



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Satu Siitonen

# Putkimitoitustyökalu PI-kaavioiden alkusuunnitteluun

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

3.5.2020

Tekijä Otsikko	Satu Siitonen Putkimitoitustyökalu PI-kaavioiden alkusuunnitteluun
Sivumäärä Aika	47 sivua + 2 liitettä 3.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	Kemiantekniikka
Ohjaajat	Head of Piping and Diagrams Merja Hakaste-Härmä, Outotec (Finland) Oy Lehtori Timo Seuranen
<p>Tämän työn tarkoituksena oli aikaansaada mitoituspäätteet dokumentoiva putkimitoitustyökalu laitossuunnittelun varhaisvaiheen tarpeisiin. Työ tehtiin Outotec (Finland) Oy:n toimeksiantona ja toteutettiin pääsääntöisesti yrityksen tiloissa. Toimeksiantajan toivomus oli, että laskuri toteutetaan Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla. Lisäksi toiveena oli tarvittaessa päivittää tai vahvistaa yrityksessä aiemmin käytössä olleet virtausnopeuksien ohjearvot. Virtausnopeuksien perustandardiksi sovittiin PSK 2401 -standardi, johon muiden lähteiden tietoja verrattiin.</p> <p>Työn teoriaosuudessa perehdyttiin tilaajan prosesseissa yleisimmin käytettyjen virtaavien aineiden rooliin prosessissa sekä niiden virtausnopeuksiin eri lähteitä laajasti hyödyntäen. Arvoja verrattiin standardin PSK 2401 arvoihin ja vertailun tuloksena valittiin kullekin virtaavalle aineelle soveltuvin virtausnopeus sekä lähde tälle arvolle.</p> <p>Työn käytännön osuus, itse laskuri, toteutettiin pääsääntöisesti Visual Basic -ohjelmointikielen avulla tehdyllä koodilla. Excelin omilla funktioilla toteutettuna oletettiin laskurin ylläpidettävyyden ja toimintavarmuuden olevan heikommalla kuin valitulla menetelmällä. Lisäksi laskurin nykyisen toiminnallisuuden saavuttaminen olisi edellyttänyt pitkiä ja kömpelöitä funktioyhdistelmiä ja -rakenteita.</p> <p>Lopputuloksena syntyi laskuri, jolla voi mitoitaa yrityksen tarvitsemien virtaavien aineiden putkien halkaisijat virtausnopeuden perusteella siten, että kunkin putkilinjan laskentaperusteet tallentuvat eikä laskettavien linjojen määrää ole rajoitettu.</p> <p>Jatkokehitystä ajatellen laskuriin voisi lisätä painehäviöt huomioivia toimintoja. Siinä vaiheessa kuitenkin saattaisi olla järkevintä jakaa laskuri osiin virtaavan aineen mukaan, koska eri aineiden laskentaperusteet muuttuvat radikaalisti vaatimusten kasvaessa.</p>	
Avainsanat	Putkimitoitus, Excel

Author Title	Satu Siitonen Line Sizing Tool for Preliminary Phases of P&ID Design
Number of Pages Date	47 pages + 2 appendices 5. May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major	Chemical Engineering
Instructors	Merja Hakaste-Härmä, Head of Piping and Diagrams' Outotec (Finland) Oy Timo Seuranen, Senior Lecturer
<p>This thesis was conducted upon a request by Outotec (Finland) Oy, which is a part of Outotec Oyj, a large technology and project company mostly concentrating on sustainable mining technology and plant projects. There was a need in the company to do preliminary pipeline sizing effectively and easily for different fluids also in a manner that allows to re-store all the methods of calculation used. Furthermore, there was a need to evaluate the fluid velocity values currently used and possibly update them.</p> <p>The theoretical part of this thesis included a thorough research of relevant literature to find a vast amount of justifiable fluid velocity values alongside different methods of evaluating and calculating, for example, the amount of flashing steam after a steam trap. Also, the conductor's previous typical projects were examined to find the fluids concerned.</p> <p>The commissioner wanted the actual pipeline sizing tool to be developed as an Excel spreadsheet. To achieve the most user-friendly interface as well as the most pleasant user experience, it seemed most reasonable to write the whole program behind the calculator's functions using the Visual Basic programming language.</p> <p>The project was successful, and the tool has been tested in real circumstances. The pipeline sizing tool is to be released for users, and it will prove its usability and usefulness in future practice.</p>	
Keywords	Pipeline sizing, Excel

