



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ARTTU HALONEN
PROSESSITEOLLISUUDEN PUTKILINJOJEN
ALUSTAVA PAINEHÄVIÖLASKENTA JA MITOITUS

Kandidaatintyö

Tarkastaja: yliopistonlehtori Seppo Syrjälä

TIIVISTELMÄ

ARTTU HALONEN: Prosessiteollisuuden putkilinjojen

alustava painehäviölaskenta ja mitoitus

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 29 sivua

Helmikuu 2018

Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

Avainsanat: mitoitus, painehäviö, PI-kaavio, prosessiteollisuus, putkilinja, putkivirtaus

Nesteiden ja kaasujen kuljettamiseen käytetään tyypillisesti putkilinjoja, joissa virtausta ylläpitää linjan päiden välinen paine-ero. Virtauksen paine kuitenkin vähenee kitka- ja paikallishäviöiden vuoksi putkilinjan matkalla, minkä takia virtauksen painehäviön laskennallinen arviointi on tärkeä osa putkilinjan suunnittelua ja mitoitusta. Työ esittelee prosessiteollisuuden putkilinjojen alustavan mitoituksen kannalta merkittävää teoriapohjaa ja virtausmekaniikan tutkimusta sekä muodostaa esiteltyjen tulosten pohjalta laskuesimerkin alustavaa painehäviölaskentaa ja putkilinjan mitoitusta varten.

Virtausten tarkastelussa keskitytään käytännön sovelluksissa tyypillisiin olosuhteisiin, minkä vuoksi tarkastelu rajoitetaan kokoonpuristumattomiin ja täysin kehittyneisiin virtauksiin pyöreissä putkissa. Virtauksia tarkastellaan yksiulotteisina, mutta putkilinjan korkeusasema huomioidaan energiatarkastelussa. Painehäviön laskennalliseen arviointiin käytetään putkivirtauksille yleisesti käytettyä Darcy–Weisbach-yhtälöä.

Painehäviötä tarkastellaan erikseen virtauksen kitkahäviöinä ja paikallishäviöinä. Darcyn kitkakertoimen määrittämiseksi esitellään Colebrook–White- ja Haaland-yhtälöt sekä Moodyn käyrästä. Kitkakertoimen määrittämisessä huomioidaan putken ekvivalenttikarheus ja putkikarheuden muutos ajan myötä. Paikallishäviötä tarkastellaan kokeellisiin mittaustuloksiin pohjautuvien kertavastuskertoimien sekä venttiilien virtauskertoimien avulla.

Työssä tarkastellaan myös, miten putkilinjan painehäviön suuruuteen voidaan vaikuttaa eri suureiden arvoja muuttamalla. Käytännön rajoituksista johtuen putkikoon kasvattaminen todetaan käytännöllisimmäksi tavaksi pienentää painehäviötä. Tarkasteltujen menetelmien pohjalta esitellään laskuesimerkki, jossa tarkastellaan putkikoon kasvattamisen vaikutusta putkilinjalla tapahtuvaan painehäviöön.

SISÄLTÖ

1. Johdanto	1
2. Kirjallisuuskatsaus	3
2.1 Tutkimustyö	3
2.2 Nykyajan sovellukset	4
3. Putkivirtaus	5
3.1 Virtauksen energiatarkastelu	5
3.2 Painehäviö	8
4. Kitkakerroin	10
4.1 Kitkakertoimen merkitys	10
4.2 Kitkakertoimen määrittäminen	12
5. Paikallishäviöt	15
5.1 Kertavastuskerroin	15
5.2 Virtauskerroin	18
5.3 Vakiopainehäviö	19
6. Käytännön tarkastelu	20
6.1 Putkitus- ja instrumentointikaavio	20
6.2 Putkiston mitoitus	22
6.3 Laskuesimerkki	24
7. Yhteenveto	28
Lähteet	29

KUVAT

3.1	Havainnekuva virtauksen energiatarkastelusta.	6
4.1	Moodyn käyrästäö.	14
6.1	Esimerkki PI-kaaviosta.	20

TAULUKOT

4.1	Putkimateriaalien ekvivalenttikarheuksia.	12
5.1	Putkikäyrien kertavastuskertoimia.	16
5.2	Venttiilien kertavastuskertoimia.	17
6.1	Laskuesimerkin tulosten vertailua.	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ISO	International Organization for Standardization
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
SI	Système international d'unités, International System of Units
a	äänen nopeus väliaineessa
c_f	Fanningin kitkakerroin
C_v	virtauskerroin, <i>flow coefficient</i>
D_h	virtausuoman hydraulinen halkaisija, karakteristinen mitta
d	putken sisähalkaisija
f	putken kitkakerroin, Darcyn kitkakerroin
g	putoamiskiihtyvyyden
h_f	kitka- ja paikallishäviöistä aiheutuva nostokorkeushäviö, painehäviö
h_p	pumpun tuottama nostokorkeuslisä
I	hydraulinen gradientti
K	kertavastuskerroin
k	putken absoluuttinen pinnankarheus
k_v	virtauskerroin, <i>flow factor</i>
L	putken pituus
Ma	Machin luku
p	paine
Re	Reynoldsin luku
SG	suhteellinen tiheys
V	virtauksen keskinopeus
z	korkeusasema referenssitasosta
γ	ominaispaino
ϵ	putken ekvivalenttinen pinnankarheus
ζ	kertavastuskerroin
λ	putken kitkakerroin
μ	dynaaminen viskositeetti
ν	kinemaattinen viskositeetti
ρ	tiheys
Σ	summa

1. JOHDANTO

Prosessiteollisuudessa neste- ja kaasumaisia prosessiaineita kuljetetaan laitosten sisällä usein paineistetuissa putkissa ja putkistoissa. Virtausaineen pumppaamisella aikaansaatu paine toimii virtausta ajavana voimana, mutta paine kuitenkin laskee putken matkalla virtauskitkasta johtuvan kitkahäviön sekä putkikäyrissä, venttiileissä ynnä muissa laitteissa tapahtuvien paikallishäviöiden seurauksena. Prosessin eri vaiheet ja laitteet asettavat omia vaatimuksiaan vaadittavalle painetasolle, ja joissain tapauksissa myös virtausnopeudelle asetetaan vaatimuksia. Näin ollen laitoksen putkilinjojen putkikoot on mitoitettava siten, että virtaukselle asetetut vaatimukset täyttyvät. Teollisuuden sovelluksissa on kuitenkin huomioitava myös erikokoisten putkien kustannukset sekä fyysisen tilan rajoitteet.

Prosessiteollisuuslaitoksen suunnittelu on itsessään monimutkainen prosessi, joka koostuu useista eri vaiheista. Alustavan suunnittelun tukena käytetään putkitus- ja instrumentointikaavioita, jotka kuvaavat laitoksen prosessin rakennetta yleisellä tasolla. Vaikka kaavio ei otakaan kantaa moniin painehäviölle oleellisiin tekijöihin, kuten esimerkiksi putkilinjan pituuteen, reittiin tai korkeusasemaan, voidaan kaavion tietojen pohjalta suorittaa alustavaa painehäviölaskentaa.

Tässä työssä käsitellään putkivirtausten painehäviöön liittyviä ilmiöitä sekä niiden mallintamiseen käytettäviä laskennallisia malleja. Työn tarkoituksena on kuvata pätevä mutta yksinkertainen tapa suorittaa putkilinjan alustavaa painehäviölaskentaa ja mitoittaa putkilinjaa tulosten perusteella. Koska useimmat käytännön virtaussovellukset prosessiteollisuudessa liittyvät nesteiden tai muiden fluidien virtauksiin pyöreissä putkissa suhteellisen alhaisilla nopeuksilla, työssä keskitytään tarkastelemaan kokoonpuristumattomia putkivirtauksia pyöreissä putkissa.

Luvussa 2 tarkastellaan painehäviölaskennan historiallista taustaa ja nykysovelluskohteita. Painehäviölaskennan kannalta keskeisiä tutkimuksia käsitellään alaluvussa 2.1 ja tutkimusten hyötyä nykypäivän teollisuudelle alaluvussa 2.2. Luvussa 3 perehdytään tarkemmin painehäviölaskennan kannalta oleellisimpiin ilmiöihin teorian ja laskennallisten mallien kautta. Painehäviöyhtälöissä esiintyvään putken kitkakertoimeen keskitytään luvussa 4, ja luku 5 käsittelee paikallishäviöitä putkikäyrissä, vent-

tiileissä ja muissa vastaavissa putkilinjan laitteissa. Teoriapohjan tarkastelun jälkeen käsitellään putkivirtauksen painehäviötä käytännön kontekstissa luvussa 6. Alaluku 6.1 käsittelee putkitus- ja instrumentointikaavioiden tarjoamia mahdollisuuksia alustavalle painehäviölaskennalle, ja alustavien tulosten mahdollistamaa putkilinjojen mitoitus- ja tarkastellaan alaluvussa 6.2. Luvussa 6.3 on esitetty tiivis laskuesimerkki, jossa hyödynnetään aiemmissa luvuissa esiteltyjä menetelmiä ja yhtälöitä. Työn lopussa luku 7 sisältää yhteenvedon painehäviölaskenta- ja mitoitusprosessista kokonaisuutena.

2. KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Tutkimustyö

Ensimmäinen vedenjakeluun tarkoitettu paineistettu putkilinja rakennettiin jo 283 eaa. – 133 eaa. nykyisen Länsi-Turkin alueella sijainneessa Pergamonin kaupungissa. Yhteensä noin 45 km:n mittainen putkiverkosto koostui halkaisijaltaan 13 ja 18 cm olevista lyijy- ja saviputkista, joissa virtaavan veden paine oli korkeimmillaan yli 17 bar. [1, s. 6] Antiikin aikana fluidien mekaniikan tutkimus oli kuitenkin vähäistä, joskin Arkhimedeeseen 200-luvulla eaa. tekemät havainnot fluidin aiheuttamasta nosteesta ovat merkittäviä vielä tänäkin päivänä.

Vaikka erilaisia laitteita, kuten vesimyllyjä ja mäntäpumppuja käytettiin jo keskiajan Euroopassa, fluidien syvällisempi tutkimus ja ymmärrys alkoi merkittävästi kehittyä vasta renessanssin aikaan [1, s. 6]. Ensimmäisiin fluidien jatkuvuusyhtälön kehittäjiin kuuluivat Leonardo da Vinci [2, s. 40] ja Benedetto Castelli [1, s. 6] renessanssin loppupuolella. Nimensä paineen SI-yksikölle saanut Blaise Pascal kehitti 1600-luvulla hydrostaattisen paineen tuntemusta aiemman alan tutkimuksen pohjalta [1, s. 6].

1700-luvulla Sir Isaac Newton sovelsi kehittämiään liikeyhtälöitä fluideille, minkä pohjalta Daniel Bernoulli ja Leonhard Euler kehittivät nykyisessä fluidien mekaniikan tarkastelussa usein käytetyt energia- ja liikemääräyhtälöt, kuten Bernoullin yhtälönä (3.3) tunnetun energiayhtälön [2, s. 40][1, s. 6]. Fluidien virtausten tutkimus eteni 1800-luvulla Jean Poiseuillen, Gotthilf Hagenin ja Osborne Reynoldsin kokeellisten tutkimusten myötä, minkä seurauksena syntyi ajatus virtauksen laminaarisuudesta ja turbulenssista [1, s. 7].

Painehäviölaskennan kannalta olennaisen Darcy–Weisbach-yhtälön kehittivät 1800-luvun puolivälissä Julius Weisbach ja Henry Darcy, joista jälkimmäinen muodosti ensimmäisenä putken kitkakertoimen ja pinnankarheuden välisen yhteyden matemaattisen mallin [2, s. 315]. 1930-luvulla Johann Nikuradse suoritti merkittäviä kokeellisia mittauksia, joilla selvitettiin Darcyn nimeä kantavan kitkakertoimen riippuvuutta putken pinnan ekvivalenttikarheudesta [1, s. 367].

Vuonna 1939 Cyril Colebrook yhdisti olemassaolevien kokeellisten tutkimusten tuloksia Colebrook- tai Colebrook–White-yhtälönä (4.5) tunnetuksi laskennalliseksi yhteydeksi putken pinnankarheuden ja kitkakertoimen välillä. Lewis Moody kehitti yhtälön pohjalta Moodyn käyrästönä tunnetun graafisen apuvälineen putken kitkakertoimen määrittämiseksi. [1, s. 367]

2.2 Nykyajan sovellukset

Putkivirtauksia käytetään laajalti prosessiteollisuudessa erilaisten prosessiaineiden kuljettamiseen, mutta merkittäviä putkivirtausten sovelluksia löytyy myös yhteiskunnallisen vedenjakelun, kaukolämmön ja jäteveden käsittelyn aloilta. Lisäksi energiantuotannossa yleisten höyrykiertoon pohjautuvien voimalaitosten toiminta rakentuu pitkälti putkivirtausten varaan. Virtausmekaniikkaa sovelletaan myös lääketieteen alalla muun muassa verenkierron ja hengityselimistön mallintamiseen [1, s. 4].

Erilaisten fluidien virtaukset ovat keskeisessä osassa monissa Suomelle tärkeiden teollisuusalojen laitoksissa, kuten metsäteollisuuden sellutehtaissa ja petrokemianteollisuuden öljynjalostamoissa [3, s. 14]. Raakaöljyn tislauksessa muodostuu jakeina lukuisia eri fluideja, kuten propaania, butaania, bensiiniä ja dieseliä, joita kuljetaan jatkojalostukseen putkilinjoilla [3, s. 25]. Laitosten mittakaavat ovat suuria, ja esimerkiksi butaanin jalostukseen käytettävän alkylointiyksikön kapasiteetti voi olla jopa 170 000 tonnia vuodessa [3, s. 32].

Vaikka putkivirtausten sovellusalojen kirjo on laaja, ilmiöiden taustalla oleva teoria ja ilmiöihin liittyvät perustavanlaatuiset tarkastelumenetelmät ovat pääpiirteissään samanlaisia. Käytännön sovelluksissa useimpia putkivirtauksia voidaan mallintaa samoilla yhtälöillä, joita tässä työssä tullaan tarkastelemaan.

3. PUTKIVIRTAUS

3.1 Virtauksen energiatarkastelu

Painehäviölaskennassa virtaukset jaotellaan tyypillisesti kokoonpuristuviin ja kokoonpuristumattomiin virtauksiin, koska virtausaineessa tapahtuvat tiheyden muutokset vaikuttavat virtausaineen paineeseen ja siten myös painehäviöön. Kokoonpuristuvuudesta johtuva paineen muutos on suhteellisen alhaisilla virtausnopeuksilla kuitenkin käytännön sovelluksia ajatellen usein merkityksettömän pieni verrattuna kitka- ja paikallishäviöihin. Kokoonpuristuvuutta käsiteltäessä tarkastellaan usein yksikötöntä suuretta, Machin lukua Ma , jolle on voimassa yhtälö

$$Ma = \frac{V}{a}, \quad (3.1)$$

jossa V on virtauksen keskinopeus ja a on äänen nopeus virtausaineessa. Virtausta käsitellään usein kokoonpuristumattomana silloin, kun virtauksen Machin luvulle on voimassa [2, s. 205]

$$Ma \leq 0,3. \quad (3.2)$$

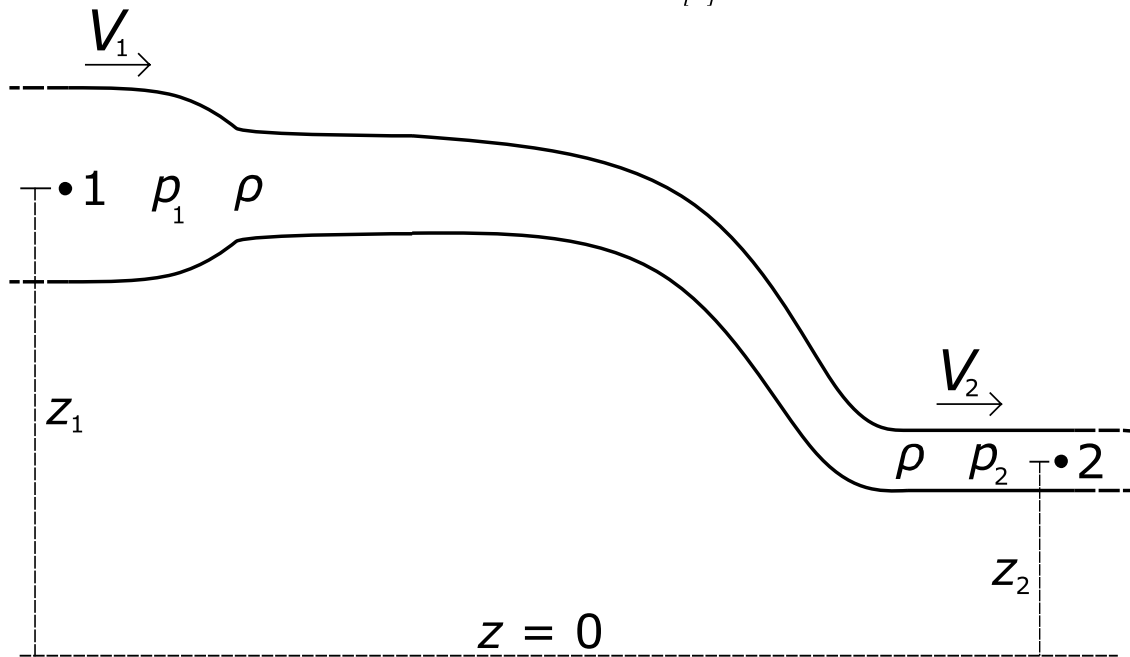
Nesteillä äänen nopeus on tyypillisesti huomattavan suuri verrattuna virtausnopeuksiin useimmissa käytännön sovelluksissa, joten nestevirtausten Machin luvut ovat usein pieniä. Näin ollen sekä nesteitä että kaasuja voidaan painehäviölaskennan yhteydessä käsitellä useimmiten kokoonpuristumattomina. [2, s. 205]

Kitkattomalle kokoonpuristumattomalle virtaukselle voidaan johtaa kuvan 3.1 mukaisen systeemin kahden pisteen välisen lineaarisen liikemäärätarkastelun avulla virtaushäviölaskentaa varten hyödyllinen Bernoullin yhtälönä tunnettu lauseke

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + gz_2 = \text{vakio}, \quad (3.3)$$

jossa alaindeksit 1 ja 2 viittaavat systeemin tarkastelupisteisiin, p on virtausaineen paine, ρ virtausaineen tiheys, V virtauksen keskinopeus, z tarkastelupisteen korkeus tarkastelun nollatasosta ja g putoamiskiihtyvyyys. [2, s. 146–148][4, s. 238–239]

Muokattu lähteestä [1].



