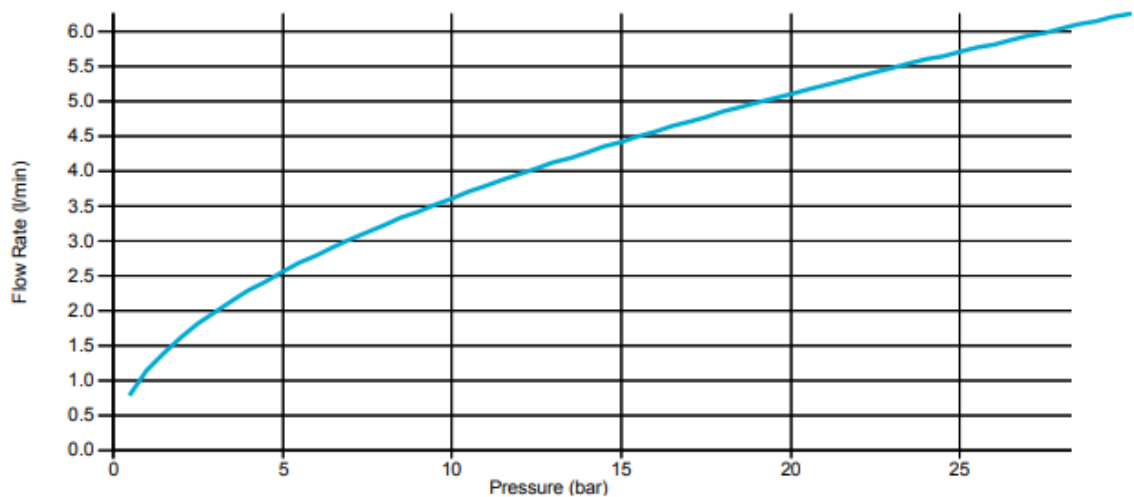
h_L = Putkiston painehäviö (m)

Painehäviöiden minimoimiseksi pumppu kannattaa sijoittaa mahdollisimman lähelle säiliötä, josta nestettä pumpataan. Pumpun ollessa lähellä säiliötä painehäviö imuputkistossa vähenee.

6 LASKENTA

Putkiston pituus, korkeusero sekä kertavastukset ovat ennalta määriteltyjä. Vaatimukset paineyksiköltä ovat tulleet toimeksiantajalta.

Putkistossa käytetään 64kpl suuttimia, jotka on jaettu molemmille puolille kangasta. Suuttimet ovat viuhkasuuttimia, ja syöttävät veden tasaisesti koko kankaan mitalta. Suuttimilta halutaan 25 bar paineella pesuvettä. Kuvassa 6 nähdään yhden suuttimen vaadittu virtausnopeus, jotta 25 bar paine vaatimus täyttyy.



Kuvio 5. Suuttimen paineen suhde virtausnopeuteen. (Keski-korsu, T. Bete 1/4NF0550-B@7)

Kuvion 6 avulla pystytään laskemaan vaadittu virtausnopeus, jonka pumpun halutaan tuottavan.

$$64 * 5,7 \frac{l}{min} = 364,8 l/min$$

Pumpun halutaan tuottavan tilavuusvirtaa siis noin 365 litraa minuutissa, jotta vaatimus täyttyy.

6.1 Putkiston laskenta

Pumpun valintaa varten tulee laskea putkiston painehäviöt. Seinämän paksuudeksi putkille ollaan määritetty 2mm. Putkisto ollaan jaoteltu kolmeen kokoluokkaan. Pumpulta lähtee kooltaan DN80 (88,9mm) putki, joka on 30 metriä pitkä, korkeuseroa syntyy 6 metriä sekä kertavastuksina on 10 kpl 90° mutkia.

Putkistoon liitetään supistusyhdde DN80-DN50. DN50 (60,3mm) putkisto on 5 metriä pitkä ja korkeuseroa 1 metri. Kertavastuksina yksi supistusyhdde sekä palloventtiili. DN50 putki jakautuu tämän jälkeen vielä kahtia, jolloin putkenkoko muuttuu DN32:ksi (42,2mm). Molemmat DN32 putkistot ovat 3 metriä pituudeltaan sekä korkeuseroa syntyy 1 metri kummastakin. Kertavastuksina toisessa putkistossa on supistusyhdde ja yksi kappale 90° mutka. Toisessa putkessa kaksi kpl 90° mutkia sekä T-haara.