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Suunnitteluprosessin vaiheet	3
3	Putkimitoituksen perusteet	4
3.1	Virtausnopeuden vaikutukset systeemissä	5
3.2	Putkiluokat ja nimellishalkaisijat, määrittely ja merkitys suunnittelussa	7
3.3	Käytetyt standardit	8
4	Tässä työssä tarkoitetut virtaavat aineet eli fluidit	9
4.1	Nesteet	10
4.1.1	Vedet sekä pumpattavat ja painovoimaiset lauhteet	11
4.1.2	Hapot	11
4.1.3	Emäkset	14
4.1.4	Palavat nesteet	15
4.2	Lietteet eli slurryt	17
4.3	Kaasut	19
4.3.1	Ilmat	20
4.3.2	Happi	21
4.3.3	Typpi ja muut palamattomat kaasut	23
4.3.4	Palavat kaasut	24
4.3.5	Hönkäkaasut	24
4.4	Höyryt	25
4.5	Paisuntahöyrystyvät lauhteet	26
5	Tarvemäärittely ja aiemmat käytänteet	27
6	Putkilinjan mitoitusyökalu	30
6.1	Laskurin rakenne ja toiminta	30
6.2	Nesteyhtälöt ja virtausten ohjearvot	33
6.2.1	Vedet ja pumpattavat lauhteet, virtausnopeuksien ohjearvot	33

6.2.2	Hapot, virtausnopeuden ohjeavot	34
6.2.3	Emäkset, virtausnopeuden ohjeavot	34
6.2.4	Palavat (Polttoöljy ym.), virtausnopeuden ohjeavot	35
6.3	Lietevirtausten ohjeavot	35
6.4	Kaasuyhtälöt ja virtausten ohjeavot	35
6.4.1	Ilmat, ohjeavot	36
6.4.2	Happi, laskenta ja ohjeavot	36
6.4.3	Typpi ja muut palamattomat kaasut, ohjeavot	36
6.4.4	Palavat kaasut, ohjeavot	37
6.4.5	Hönkäkaasut, ohjeavot	37
6.5	Höyry-yhtälöt ja virtausten ohjeavot	37
6.6	Paisuntahöyrystyvät lauhteet, yhtälöt ja virtausten ohjeavot	38
6.7	Käytetyt toiminnot Excelissä	39
7	Johtopäätökset	41
	Lähteet	43
	Liitteet	
	Liite 1. Veden virtausnopeuden arvoja eri lähteistä	
	Liite 2. Eri kaasuyhtälöiden tulosten vertailu	

## Lyhenteet

ANSI	American National Standards Institute, amerikkalainen standarisoiomisjärjestö, kattojärjestö, joka on Yhdysvaltojen edustajana ISOssa.
ASME	The American Society of Mechanical Engineers, amerikkalainen standardisoiomisjärjestö
AWWA	American Water Works Association, amerikkalainen standardisoiomisjärjestö
DIN	Deutsche Norm, vanha saksalainen standardijärjestelmä.
DN	Diamètre Nominal, eurooppalaisten standardien tapa ilmaista putkikoko (nimellishalkaisija).
EN	Eurooppalaisen standardisoiomisjärjestön CENin tuottama standardi, jonka kukin jäsenmaa vahvistaa omaksi standardikseen. Suomessa SFS.
GOST	Gosudarstvenniy standart, Venäjän liittovaltion ja Commonwealth of Independent States (CIS) -maiden kansallinen standardisoiomisjärjestö
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardijärjestelmä.
NPS	Nominal Pipe Size, amerikkalaisten standardien tapa ilmaista putkikoko (nimellishalkaisija)
PSK	PSK Standardisointi, entinen Prosessiteollisuuden Standardisoiomiskerho. Teollisuuden ja sitä palvelevien yritysten yhteinen kehitysyksikkö.
SFS	Suomen Standardisoiomisliitto SFS ry. Standardisoinnin keskusjärjestö Suomessa.