Kuva 3.1 Havainnekuva virtauksen energiatarkestelusta.

Bernoullin yhtälöä voidaan tulkita myös energian säilymisen kannalta, vaikka yhtälö onkin johdettu liikemäärän pohjalta. Ryhmittelemällä termejä uudelleen yhtälö saadaan muotoon

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) = 0, \quad (3.4)$$

jossa tarkastelupisteiden välillä tapahtuva muutos koostuu painetta vastaan tehdystä palautuvasta työstä, liike-energian muutoksesta sekä potentiaalienergian muutoksesta [2, s. 148]. Yksikkötarkastelulla havaitaan, että yhtälö käsittelee energiaa massayksikköä kohden.

Vaikka Bernoullin yhtälö on johdettu olettamalla virtaus kitkattomaksi, voidaan tarkasteluun kuitenkin liittää myös kitkasta johtuvia energiahäviöitä. Yhtälöä voidaan muokata myös erityisesti painehäviölaskentaa varten käytännöllisiin muotoihin jakamalla tai kertomalla yhtälöä puolittain tietyllä termillä. Kertomalla yhtälö (3.3) puolittain tiheydellä ρ saadaan yhtälö muotoon

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g z_2, \quad (3.5)$$

jossa yhtälön termit ovat paineen yksiköissä. Nesteiden ja pumppujen yhteydessä Bernoullin yhtälöä ja virtauksen painetasoa käsitellään kuitenkin usein matkan yksikössä olevan nostokorkeuden avulla. Nostokorkeutta vastaava muoto saadaan ja-

kamalla yhtälö (3.3) puolittain putoamiskiihtyvyydellä g , jolloin yhtälö saa muodon

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2. \quad (3.6)$$

Yhtälössä esiintyvä tiheydestä ρ ja putoamiskiihtyvyydestä g koostuva termi ρg voidaan esittää myös ominaispainon $\gamma = \rho g$ avulla. Suuretta ominaispaino eli *specific weight* ei pidä sekoittaa suureeseen SG eli *specific gravity*, jolle käytetään nimitystä suhteellinen tiheys tai joskus myös ristiriitaisesti ominaispaino. Suhteellinen tiheys SG viittaa tarkasteltavan aineen ja tietyn referenssiaineen tiheyksiin. Nesteille referenssiaine on tyypillisesti vesi lämpötilassa 4 °C [2, s. 16] tai 60 °F eli noin $15,6\text{ °C}$ [5, s. 1–3]. Kaasuille referenssiaine on yleensä ilma [2][5] tai vety [5]. Koska kaasun tiheys riippuu paineesta ja lämpötilasta, tulee referenssiaineen tilaa vastaava paine ja lämpötila ilmoittaa sekaannusten välttämiseksi. Esimerkiksi nestemäisen metanolin suhteellinen tiheys voidaan laskea yhtälöllä [2, s. 16]

$$SG_{CH_3OH} = \frac{\rho(CH_3OH)}{\rho(H_2O, 4\text{ °C})}. \quad (3.7)$$

Virtaushäviöistä ja pumpputyöstä johtuvat muutokset virtauksen nostokorkeudessa voidaan ottaa huomioon Bernoullin yhtälössä (3.6). Energian säilymlakien tapaan nostokorkeuksia kahden tarkastelupisteen välillä kuvaava yhtälö saa muodon

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f, \quad (3.8)$$

jossa h_p on pumpun tuottama nostokorkeuden lisä ja h_f on kitkahäviöstä johtuva nostokorkeuden häviö [2, s. 164]. Paikallishäviöistä aiheutuva nostokorkeushäviö voidaan sisällyttää kitkahäviötermiin h_f . Vaikka nostokorkeuden ja paineen yksiköt eroavat toisistaan, nostokorkeushäviö ja painehäviö ovat vain eri näkökulmia virtauksen energiahäviöön. Tästä syystä myös nostokorkeushäviölle käytetään tyypillisesti yksinkertaisempaa nimitystä painehäviö. Yhtälöä (3.8) voidaan soveltaa lähtötilanteesta riippuen eri käytännön tarkoituksiin. Yhtälöllä voidaan esimerkiksi selvittää putkilinjan loppupään painetaso tai putkilinjalla olevalta pumpulta vaadittu nostokorkeus.

3.2 Painehäviö

Täysin kehittyneelle tasaiselle virtaukselle pyöreässä putkessa on esitetty Darcy–Weisbach-yhtälö, jossa virtauksen virtauskitkasta aiheutuva painehäviö h_f on esitetty muodossa

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g}, \quad (3.9)$$

jossa f on putken kitkakerroin, L putken pituus, d putken halkaisija, V virtauksen keskinopeus ja g putoamiskiihtyvyyden kaksinkertainen [2, s. 315][4, s. 361][5, s. 3–10]. Joissain yhteyksissä kitkakertoimelle käytetään myös merkintää λ . Kitkakertoimen f merkitystä ja määrittystä tarkastellaan tarkemmin luvussa 4. Yhtälöllä (3.9) laskettu painehäviö voidaan sijoittaa yhtälön (3.8) mukaiseen energiataarkasteluun.

Yhtälö voidaan palauttaa painehäviömuotoon kertomalla yhtälö (3.9) puolittain putoamiskiihtyvyydellä g sekä tiheydellä ρ , jolloin yhtälö saa muodon

$$\Delta p = f \frac{L \rho V^2}{d 2}. \quad (3.10)$$

Yhtälöt (3.9) ja (3.10) pätevät turbulentsilla virtauksilla yleisesti myös ei-pyöreille poikkileikkauksille, kun putken halkaisijan d tilalla käytetään putken hydraulista halkaisijaa D_h . Hydraulinen halkaisija on määritelty yhtälöllä

$$D_h = \frac{4A}{p}, \quad (3.11)$$

jossa A on putken poikkipinnan ala ja p putken märkäpiiri, eli nesteen kanssa kosketuksissa olevan pinnan piiri. Ympyräpoikkileikkauksella hydraulinen halkaisija D_h on yhtä suuri kuin putken halkaisija d . [2, s. 337]

Yhtälö (3.9) esittää painehäviön yhteenlaskettuna koko putken matkalla L . Pitkien putkilinjojen yhteydessä, kuten esimerkiksi vedenjakelu- tai kaukolämpöverkostoissa, on kuitenkin usein mielekästä tarkastella painehäviön syntymistä matkan eli putken pituuden funktiona. Kun matka on tarpeeksi pitkä ja siten yhteenlaskettu painehäviö on tarpeeksi suuri, yksittäisen venttiilin tai putkikäyrän paikallishäviön tapahtumiskohta putken matkalla ei ole erityisen merkityksellinen, vaan putkilinjalla tapahtuva painehäviö voidaan olettaa lineaariseksi. Tällöin nostokorkeuden muutos matkan funktiona eli hydraulinen gradientti I voidaan määrittää jakamalla yhtälö (3.9) puolittain putken pituudella L , jolloin yhtälö saa muodon

$$I = \frac{h_f}{L} = \frac{f V^2}{d 2g}. \quad (3.12)$$

Vaikka sekä nostokorkeuden muutos h_f että putken pituus L esitetään matkan yksiköissä, hydraulisen gradientin I yksikköä ei ole mielekästä supistaa pois. SI-yksiköissä hydraulisen gradientin yksikkö on periaatteessa m/m eli metriä per metri. Jotta yksikön varsinainen merkitys, metriä nostokorkeutta per metriä putkea, tulisi selkeämmin esiin yksiköstä, voidaan nostokorkeuden tai pituuden yksikkö ilmaista toisin. Nostokorkeuden yksikössä voidaan täsmentää, mitä fluidia nostokorkeus vastaa, esimerkiksi

$$I = 2 \text{ m}_{H_2O}/\text{m}. \quad (3.13)$$

Vaihtoehtoisesti hydraulinen gradientti voidaan ilmoittaa poikkeavaa matkaa kohti, esimerkiksi

$$I = 1,2 \text{ m}/\text{m} = 1200 \text{ m}/1000 \text{ m}. \quad (3.14)$$

Putken kitkahäviöiden lisäksi virtauksen painehäviöihin vaikuttavat myös erilaiset putkilinjalla olevat laitteet ja erikoistapaukset, kuten putkikäyrät, venttiilit, halkaisijan muutokset sekä virtaus säiliöön tai säiliöstä ulos. Tällaisissa tapauksissa painehäviöitä kutsutaan paikallishäviöiksi, joita käsitellään luvussa 5.