Putkikokoja on siis useampia, joten jokainen putkikoko lasketaan erikseen. Tämä johtuu juuri siitä syystä, että virtausnopeus ei pysy vakiona putkikoon muuttuessa. Laskennan helpottamiseksi nimetään putkistot niiden DN-koon mukaan.

Putkistoille tulee ensimmäiseksi laskea virtausnopeus. Virtausnopeus saatiin kaavalla 18.

$$v_{DN80} = \frac{4 \cdot 0,00608 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,0849 \text{ m})^2} = 1,07 \text{ m/s} \quad (18)$$

$$v_{DN50} = \frac{4 \cdot 0,00608 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,0563 \text{ m})^2} = 2,44 \text{ m/s} \quad (18)$$

DN32 putkisto jakautuu kahteen osaan DN50 putkistosta, joten oletetaan tilavuusvirran puolittuvan yhdelle putkistolle. Tilavuusvirran jakautuminen tasaisesti molemmille putkistoille ei käytännössä täysin toteudu, mutta se on riittävän tarkka arvo laskentaan.

$$v_{DN32} = \frac{4 \cdot 0,00304 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot (0,0382 \text{ m})^2} = 2,65 \text{ m/s} \quad (18)$$

Virtausnopeuden määrittämisen jälkeen tulee selvittää putkistojen painehäviöt. Putkistot voidaan laskea erikseen ja summata lopulta yhteen Kaavoilla 11 ja 12. Toinen vaihtoehto on laskea kerralla kaavalla 13 kaikkien dynaamisten painehäviöiden summa.

Seuraavaksi selvitetään, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista kaavalla 1. Liitteestä 1 voidaan lukea veden kinemaattisen viskositeetin olevan +20°C lämpötilassa on noin 1mm²/s eli 10⁻⁶ m²/s.

$$Re_{DN80} = \frac{\frac{1,07m}{s} * 0,0849m}{10^{-6}m^2/s} = 91181,35 \quad (1)$$

$$Re_{DN50} = 137500,82 \quad (1)$$

$$Re_{DN32} = 101325,87 \quad (1)$$

Virtaus on jokaisessa putkessa turbulenttista. Re-luvut ovat reilusti yli kriittisen rajan 2320 < 91181 < 101325 < 137500.

Ruostumattomalle teräsputkelle saadaan pinnankarheus liitteenä 2 olevasta taulukosta. Ruostumattoman teräksen pinnankarheus on 0,0457 mm. Kaavalla 3, 4 tai 5 voidaan todeta mille alueelle putkistot kuuluvat.

$$91181,35 * \frac{0,0457mm}{84,9mm} < 65 = 49,08 < 65 \quad (3)$$

$$65 < 137500,82 * \frac{0,0457mm}{56,3mm} < 1300 = 65 < 111,61 < 1300 \quad (5)$$

$$65 < 101325,87 * \frac{0,045mm}{38,2mm} < 1300 = 65 < 121,22 < 1300 \quad (5)$$

Laskujen jälkeen voidaan todeta, että DN80 putki kuuluu hydraulisesti sileälle alueelle ja DN50 ja DN32 putkistot ylimenoalueelle. Kitkavastuskerroin DN80 putkistolle voidaan laskea kaavalla 6, sillä Reynoldsin luku on alle 10⁵.

$$\lambda_{DN80} = 0,3164 * 91181,35^{-0,25} = 0,018 \quad (6)$$

Ylimenoalueella oleville putkille voidaan haastavan laskukaavan sijaan katsoa moodyn käyrästöltä kitkavastuskerroin. Moodyn käyrästöltä (kuvio 1) nähdään, että kitkavastuskerroin on noin 0.02.

Putkiston halkaisija ei pysy vakiona, joten kaavalla 14 saadaan laskettua putkistojen dynaamisten painehäviöiden summa. DN32 putkiston kitkahäviö lasketaan kahteen kertaan, sillä ne ovat pituudeltaan yhtä pitkät. Kertavastuskertoimia toisessa putkistossa on enemmän, joten ne lasketaan erikseen.