## 1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena oli kehittää putkilinjojen mitoitus työkalu PI-kaavioiden suunnittelun alkuvaiheeseen, kun tiedetään, että saatavilla olevat tiedot tulevat vielä muuttumaan. Tässä Basic Engineeringin alkuvaiheessa tiedossa on yleensä massataseet ja -virrat sekä virtauskaaviot, joiden pohjalta aletaan luoda PI-kaavioita, joiden putkilinjat mitoitetaan halkaisijan osalta. PI-kaaviot ovat olennaisen tärkeitä prosessin määrittelyssä, kuva 1 avaa tätä teknisen piirtämisen merkitystä. Putkilinjojen varsinainen mitoitus tapahtuu yleensä pumppujen mitoituksen yhteydessä, mutta pumppujen mitoitusta pyritään välttämään näin aikaisin, koska vaillinaisilla tiedoilla tehty pumppujen mitoitus on lähes puhdasta arvailua ja koska prosessi vielä elää niin layoutin, laitteiden kuin massataseidenkin osalta. Pelkkien putkilinjojen mitoituksen korjaaminen ei ole yhtä työlästä kuin pumppujen uudelleen laskeminen, ja suunnitteluprosessin tavanomaisen iteroivan luonteen takia mitoitukseen budjetoituihin työtunteihin onkin laskettu mukaan työhön kuuluva aika. [1; 2; 3.]

Since mechanical  
technology was difficult  
to describe using  
mathematical models,  
engineering drawing  
quickly developed as  
a reaction.

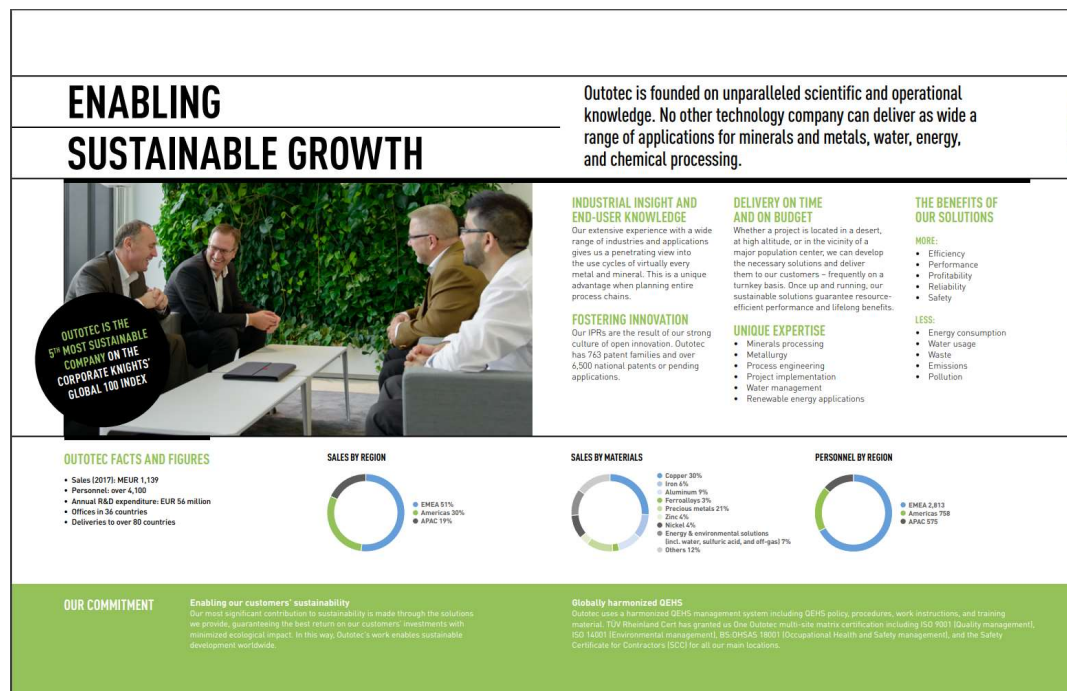
Kuva 1. Tekninen piirtäminen on tärkeä osa laitossuunnittelua [4, s. 24].

Työ tehtiin Outotec (Finland) Oy:n toimeksiannosta. Yritys, tutummin Outotec, tunnetaan kaivosteollisuuden mineraalien ja metallien prosessointiin, uusiutuvien energioiden tuottamiseen ja teollisuuden vesien käsittelyyn tarkoitettujen laitteistojen ja kokonaisuuksien suunnittelusta, toteuttamisesta ja osin myös ylläpidosta asiakkaan tiloihin. Yrityksessä on useita eri osastoja, joista kukin keskittyy omaan erikoisalaansa projektin kuluessa ja voidaankin sanoa, että Outotecilla on erittäin vakiintuneet prosessikokonaisuudet ja toimitukset. [5.] Tässä työssä tarkoitettun laskurin tarve on syntynyt tarpeesta

dokumentoida putkilinjojen mitoitusperiaatteet selkeästi ja työ toivottiin toteutettavaksi yrityksen käyttämällä MS Excel -taulukkolaskentaohjelmalla.