4. KITKAKERROIN

4.1 Kitkakertoimen merkitys

Virtauksen nostokorkeus- tai painehäviötä kuvaavissa Darcy–Weisbach-yhtälöissä (3.9) ja (3.10) esiintyy yksikötön kitkakerroin f . Kyseistä suuretta kutsutaan Darcyn kitkakertoimeksi, ja sen suuruus riippuu virtauksen turbulentsisuudesta sekä putken muodosta, koosta ja pinnankarheudesta. Lähteestä riippuen kitkakertoimelle käytetään myös tunnusta λ tai ξ . Joissain lähteissä käytetään vaihtoehtoista Fanningin kitkakerrointa, jota kuvataan tunnuksella c_f tai joskus myös tunnuksella f . Näin ollen kitkakertoimen yhteydessä on syytä varmistaa, viittaako f kyseisessä lähteessä Darcyn vai Fanningin kitkakertoimeen. Täysin kehittyneellä virtauksella Darcyn kitkakertoimelle f ja Fanningin kitkakertoimelle c_f on voimassa yhteys [5, s. 8–59]

$$f = 4 c_f. \quad (4.1)$$

Virtaukset luokitellaan tyypillisesti laminaarisiin ja turbulentsisiin virtauksiin. Laminaariselle virtaukselle on ominaista virtausviivojen tasaisuus ja virtauksen järjestelmällisyys, kun taas turbulentsinen virtaus on nopeusjakaumaltaan epätasaista ja kaoottista. Virtauksen tyyppin vaihtuminen laminaarisesta turbulentsiseen ei kuitenkaan ole tarkasti ennustettavissa, vaan näiden kahden alueen välissä on niin sanottu siirtymäalue. [1, s. 417] Virtauksen turbulentsisuus vaikuttaa kitkakertoimen suuruuteen ja sen määrittämis menetelmän valintaan.

Virtauksen turbulentsisuutta kuvataan Reynoldsin luvuksi kutsutulla yksiköttömällä suureella Re , joka riippuu virtausaineeseen kohdistuvien inertia- ja viskoosivoimien suhteesta. Reynoldsin luvulle on voimassa yhtälö

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu}, \quad (4.2)$$

jossa V on virtauksen keskinopeus ja D on virtausuoman karakteristinen mitta. Pyöreälle putkelle karakteristinen mitta D on putken sisähalkaisija. [1, s. 350]

Yhtälössä esiintyville kinemaattiselle viskositeetille ν ja dynaamiselle viskositeetille μ on voimassa yhteys [1, s. 350]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (4.3)$$

jossa ρ on virtausaineen tiheys.

Reynoldsin luvun kasvaessa virtauksen turbulenttisuus kasvaa. Vaikka virtauksen siirtyminen laminaarisesta turbulenttiseen ei ole täysin ennustettavissa, esitetään virtauksen tyypille usein Reynoldsin lukuun perustuvia rajoja. Käytännön sovel-luksissa tyypillisesti ajatellaan virtauksen olevan laminaarinen, kun $Re < 2300$ ja turbulenttinen kun $Re > 4000$ [1, s. 417]. Siirtymäalueena voidaan siis pitää aluetta $2300 < Re < 4000$. Kyseiset laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen rajalukuarvot pätevät vain poikkileikkaukseltaan pyöreille putkille. Kitkakertoimen määrittystä eri virtauslajeille tarkastellaan alaluvussa 4.2.

Virtauksen ominaisuuksien lisäksi virtauksen kitkakertoimeen vaikuttavat myös vir-tauskanavan ominaisuudet. Nikuradsen karheiden putkien virtaustutkimuksen [6] kokeellisiin tuloksiin pohjautuva ekvivalenttikarheus ϵ kuvaa putken sisäpinnan kes-kimääräistä epätasaisuutta pituusmittana [5, s. 3–12]. Lähteestä riippuen pinnan-karheudelle käytetään usein myös tunnusta k tai e ja suuretta voidaan kutsua myös absoluuttiseksi pinnankarheudeksi. Pinnankarheus esiintyy kitkakertoimen yhtälöis-sä tyypillisesti yksiköttömässä muodossa suhteellisena pinnankarheutena ϵ/d eli ab-soluuttisen pinnankarheuden ja putken sisähalkaisijan suhteena.

Putken kitkakerroin ei tyypillisesti käytännössä kuitenkaan säily vakiona koko käyt-töiän ajan, vaan ajan myötä putken kulumisen ja putken sisäpintaan kertyvät epä-puhtaudet kasvattavat putken ekvivalenttikarheutta. Näin ollen putken kitkakerroin ja sitä myötä myös putkessa tapahtuva painehäviö kasvavat putken vanhentuessa. Eri materiaaleista valmistetuille uusille ja vanhoille putkille on eri lähteissä tarjolla kokeellisiin tutkimuksiin perustuvia ekvivalenttikarheuden taulukkoarvoja, joita on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1 Putkimateriaalien ekvivalenttikarheuksia.

Koottu lähteistä [1][2][7].

Materiaali	ϵ [mm]	
teräs, uusi	0,05	[2]
	0,045	[1]
teräs, ruostunut	0,15...0,2	[7]
valurauta, uusi	0,26	[2]
valurauta, ruostunut	0,5...1,5	[7]
messinki, uusi	0,002	[2]
	0,0015	[1]
lasi	0 (sileä)	[1][2]

Taulukossa 4.1 esitetyt arvot ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, ja niiden mitausepävarmuudet voivat olla jopa $\pm 60\%$ [2, s. 368]. Mikäli putki pääsee karstoittumaan, ekvivalenttikarheus voi esimerkiksi teräs- tai valurautaputkella nousta jopa arvoon $\epsilon = 3$ mm [7, s. 254].

Kaikki edellä esiteltyt muuttujat eivät kuitenkaan aina vaikuta merkittävästi kitkakertoimeen, vaan esimerkiksi laminaarisessa virtauksessa kitkakerroin riippuu ainoastaan virtauksen Reynoldsin luvusta. Kitkakertoimen määrittämiseen kehitettyjä menetelmiä käsitellään tarkemmin alaluvussa 4.2. Putkivirtauksen alussa virtauksen nopeusjakauma ei ole vielä täysin kehittynyt, jolloin myöskään kitkakerroin ei ole saavuttanut lopullista arvoaan. Virtauksen kehittymismatka on käytännön sovellusten kannalta kuitenkin tyypillisesti riittävän lyhyt verrattuna putkilinjan pituuteen, jotta kitkakerrointa on perusteltua tarkastella olettaen virtaus täysin kehittyneeksi [2, s. 313].

4.2 Kitkakertoimen määrittäminen

Laminaarisessa virtauksessa putken suhteellisen pinnankarheuden merkitys kitkakertoimeen on vähäinen, jolloin kitkakerroin riippuu käytännössä ainoastaan virtauksen Reynoldsin luvusta. Tällöin pyöreän putken Darcyn kitkakertoimelle voidaan johtaa yhtälö [6, s. 10]

$$f = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (4.4)$$

Yksi tunnetuimmista kitkakerroinkorrelaatioista on Colebrook–White-yhtälö, joka yhdistää sileille ja karheille putkille kokeellisesti määritettyjä kitkakertoimen arvoja siirtymäalueella oleville ja turbulenttisille virtauksille yhteen empiiriseen yhtälöön [1, s. 367]. Usein Colebrook–White-yhtälöön viitataan yksinkertaisemmin vain Colebrook-yhtälönä. Yhtälö on kitkakertoimen suhteen implisiittinen ja esitetään tyypillisesti muodossa [2, s. 328]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log_{10} \left(\frac{\epsilon/d}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right), \quad (4.5)$$

jossa f on Darcyn kitkakerroin, ϵ putken ekvivalenttikarheus, d putken sisähalkaisija ja Re virtauksen Reynoldsin luku. Yhtälön laajasta kokeellisesta pohjasta huolimatta yhtälö on tarkoitettu vain turbulenttisille virtauksille [1, s. 367]. Siirtymäalueen virtauksen ennustamattoman käyttäytymisen vuoksi kitkakeroa siirtymäalueella ei voida luotettavasti määrittää [2, s. 329].