$$\Delta p_{dyn} = \left[\left(\frac{0,018 \cdot 30m \cdot 997 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(1,07 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 0,0849m} \right) + \left(\frac{0,02 \cdot 5m \cdot 997 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(2,44 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 0,0563m} \right) + \left(2 \cdot \left(\frac{0,02 \cdot 3m \cdot 997 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(2,65 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 0,0382m} \right) \right) \right] + \left[\left(4 \cdot \frac{997 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \left(1,07 \frac{m}{s}\right)^2 \right) + \left(1,2 \cdot \frac{997 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \left(2,44 \frac{m}{s}\right)^2 \right) + \left(0,8 \cdot \frac{997 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \left(2,65 \frac{m}{s}\right)^2 \right) + \left(2,3 \cdot \frac{997 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \left(2,65 \frac{m}{s}\right)^2 \right) \right] = 36595,24 Pa \quad (13)$$

Korkeuserosta johtuva staattinen painehäviö lasketaan kaavalla 15. Putkistosta riippuen lasketaan korkeusero aiemmin vaadituilla nostokorkeuksilla.

$$\Delta p_{stDN80} = 997 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,82 \left(\frac{m}{s}\right)^2 \cdot (6 - 0) = 58743,24 Pa \quad (15)$$

$$\Delta p_{stDN50} = 997 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,82 \left(\frac{m}{s}\right)^2 \cdot (1 - 0) = 9790,54 Pa \quad (15)$$

$$\Delta p_{stDN32} = 997 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,82 \left(\frac{m}{s}\right)^2 \cdot (1 - 0) = 9790,54 Pa \quad (15)$$

Putkistossa tapahtuva kokonaispainehäviö saadaan laskettua kaavalla 16.

$$\Delta p_{kok} = 36595,24 Pa + (58743,24 Pa + 9790,54 Pa + 9790,54 Pa) = 114919,56 Pa \quad (16)$$

Putkistosta johtuva paineenlisäys ei suoraan kerro mitään. Putkiston vaatima paineenlisäys tulee muuttaa nostokorkeudeksi. Nostokorkeus saadaan kaavasta 17.

$$h_{putkisto} = \frac{114919,56 Pa}{997 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,82 \left(\frac{m}{s}\right)^2} = 11,74m \quad (17)$$

Jotta putkiston loppupäässä päästään 25 bar:iin pumpun on tuotettava ylimääräistä nostokorkeutta noin 12 metriä painehäviöistä johtuen.

6.2 Pumpun valinta

Pumpun tulee ylläpitää 25 bar paine putkiston päässä, jotta suuttimilta virtaa riittävästi nestettä kankaan pesemiseksi. Pumpun mitoittamista varten tulee tietää nostokorkeus. Vaadittu nostokorkeus saadaan kaavalla 17.

$$\Delta p = \rho g h \rightarrow h_{25Bar} = \frac{2500000 Pa}{997 \frac{kg}{m^3} * 9,82 \left(\frac{m}{s}\right)^2} = 255,35m \quad (17)$$

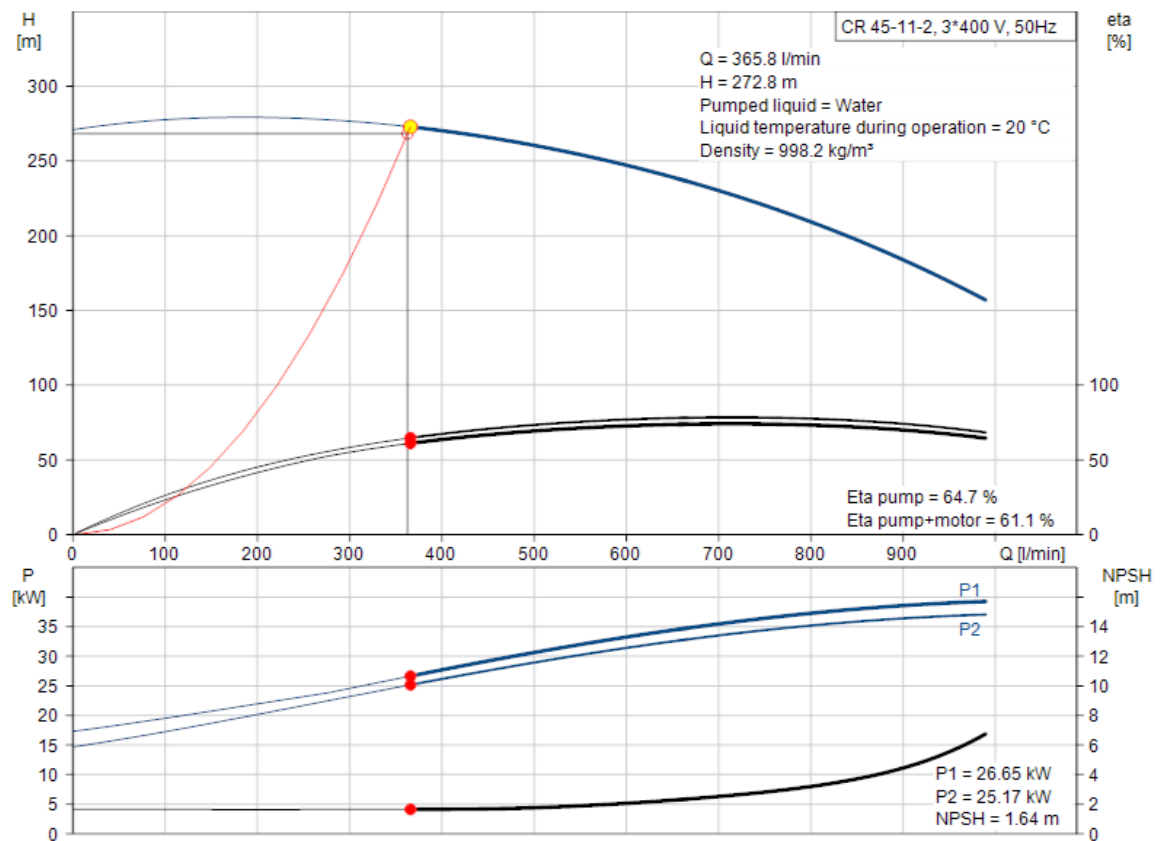
Lasketaan yhteen 25 bar paineen tuottamisen nostokorkeus ja putkiston painehäviöstä johtuva nostokorkeus