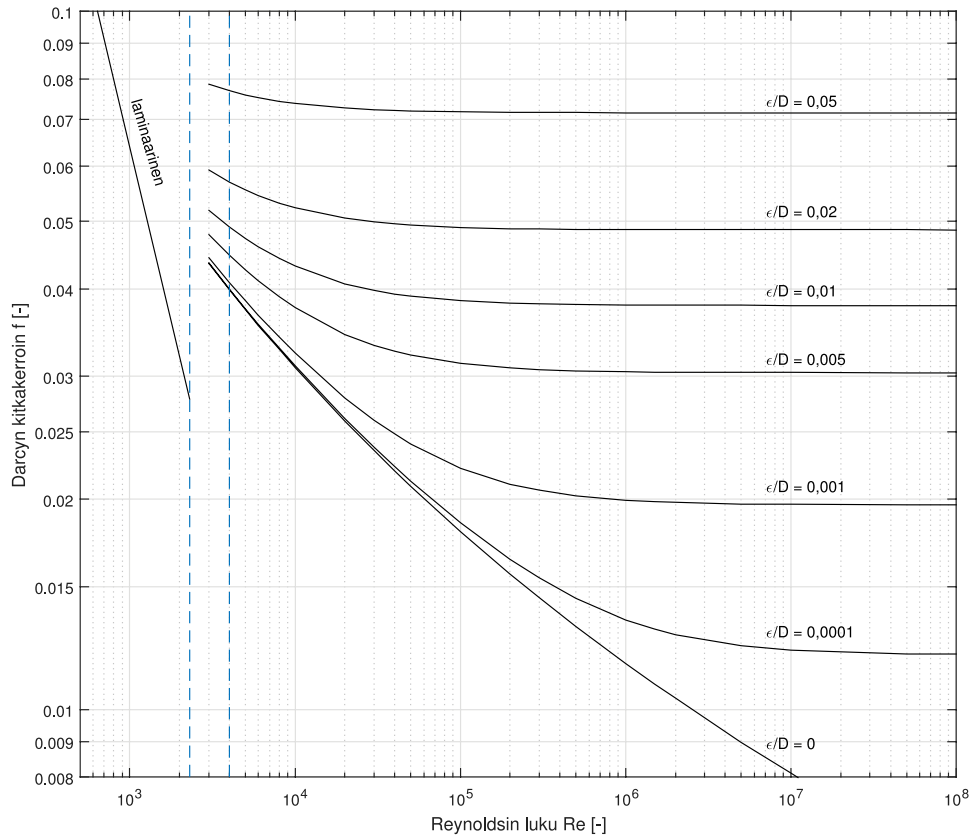
Yhtälön (4.5) implisiittisyyden takia kitkakertoimen arvon laskeminen vaatii iteroitua. Yhtälöstä on kuitenkin muodostettu myös eksplisiittisiä approksimaatioita, kuten Haalandin yhtälö [2, s. 329]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log_{10} \left(\left(\frac{\epsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{\text{Re}} \right), \quad (4.6)$$

jonka avulla kitkakerroin f voidaan ratkaista ilman tarvetta iteroinnille. Haalandin yhtälön tulokset poikkeavat Colebrook–White-yhtälön tuloksista alle 2 % [2, s. 329].

Colebrook–White-yhtälön pohjalta on muodostettu myös yleisesti käytössä oleva graafinen esitys, jota kutsutaan Moodyn käyrästäksi. Käyrästä esittää Darcyn kitkakertoimen Reynoldsin luvun funktiona käyttäen molemmilla akseleilla logaritmisista asteikkoja. Kuvaaajaan on piirretty muuttuvan suhteellisen karheuden mukaisia käyriä, joiden avulla virtauksen kitkakerroin voidaan lukea kuvaajan pystyakselilta.

Muokattu lähteestä [1].



Kuva 4.1 Moodyn käyrästä.

Kitkakertoimelle on tuoreemmissa julkaisuissa muodostettu myös kattavampia, joskin myös samalla monimutkaisempia laskennallisia ratkaisumenetelmiä, jotka kattavat laminaariset ja turbulentsit sekä siirtymäalueen virtaukset sileillä ja karheilla putkilla [8, s. 9]. Vaikka monimutkaisemmat menetelmät ovat kattavampia ja joissain tilanteissa tarkempia, putkiston alustavan mitoituslaskennan kannalta riittäviin tuloksiin päästään kuitenkin myös edellä esitetyillä yksinkertaisemmilla ja perinteisemmällä menetelmällä, kuten Colebrook–White-yhtälöllä (4.5) tai Moodyn käyrästä (kuva 4.1). On myös huomioitava, että vaikka yhtälö tarjoaisi kitkakertoimelle arvon siirtymäalueella, kyseinen tulos ei välttämättä vastaa todellisuutta. Lisäksi painehäviölaskennassa putken ekvivalenttikarheuden arvo on tyypillisesti suurempi virhelähde kuin kitkakerroin.

5. PAIKALLISHÄVIÖT

5.1 Kertavastuskerroin

Monet käytännön sovelluksissa esiintyvät putkilinjan elementit, kuten putkikäyrät, venttiilit ja putkikoon muutokset, aiheuttavat paikallishäviöiksi kutsuttuja painehäviöitä, joille on voimassa yhtälö

$$h_f = K \frac{V^2}{2g}, \quad (5.1)$$

jossa K on laitteelle tai muulle vastaavalle paikallishäviön aiheuttajalle määritetty yksikötön kertavastuskerroin [2, s. 345][5, s. 3–19], V on virtauksen keskinopeus ja g on putoamiskiihtyvyyys. Etenkin saksankielisessä kirjallisuudessa kertavastuskerroimelle käytetään myös merkintää ζ . Paikallishäviö voidaan laskea nostokorkeuden sijaan myös paineen yksiköissä yhtälöllä [7, s. 105]

$$\Delta p = K \frac{\rho V^2}{2}, \quad (5.2)$$

jossa ρ on virtausaineen tiheys.

Kertavastuskerroin voidaan teoriassa määrittää analyyttisesti ainakin putkilinjan äkilliselle laajenemiselle [5, s. 3–19], mutta käytännössä tarjolla olevat taulukkoarvot kertavastuskertoimille on määritetty kokeellisesti. Vaikka taulukoissa on usein esitetty kertavastusarvoja jaoteltuna laitteen tyyppin ja kokoluokan mukaan, on esimerkiksi eri valmistajien venttiilien kertavastuskertoimissa suuriakin eroja. Putkikäyrien kertavastuskertoimia on esitetty taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Putkikäyrien kertavastuskertoimia.

Koottu lähteestä [1].

	<i>K</i>
90° käyrä, <i>bend</i>	
· pyöristetty	
· laipoilla	0,3
· kierteillä	0,9
· jyrkkä viiste, <i>miter bend</i>	
· ohjaussiivekkeillä, <i>vanes</i>	0,2
· ilman ohjaussiivekkeitä	1,1
45° käyrä, <i>elbow</i>	
· kierteillä	0,4
180° käyrä, <i>return bend</i>	
· laipoilla	0,2
· kierteillä	1,5

Taulukossa 5.1 esitetyt arvot ovat kuitenkin suuntaa antavia, ja putkikäyrien todelliset kertavastuskertoimet voivat vaihdella huomattavasti [1, s. 378]. Taulukossa 5.2 on esitetty venttiilien kertavastuskertoimia. Myös venttiilien kertavastuskertoimet vaihtelevat muun muassa venttiilin suunnittelun ja toimittajan mukaan. Venttiilin asento vaikuttaa myös osaltaan suuresti venttiilin kertavastuskertoimeen. Taulukossa 5.2 esitetyt arvot vastaavat täysin avoinna olevia venttiilejä [2, s. 346]. Venttiilit on jaoteltu nimelliskoon, *nominal diameter* eli DN, mukaan.

Taulukko 5.2 Venttiilien kertavastuskertoimia.

Koottu lähteestä [2].

	K
palloventtiili, <i>globe</i>	
· laipoilla	
· DN 25	13
· DN 50	8,5
· DN 100	6,0
· kierteillä	
· DN 25	8,2
· DN 50	6,9
· DN 100	5,7
luistiventtiili, <i>gate</i>	
· laipoilla	
· DN 25	0,80
· DN 50	0,35
· DN 100	0,16
· kierteillä	
· DN 25	0,24
· DN 50	0,16
· DN 100	0,11

Taulukon 5.2 arvoille on ilmoitettu jopa $\pm 50\%$ mittausepävarmuus, eli kertavastuskertoimien arvot ovat jälleen vain suuntaa antavia. Venttiilin toimittaja tyypillisesti ilmoittaa kullekin tietylle venttiilimallille mitatun kertavastuskertoimen arvon, joka on juuri kyseiselle venttiilille huomattavasti tarkempi kuin koostetaulukoista luetut arvot.

Yhtälössä (5.1) painehäviö on samaa muotoa kuin yhtälössä (3.9). Näin ollen yhtälöt voidaan yhdistää yhteisen tekijän avulla yhtälöksi

$$h_f = \left(f \frac{L}{d} + \Sigma K \right) \frac{V^2}{2g}, \quad (5.3)$$

jossa f on putkelle määritetty Darcyn kitkakerroin ja ΣK on tarkasteltavalla putkiosuudella sijaitsevien laitteiden kertavastuskertoimien K summa. Sama yhteys pätee myös painehäviön yhtälöille (3.10) ja (5.2).

Tietyn laitteen kertavastuskertoimen suuruus riippuu virtauksen Reynoldsin luvusta, putken karheudesta sekä putkikoosta eli halkaisijasta [5, 3–19]. Käytännön sovelluksissa kuitenkin tyypillisesti oletetaan kertavastuskertoimen riippuvan ainoastaan putken halkaisijasta, ja kertavastusarvoille määritettyjä taulukkoarvoja esitetään tyypillisesti pääosin turbulenttisille virtauksille [2, s. 345][5, 3–19].

5.2 Virtauskerroin

Kaupallisessa kontekstissa venttiileissä tapahtuvaan paikallishäviöön liitetään usein valmistajan kokeellisesti määrittämä venttiilin virtauskerroin, jonka merkintätapa ja tarkka määritelmä riippuvat lähteestä.

SI-yksikköjärjestelmää käyttävässä kirjallisuudessa virtauskerroin eli *flow factor* k_v kuvaa, kuinka monta kuutiometriä fluidia venttiilin läpi virtaa tunnissa, kun venttiilissä tapahtuu 1 bar:n painehäviö. Virtauskerroin voidaan ilmaista virtaukselle Q ja painehäviölle Δp yhtälöllä

$$k_v = \frac{Q}{\sqrt{(\Delta p/1 \text{ bar})}}, \quad (5.4)$$

jossa virtauksen yksikkö on m^3/h ja painehäviön yksikkö on bar, jolloin virtauskerroimen yksiköksi jää m^3/h . [9]

Englantilaisessa ja amerikkalaisessa kontekstissa vastaavaa ilmiötä kuvataan termillä *flow coefficient* C_v , joka kuvaa, kuinka monta gallonia venttiilin läpi virtaa minuutissa, kun venttiilissä tapahtuu 1 psi:n painehäviö [9]. Virtauskerroimen C_v määritelmä eroaa virtauskerroimen k_v määritelmästä siis vain yksiköiden osalta, eli virtauskerroimen C_v yhtälö on muodoltaan sama kuin virtauskerroimen k_v yhtälö (5.4). Virtauskerrointa C_v käytettäessä on kuitenkin oltava tarkkana, onko kertoimen määritelmässä käytettävä tilavuusyksikkö brittiläinen vai amerikkalainen gallona [9].

5.3 Vakiopainehäviö

Jotkin kaupalliset toimijat ilmoittavat toimittamalleen laitteelle, kuten esimerkiksi lämmönvaihtimelle, yksittäisen vakiona pysyvän arvon laitteessa tapahtuvalle painehäviölle. Painehäviö ei kuitenkaan pysy vakiona yleisesti, vaan ilmoitettu arvo koskee tiettyä tilavuus- tai massavirtaa, jolle laite on mitoitettu.

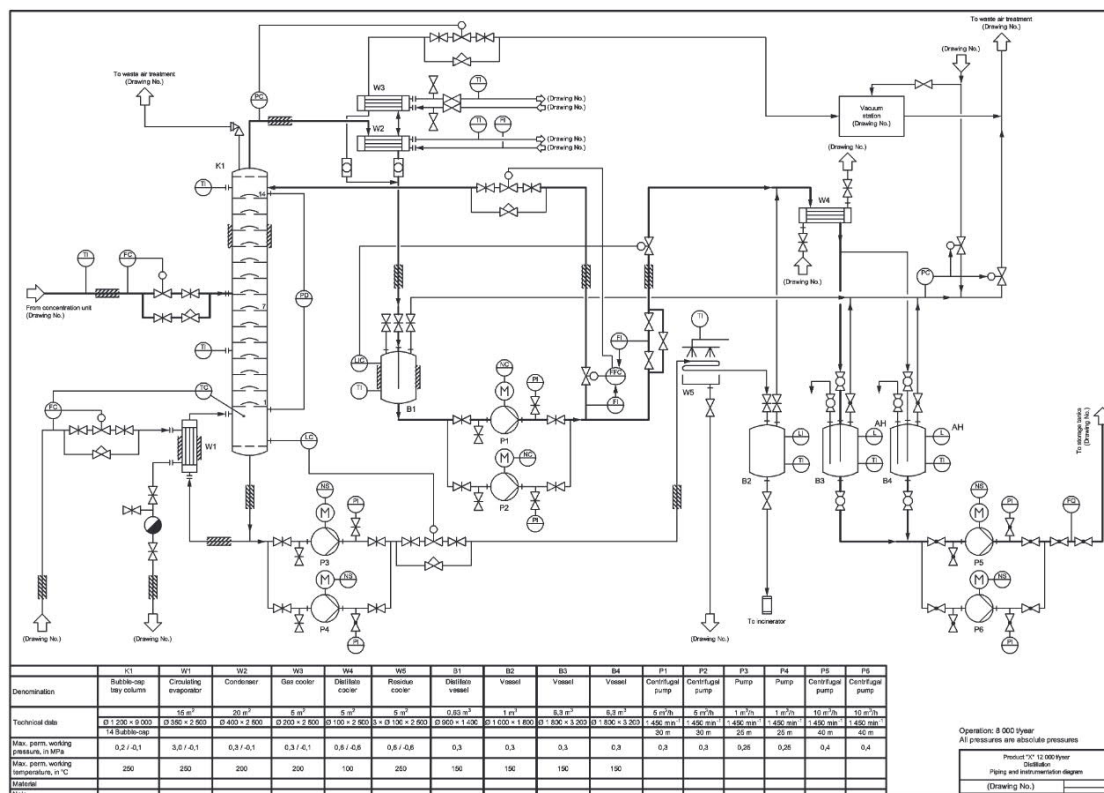
Mikäli putkilinjan tilavuusvirta vastaa laitteen mitoitusvirtausta, voidaan laitteelle ilmoitettu painehäviö summata osaksi koko putkilinjan painehäviötä. Muussa tapauksessa laitteelle ilmoitettua painehäviötä ei ole mielekäästä yhdistää putkilinjalla tapahtuvaan painehäviöön. Mikäli mitoitettavan prosessin tilavuus- tai massavirta muuttuu suunnittelun aikana, on varmistettava, että laskenta-arviossa käytettävät putkilinjan laitteet soveltuvat prosessin uusille arvoille ja että laitteita kuvaavien suureiden arvot vastaavat laitteiden toimintaa myös muuttuneilla prosessin arvoilla.

6. KÄYTÄNNÖN TARKASTELU

6.1 Putkitus- ja instrumentointikaavio

Putkitus- ja instrumentointikaavio eli PI-kaavio, tai vastaavasti *piping and instrumentation diagram* eli *P&ID*, tarkoittaa prosessiteollisuudessa käytettyä kaaviopiirrosta, joka kuvaa teollisen prosessin teknistä toteutusta. Kaaviossa esitetään graafisilla symboleilla laitoksen putkilinjat ja laitteet, kuten venttiilit ja putkiliittimet, sekä prosessin säätö- ja mittauslaitteet. [10, s. 3] Suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi vahvistettu eurooppalainen standardi EN ISO 10628-1:2015 [10] käsittelee PI-kaavioiden sisältöä ja määrittelyä. PI-kaavioiden graafisia symboleita on puolestaan määritelty vastaavasti hyväksytyssä standardissa EN ISO 10628-2:2012 [11]. Kuvassa 6.1 on esitetty esimerkki PI-kaaviosta.

Lähteestä [10].



Kuva 6.1 Esimerkki PI-kaaviosta.

Vaikka PI-kaavio ei otakaan kantaa putkilinjan todelliseen reittiin tai putkilinjan pituuteen, sisältää kaavio kuitenkin hyödyllistä tietoa putkilinjan alustavaa painehäviölaskentaa ja mitoitusta varten. PI-kaaviossa ilmoitetusta putken nimelliskoosta ja putkiluokasta voidaan johtaa putken sisähalkaisija, jota tarvitaan sekä painehäviön yhtälössä (3.9) että kitkakertoimen määrittämisessä esimerkiksi yhtälöllä (4.5). Kitkakertoimen määrittämisessä tarvitaan myös putken ekvivalenttikarheutta, joka voidaan lukea taulukosta, kun tunnetaan putken materiaali, joka puolestaan riippuu kaaviossa ilmoitettavasta putkiluokasta.

PI-kaavioon voidaan perustietojen lisäksi merkitä ylimääräistä tietoa, kuten virtauksen tilavuusvirta sekä putkilinjan osien ja laitteiden suhteelliset korkeusasemat [10, s. 4]. Tilavuusvirrasta voidaan putken halkaisijan avulla johtaa virtauksen keskinopeus, jota tarvitaan painehäviön yhtälössä (3.9). Putkilinjan osien suhteellisia korkeusasemia voidaan puolestaan hyödyntää painehäviön ohella putkilinjan energiataarkastelussa yhtälön (3.8) mukaan. PI-kaavioon on myös merkitty putkilinjalta mahdollisesti sijaitsevat pumput, joiden tuottama nostokorkeus voidaan myös huomioida yhtälössä (3.8). Kaavio ei kuitenkaan välttämättä ota kantaa pumpun tuottaman nostokorkeuden arvoon. Alustavan painehäviölaskennan avulla voidaan kuitenkin myös arvioida pumpulta vaadittavaa nostokorkeutta.

Koska PI-kaavio edeltää putkilinjan varsinaisen reitin kolmiulotteista suunnittelua, painehäviötarkastelun kohteena olevan putkilinjan pituus ja putkikäyrien lukumäärä joudutaan arvioimaan. Kaavio tarjoaa kuitenkin paikallishäviöiden arvioimiselle olennaiset tiedot putkilinjalla olevien laitteiden, kuten venttiilien ja putkiliitännöjen, laadusta ja lukumäärästä. Kaavioon on myös merkitty putkilinjan mahdollinen kulku ulos säiliöstä tai säiliön sisään, joihin liittyy myös paikallishäviötä. Paikallishäviötä aiheuttavien laitteiden kertavastuskertoimet voidaan lukea taulukosta laitteen tyyppin ja usein myös putken nimelliskoon mukaan. Tarkasteltavalla putkilinjan osuudella sijaitsevien laitteiden kertavastuskertoimien summa voidaan ottaa laskennassa huomioon yhtälöllä (5.3).