$$h = 255,35m + 11,74m = 267,08m$$

Pumpun tulee pystyä tuottamaan noin 365 l/min saaden tälle nostokorkeutta vähintään 267 metriä.

6.2.1 Grundfos CR45-11-2

Pumpuksi valikoitui Grundfos CR45-11-2 keskipakopumppu. Pumpun maksimi toimintapaine on 30 bar ja nesteen käyttölämpötila -30...+120°C.



Kuvio 6. Grundfos pumpun ominaiskäyrä (Grundfos, n.d. CR45-11-2 A-F-A-E-HQQE.)

Kuviosta 6 nähdään, että pumppu pystyy tuottamaan 365l/min jopa 273 metrin korkeuteen. Pumpun ja moottorin hyötysuhde on noin 61%, sekä tehoa pumppu vaatii noin 26 kW. NPSH arvo pumpulla on matala vielä näillä vesimäärillä. Kavitoinnin mahdollisuus saadaan laskettua kaavalla 21.

Määritetyillä arvoilla pumppuvalmistajan käyrältä saadaan vaadituksi NPSH-arvoksi 1,64m. Valmistajan vaatima NPSH arvo on oltava pienempi, kuin kaavalla 20 saatava arvo. Tällöin kavitaatiota ei pääse syntymään. Arvoiksi valitaan pumpun kannalta pumppua rasittavimmat arvot, koska halutaan saada selville kavitoiko pumppu missään tilanteessa.

Säiliö on paineeton, joten käytetään ilmakehän absoluuttista painetta 10^5 Pa. +20C° veden höyrystymispaine on 2,343 kPa (Omnicalculator, n.d. Vapor Pressure of Water Calculator). Pumpun kannalta vedenpinnankorkeus on alimmillaan noin 0,2m päässä pumpun imuaukon akselista. Putkistossa tapahtuva painehäviö määritetään 0,5m suuruiseksi.

$$NPSH = \frac{10^5 Pa - 2343 Pa}{997 \frac{kg}{m^3} * 9,82 \left(\frac{m}{s}\right)^2} + 0,2 m - 0,5 m = 9,67 m \quad (21)$$

Pumpun valmistajan antama arvo $1,64m < 9,67m$, joten pumppu ei kavitoi.

7 POHDINTA

Putkistojen painehäviöiden laskenta on useimmiten suuntaa antavaa, mutta absoluuttisen tarkkoja arvoja ei pystytä laskemaan. Pienetkin muutokset prosessissa voivat heilauttaa suuntaan tai toiseen painehäviötä. Opinnäytetyössä pääpainona oli mitoittaa oikean kokoinen pumppu, joten pumppujen teknisiä ominaisuuksia ei käyty syvällisemmin läpi.