Putkitus- ja instrumentointikaavio pohjautuu prosessin virtauskaavioon eli *process flow diagram*:iin, jossa otetaan kantaa virtausaineeseen ja sen tilaan. Kaaviossa voidaan esimerkiksi ilmoittaa putkilinjan alussa olevassa säiliössä vallitseva paine ja lämpötila, joita voidaan käyttää virtausaineen ominaisuuksien määrittämiseen. Painehäviölaskennassa olennaisen Reynoldsin luvun laskemiseen yhtälöllä (4.2) tarvitaan virtausaineen tiheys ja joko dynaaminen tai kinemaattinen viskositeetti.

Painehäviön ja lämmönsiirron vaikutuksesta virtausaineen paine ja lämpötila muuttuvat putkilinjan matkalla, jolloin myös virtausaineen ominaisuudet muuttuvat.

Alustavan painehäviölaskennan kannalta on usein kuitenkin käytännöllistä tarkastella virtausaineen ominaisuuksia vakioina, joko pelkästään alkutilan tai alku- ja lopputilojen keskiarvon perusteella.

6.2 Putkiston mitoitus

Putkistossa tapahtuva painehäviö johtaa käytännön sovelluksissa kustannuksiin, kun fluideja joudutaan pumppaamaan putkilinjan riittävän painetason tai massavirran ylläpitämiseksi. Pumppauksen energiakustannuksissa voidaan siis säästää pienentämällä putkistossa tapahtuvaa painehäviötä. Tarkastelemalla kitkasta aiheutuvan painehäviön yhtälöä (3.9) sekä kitka- ja paikallishäviöistä aiheutuvien painehäviöiden yhdistettyä yhtälöä (5.3) voidaan päätellä, minkälaisilla käytännön muutoksilla prosessissa voidaan vaikuttaa painehäviön suuruuteen. Ainoa tekijä yhtälössä, johon ei käytännön sovelluksissa voida vaikuttaa millään tasolla, on putoamiskiihtyvyyden g .

Selkein tapa pienentää painehäviötä on putkilinjan pituuden lyhentäminen. Yhtälön (3.9) mukaan putken pituus L on suoraan verrannollinen kitkasta aiheutuvaan painehäviöön, eli mikäli putkilinjan pituus lyhennetään puoleen, myös kitkasta aiheutuva painehäviö putoaa puoleen. Putkilinjan mahdolliset paikallishäviöt kuitenkin säilyvät ennallaan putkilinjan pituudesta riippumatta. Putkilinjaa voidaan laitosuunnittelussa lyhentää suunnittelemalla putkilinjan lähtö- ja päätepisteet mahdollisimman lähelle toisiaan ja suunnittelemalla putkilinjan reitti mahdollisimman suoraksi. Teollisuuslaitoksen fyysisen tilan rajoitteet kuitenkin vaikuttavat laitteiden sijainteihin ja putkilinjojen reitteihin, eli suunnittelua ei voida toteuttaa pelkästään painehäviön näkökulmasta.

Yhtälön (3.9) mukaan kitkasta aiheutuva painehäviö vaikuttaisi olevan kääntäen verrannollinen putken sisähalkaisijaan d , eli halkaisijan kaksinkertaistaminen johtaisi kitkasta aiheutuvan painehäviön puoliintumiseen. Suureiden välinen yhteys ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen, sillä myös virtauksen keskinopeus V riippuu putken halkaisijasta. Tilavuusvirran pysyessä samana putken halkaisijan pienentäminen johtaa virtauksen keskinopeuden kasvuun, ja luonnollisesti halkaisijan suurentaminen johtaa keskinopeuden pienentymiseen. Koska kitkasta aiheutuva painehäviö on suoraan verrannollinen virtauksen keskinopeuden neliöön, keskinopeuden pienentäminen johtaa merkittävään painehäviön pienentymiseen. Vakiona pysyvällä tilavuusvirralla putkikoon kaksinkertaistaminen johtaa kitkasta aiheutuvan painehäviön jopa noin 27-kertaiseen vähenemiseen [2, s. 325].

Kuten luvussa 4.2 todettiin, turbulenttisessa virtauksessa putken halkaisija vaikuttaa myös putken kitkakertoimeen f . Moodyn käyrästä tarkastelemalla havaitaan,

että suurempi halkaisija eli pienempi suhteellinen karheus johtaa pienempään kitkakertoimeen. Yhtälön (3.9) mukaan kitkakerroin f on suoraan verrannollinen kitkasta aiheutuvaan painehäviöön, eli kitkakertoimen arvo on merkittävä tekijä painehäviössä. Putkihalkaisijan vaikutus kitkakertoimen arvoon on kuitenkin vähäinen verrattuna putkihalkaisijan vaikutukseen painehäviössä suoraan halkaisijan ja epäsuorasti virtauksen keskinopeuden kautta.

Turbulenttisessa virtauksessa kitkakertoimen arvoon vaikuttaa myös putken pinnankarheus, johon ei käytännössä juurikaan voida vaikuttaa. Pinnankarheus riippuu putken materiaalista, joka on tyypillisesti paineen ja lämpötilan tai prosessissa käytetyn virtausaineen rajoittama. Putkilinjan mitoituksessa on kuitenkin hyvä huomioida, että putken ekvivalenttikarheus kasvaa putken käytön myötä. Näin ollen alustavassa painehäviölaskennassa kannattaa tarkistaa putkilinjan painehäviö myös vanhempaa putkea vastaavalla karheusarvolla, jotta ajan myötä kasvavaan painehäviöön osataan varautua.

Putkilinjan mitoitusvaiheessa on syytä huomioida kitkahäviöiden lisäksi myös paikallishäviöt. Linjalle kuuluvat säätö- ja mittauslaitteet riippuvat prosessista, eikä niiden lukumäärään tyypillisesti voida vaikuttaa painehäviön alentamiseksi. Tietyn laitteen kertavastuserroin voi kuitenkin vaihdella eri valmistajien välillä huomattavasti, eli muun muassa venttiilien valinnalla voidaan vaikuttaa painehäviön suuruuteen. Lisäksi putkilinjan reittiä suunniteltaessa voidaan vaikuttaa paikallishäviöihin pyrkimällä välttämään putkikäyriä, jotka myös aiheuttavat häviöitä.

Koska putkilinjan taustalla oleva prosessi tyypillisesti määrää putkilinjan massavirran sekä linjalla esiintyvät laitteet, ja putkilinjan pituus sekä reitti riippuvat laitoksen fyysisistä tilarajoitteista, yksinkertaisin keino alentaa putkilinjalla tapahtuvaa painehäviötä on putken halkaisijan kasvattaminen. Halkaisijan kasvattamisella on kuitenkin omat ongelmansa. Suurempi putki on kustannuksiltaan kalliimpi, mutta oikein mitoitettuna suuremmat alkukustannukset saadaan säästettyä pienemmillä pumppauskustannuksilla. Halkaisijaltaan suurempi putki vie kuitenkin fyysisesti enemmän tilaa, mikä voi vaikeuttaa putkilinjan reitin suunnittelua. Putken on myös oltava yhteensopiva linjan säiliöiden ja laitteiden kanssa. Näin ollen putkikoon suurentaminen saattaa vaikuttaa esimerkiksi venttiilien valintaan ja vaatia putkikokoa muuttavien liitinkappaleiden käyttöä.

6.3 Laskuesimerkki

Tarkastellaan esimerkkinä pyöreästä teräsputkesta koostuvaa vaakasuoraa putkilinjaa. Suoritetaan linjalle alustava painehäviötarkastelu vertaillen sisähalkaisijaltaan 25 mm ja 50 mm olevia putkia. Oletetaan, että putkessa virtaa vettä 2 bar:n paineessa ja lämpötilassa 15 °C. Lisäksi oletetaan, että putkilinja on 10 m pitkä ja veden tilavuusvirta on 1 l/s. Putkilinjalla on myös kaksi pyöristettyä 90° käyrää sekä yksi täysin auki oleva luistiventtiili.

Tarkastellaan aluksi putkilinjaa pienemmällä halkaisijalla. Lasketaan putkilinjalla tapahtuva painehäviö nostokorkeuden yksiköissä käyttäen yhtälöä (5.3)

$$h_f = \left(f \frac{L}{d} + \Sigma K \right) \frac{V^2}{2g}. \quad (6.1)$$

Lähtötiedoista saadaan yhtälöä varten SI-yksiköiksi muunnetut arvot $L = 10$ m ja $d = 25$ mm = 0,025 m. Käytetään putoamiskiihtyvyydelle arvoa $g = 9,81$ m/s². Annetun tilavuusvirran ja putken sisähalkaisijan avulla voidaan laskea virtauksen keskinopeus V yhtälöllä

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{A} \\ &= \frac{Q}{\pi (d/2)^2} \\ &= \frac{1 \text{ l/s}}{\pi (25 \text{ mm}/2)^2} \\ &= \frac{0,001 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (0,025 \text{ m}/2)^2} \\ &= 2,0372 \text{ m/s}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Taulukoiden 5.1 ja 5.2 avulla saadaan arviot linjalla olevien kahden käyrän ja luistiventtiilin kertavastuskertoimille, jotka lasketaan yhteen. Kertavastuskertoimien summaksi saadaan

$$\begin{aligned} \Sigma K &= 2 \cdot K(90^\circ \text{ pyöristetty käyrä}) + 1 \cdot K(\text{luistiventtiili, DN 25}) \\ &= 2 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,8 \\ &= 1,4. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Putken kitkavastuskertoimen määrittämiseksi tarvitaan putken ekvivalenttikarheus ja virtauksen Reynoldsin luku. Jotta Reynoldsin luku voidaan laskea yhtälöllä (4.2),

tarvitaan virtausaineen tiheys ja dynaaminen viskositeetti. Tarkasteluolosuhteissa eli 2 bar:n paineessa ja lämpötilassa 15 °C saadaan veden tiheydelle ja dynaamiselle viskositeetille arvot $\rho = 999,1 \text{ kg/m}^3$ ja $\mu = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [4, B.3]. Näin ollen Reynoldsin luvuksi saadaan

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho V D}{\mu} \\ &= \frac{999,1 \text{ kg/m}^3 \cdot 2,0372 \text{ m/s} \cdot 0,025 \text{ m}}{1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}} \\ &= 44\,634,86. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Koska $Re > 4000$, virtaus on turbulентtinen, eli kitkakerroin voidaan määrittää Haalandin yhtälöllä (4.6). Taulukosta 4.1 voidaan lukea uuden teräsputken ekvivalenttikarheudeksi $\epsilon = 0,05 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, jolloin kitkakertoimeksi saadaan

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{f}} &= -1,8 \log_{10} \left(\left(\frac{\epsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \\ \Leftrightarrow \sqrt{f} &= \left(-1,8 \log_{10} \left(\left(\frac{\epsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \right)^{-1} \\ \Leftrightarrow f &= \left(-1,8 \log_{10} \left(\left(\frac{\epsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \right)^{-2} \\ \Leftrightarrow f &= \left(-1,8 \log_{10} \left(\left(\frac{5 \cdot 10^{-5} \text{ m}/0,025 \text{ m}}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{44634,86} \right) \right)^{-2} \\ \Rightarrow f &= 0,0266. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Määritetyt arvot voidaan sijoittaa yhtälöön (5.3), jolloin putkilinjalla tapahtuvaksi painehäviöksi saadaan nostokorkeuden yksiköissä

$$\begin{aligned} h_f &= \left(f \frac{L}{d} + \Sigma K \right) \frac{V^2}{2g} \\ &= \left(0,0266 \cdot \frac{10 \text{ m}}{0,025 \text{ m}} + 1,4 \right) \cdot \frac{(2,0372 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 2,5446 \text{ m}. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Saatu tulos voidaan myös muuntaa paineen yksiköihin jakamalla painehäviö virtausaineen tiheydellä ja vallitsevalla putoamiskiihtyvyydellä. Näin painehäviöksi paineen

yksiköissä saadaan

$$\begin{aligned}
 \Delta p &= \frac{h_f}{\rho g} \\
 &= \frac{2,5446 \text{ m}}{999,1 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} \\
 &= 24\,940,08 \text{ Pa} \\
 &= 24,940 \text{ kPa}.
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

Putkijonolla tapahtuva painehäviö on varsin suuri verrattuna virtausaineen lähtöpaineeseen $p = p_0$. Painehäviön ja lähtöpaineen suhde on

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta p}{p_0} &= \frac{24\,940,08 \text{ Pa}}{200\,000 \text{ Pa}} \\
 &= 0,1247 \\
 &= 12,47\%,
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

vaikka laskennassa ei vielä huomioitu putken käyttöiän myötä kasvavaa ekvivalenttikarheutta. Lasketaan vertailun vuoksi samat laskut myös vanhaa putkea vastaavalla ekvivalenttikarheudella. Putkijonolla tapahtuvan painehäviön pienentämiseksi kokeillaan samoja laskuja myös suuremmalla halkaisijalla, $d = 50 \text{ mm}$, sekä uuden että vanhan putken karheudella. Laskujen tulokset on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1 Laskuesimerkin tulosten vertailua.

	$d = 25 \text{ mm}$	$d = 50 \text{ mm}$
V	2,0372 m/s	0,5093 m/s
Re	44 634,86	22 317,43
ΣK	1,4	0,95
ϵ_{uusi}	0,05 mm	0,05 mm
f_{uusi}	0,0266	0,0270
$h_{f,uusi}$	2,5446 m	0,0841 m
Δp_{uusi}	24,94 kPa	0,824 kPa
ϵ_{vanha}	0,2 mm	0,2 mm
f_{vanha}	0,0367	0,0324
$h_{f,vanha}$	3,3987 m	0,0982 m
Δp_{vanha}	33,31 kPa	0,963 kPa

Taulukosta 6.1 huomataan, että vanhaa putkea vastaavalla ekvivalenttikarheudella putkilinjan painehäviö kasvoi entistä suuremmaksi, mutta painehäviötä saatiin pienennettyä huomattavasti kasvattamalla putken halkaisijaa. Taulukosta nähdään myös, kuinka putkikoon kasvattaminen pienensi myös linjalla tapahtuvia paikallishäviöitä.

7. YHTEENVETO

Putkivirtaukset ovat merkittävässä osassa prosessiteollisuudessa, ja putkilinjojen painehäviön arviointi on oleellisessa roolissa laitosten suunnittelussa. Vaikka putkilinjojen eri virtausaineita ja laitteita on käytännön sovelluksissa laaja kirjo, voidaan alustavan mitoituksen vaiheessa eri putkilinjojen painehäviöitä tarkastella samoilla perusmenetelmillä. Virtausaineiden suhteellisen alhaisten virtausnopeuksien vuoksi virtauksia voidaan tyypillisesti mallintaa kokoonpuristumattomina.

Bernoullin yhtälöön (3.3) perustuva virtauksen energiatarkastelu on hyvä lähtökoh- ta putkilinjan monipuoliselle tarkastelulle. Kun linjalla tapahtuvan painehäviön suu- ruus on selvillä, yhtälön avulla voidaan arvioida linjan päätepisteen painetasoa tai esimerkiksi linjalla olevalta pumpulta vaadittavaa nostokorkeutta. Yhtälöllä huo- mioidaan samalla myös virtauksen korkeusasemasta riippuva potentiaalienergia sekä tiheydestä ja virtausnopeudesta riippuva liike-energia.

Varsinaisen painehäviön suuruuden arviointiin voidaan käyttää Darcy–Weisbach- yhtälöä (3.9), jota varten on selvitettävä putkelle Darcyn kitkakerroin f . Kitka- kertoimen arvo riippuu sekä putken fyysisistä ominaisuuksista että virtauksen tur- bulenttisuudesta. Kitkakerroin voidaan määrittää luvussa 4.2 esitetyillä yhtälöillä, kuten Colebrook–White-yhtälöllä, tai graafisesti Moodyn käyrästä avulla.

Putkessa tapahtuvien kitkahäviöiden lisäksi putkilinjan painehäviöön vaikuttavat myös putkikäyrissä, venttiileissä sekä muissa putkilinjan laitteissa tapahtuvat pai- kallishäviöt. Paikallishäviöiden suuruus riippuu kullekin laitteelle ominaisesta kerta- vastuskertoimesta, joille on esitetty kokeellisiin tuloksiin perustuvia taulukkoarvoja, kuten taulukoissa 5.1 ja 5.2. Kertavastuskertoimen tarkka arvo vaihtelee kuitenkin huomattavasti eri valmistajien ja mallien välillä, minkä vuoksi kirjallisuudessa esi- tetyt kertavastuskertoimen taulukkoarvot ovat vain suuntaa antavia.

Edellä esitellyillä menetelmillä voidaan määrittää alustavia arvioita laitosten putki- linjojen painehäviöstä. Suunnitteluprosessin edetessä ja lähtötietojen tarkentuessa päästään samoilla menetelmillä yhä tarkempiin tuloksiin, joiden avulla putkilinjoja voidaan paremmin mitoittaa prosessin vaatimusten ja kustannusten näkökulmasta.

LÄHTEET

- [1] Y.A. Çengel, J.M. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, USA, 2014
- [2] F.M. White, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, Singapore, 2016
- [3] K. Riistama, J. Laitinen, M. Vuori, Suomen kemianteollisuus, Chemas Oy, Tampere, 2003
- [4] I.H. Shames, Mechanics of Fluids, McGraw-Hill, Singapore, 1992
- [5] V.L. Streeter, Handbook of Fluid Dynamics, McGraw-Hill, USA, 1961
- [6] J. Nikuradse, Laws of Flow In Rough Pipes (A. A. Brielmaier, trans.), National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Memorandum 1292, Washington, 1950, original work published 1933
- [7] W. Bohl, Teknillinen virtausoppi, Sonator, Tampere, 1988
- [8] B.H. Yang, D.D. Joseph, Virtual Nikuradse, Journal of Turbulence, Vol. 10, No. 11, 2009
- [9] H. Boysen, Technical paper – k_v : what, why, how, whence?, Danfoss, 2011. Saatavissa (viitattu 08.10.2017):
http://heating.danfoss.com/PCMPDF/VFHBG202_kv.pdf
- [10] SFS-EN ISO 10628-1:2015, Diagrams for the chemical and petrochemical industry. Part 1: Specification of diagrams (ISO 10628-1:2014), Suomen Standardisoimisliitto, 2015
- [11] SFS-EN ISO 10628-2:2012, Diagrams for the chemical and petrochemical industry. Part 2: Graphical symbols (ISO 10628-2:2012), Suomen Standardisoimisliitto, 2013