Opinnäytetyö aloitettiin tutustumalla putkiston mitoittamiseen vaadittaviin laskukaavoihin. Putkiston painehäviöiden laskenta oli melko suoraviivaista, koska ohjausryhmän kanssa oli määritelty valmiiksi minimivaatimukset putkistolle. Haluttu tilavuusvirta oli valmiina tiedossa suuttimien perusteella, joten ennen laskujen valmistumista tiedettiin hieman suuntaa, kuinka suuresta pumpusta on kyse.

Opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin. Paineentuottoyksikköä ja pumppua voidaan käyttää muidenkin suodatinten lisälaitteena. Vähimmäisvaatimusten ja laskennan perusteella valittiin oikean kokoinen pumppu kyseiselle paineenkorotusyksikölle. Pumppu on mitoitettu tietyn pituiselle putkistolle, putkiston muuttuessa radikaalisti tulee laskenta tehdä uudestaan. Jos putkisto muuttuu, pumpusta on saatavilla isompi malli.

LÄHTEET

Bohl, W. 1988. Teknillinen virtausoppi. 2. painos. Tampere: Tampereen Pikakopio Oy

Engineering calculations, n.d. Pump NPSH calculation tutorial. Luettu 9.4.2021 <https://www.enggcyclopedia.com/2011/07/sample-problem-pump-npsh-calculation/>

Engineersedge, n.d. Moodys Chart. Luettu 3.4.2021. https://www.engineersedge.com/fluid_flow/pressure_drop/moody_chart.htm

Flowrox Oy, n.d. Parempia tuloksia innovatiivisilla tuotteilla ja ratkaisulla. Luettu 10.4.2021. <https://flowrox.com/fi>

Flowrox Oy, n.d. Suodatin-, pumppu- ja venttiilihuolto. Luettu 10.4.2021. <https://flowrox.com/fi/palvelut/>

Flowrox Oy, n.d. Virtauksensäätö, suodatus, ympäristötekniikka ja älykkäät ratkaisut. Luettu 10.4.2019 <https://flowrox.com/fi/tuotteet/>

Grundfos, 1.11.2019. Asiaa pumppukäyristä. Luettu 8.4.2021. <https://www.grundfos.com/fi/learn/ecademy/all-courses/basic-principles-and-pump-types/about-pump-curves>

Grundfos, n.d. CR45-11-2 A-F-A-E-HQQE. Luettu 8.4.2021. <https://product-selection.grundfos.com/products/cr-cre-cri-crie-crn-crne-crt-crte/cr/cr-45-11-2-96122816?productnumber=96122816&custid=GMA&tab=variant-specifications&pumpsystemid=1287877204>

Grundfos, n.d. Kitkaväiö ja kavitaatio. Luettu 8.4.2021 <https://www.grundfos.com/fi/learn/ecademy/all-courses/the-extended-basic-hydraulic-principles-course-/understanding-friction-loss-and-cavitation>

Jokilaakso, A. 1987. Virtausmekaniikan, lämmönsiirron ja aineensiirron perusteet. Hämeenlinna: Karisto Oy

Keski-korsu, T. Managing Director. Bete 1/4NF0550-B@7. Sähköpostiviesti. Luettu 8.4.2021

Motiva, 12/2011. Energiatehokkaat pumput. Luettu 7.4.2021. https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat_pumput.pdf

Muovitech, n.d. Turbocollector. Luettu 5.4.2021. https://www.muovitech.com/pdf/mt_a4_folder_turbo_FI.pdf

Omnicalculator, n.d. Vapor Pressure of Water Calculator. Päivitetty 12.3.2021. Luettu 8.4.2021. <https://www.omnicalculator.com/chemistry/vapour-pressure-of-water>

Omnicalculator, n.d. Water viscosity. Luettu 8.4.2021. <https://www.omnicalculator.com/physics/water-viscosity>

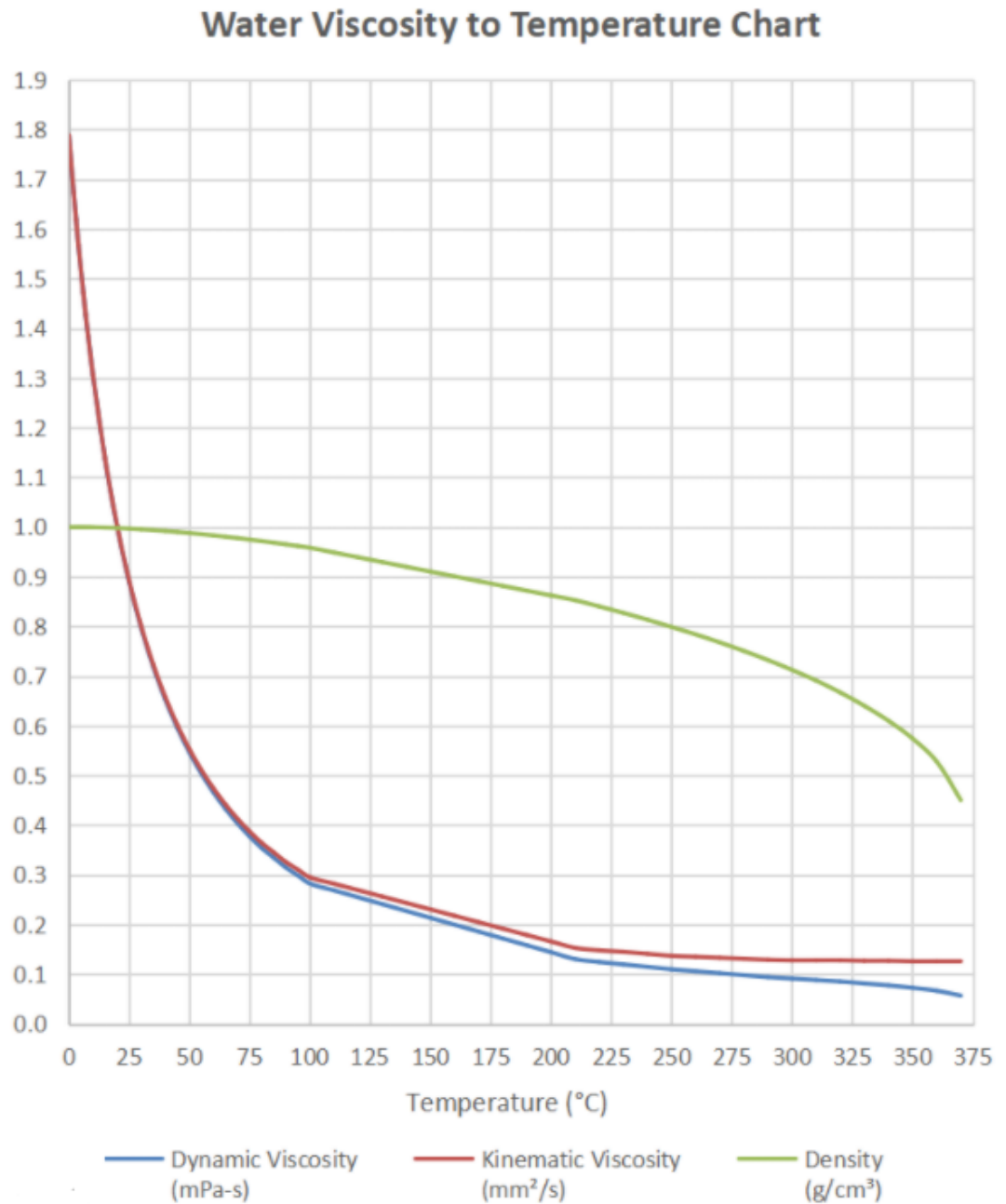
Pipeflow, n.d. Pipe pressure drop calculations. Luettu 5.4.2021. <https://www.pipeflow.com/pipe-pressure-drop-calculations>

Scribd, n.d. Pipe absolute roughness. Luettu 5.4.2021. <https://www.scribd.com/doc/235253706/Roughness-Value-of-Rubber-Hose>

Wuori, P. 1997. Virtausmekaniikan perusteet. 4. täydennetty ja korjattu painos. Helsinki: Otatieto Oy

LIITTEET

Liite 1. Veden kinemaattinen viskositeetti – käyrästäö



(Omnicalculator, n.d. Water viscosity.)

Liite 2. Putkien absoluuttinen karheus

Piping Material	Absolute roughness (Micron)	Source
drawn brass	1.5	(1,2)
drawn copper	1.5	(1,2)
commercial steel	45	(1,2)
wrought iron	45	(1,2)
asphalted cast iron	120	(1,2)
galvanized iron	150	(1,2)
cast iron	260	(1,2)
wood stave	200 to 900	(1,2)
concrete	300 to 3000	(1,2)
riveted steel	900 to 9000	(1,2)
Rubber (smooth)	6 to 70	(3)
Rubber (wire-reinforce)	300 to 4000	(3)
Stainless Steel	45.7	(4)

(Scribd, n.d. Pipe absolute roughness.)