Outotec on suuri monikansallinen yritys, jonka toimitusketju ulottuu koko maailmaan. Sen 150-vuotiseen historiaan liittyy yrityksiä Suomesta ja Saksasta, esimerkkinä Outokumpu, Metallgesellschaft, Lurgi, Klöckner-Humboldt-Deutz sekä ruotsalainen Boliden, jotka luovat vakaan tieto- ja kokemuspohjan nykyiselle Outotecille. [4, s. 6.]

Outotecin nykyhetken toimintaa, tilannetta ja arvoja nähdään kuvasta 2, jossa on esitetty niin talouslukuja, henkilöstömääriä kuin erityisosaamisalueitakin. Erityisesti kannattaa panna merkille kuvasta 2 yrityksen esitteessään painottama ympäristötietoisuus: energian ja veden kulutuksen sekä jätteen, päästöjen ja saasteiden minimointi. [5.]

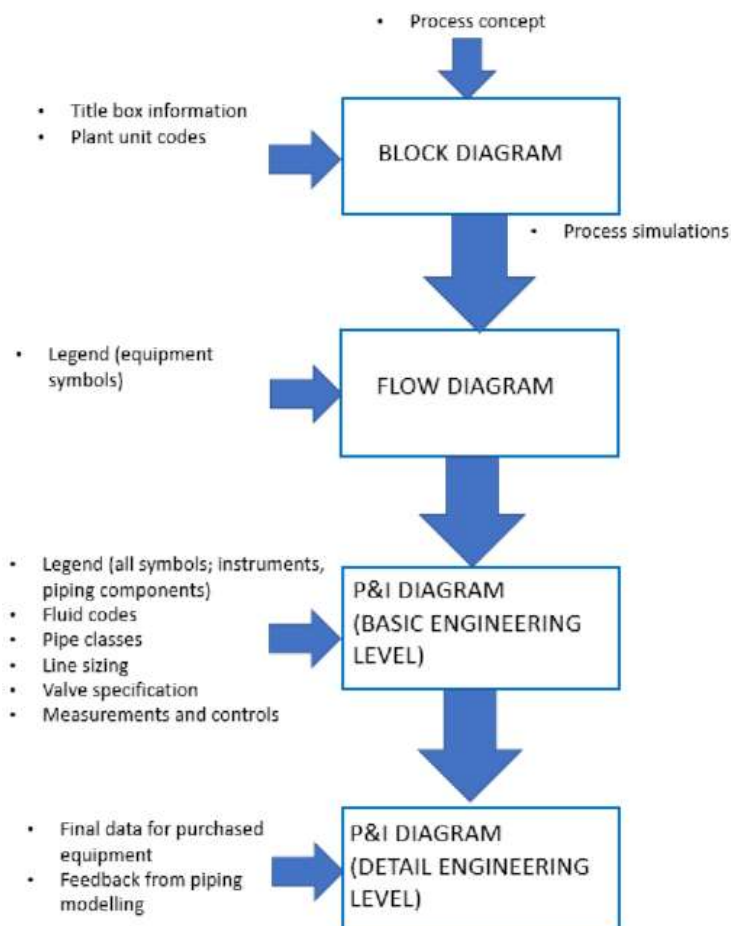


Kuva 2. Outotec panostaa kestävään kehitykseen ja ympäristön huomioimiseen kaikilla osaa- misalueillaan [5].



## 2 Suunnitteluprosessin vaiheet

Kun prosessin konsepti ja perusrakenne on määritelty, tehdään ensin lohkokaaviot, joissa jaetaan prosessi aliprosessiyksiköihin ja määritetään niiden aluekoodit, jonka jälkeen päästäänkin prosessin optimointivaiheeseen simuloimalla. Simuloinnin avulla saadaan taseet vietäväksi virtauskaavioihin ja tässä vaiheessa laitelistoihinkin on luetteloitu suurin osa tarvittavista päälaitteista. Seuraavaksi on aika alkaa tehdä PI-kaavioita ja valita putkiluokkia, virtaavien aineiden tunnuksia ja linjakokoja, eli käyttää tässä toteutettua laskuria. [7; 8.] Kuvan 3 lohkokaavio kuvaa prosessin kulun selkeästi.



Kuva 3. Suunnitteluprosessin vaiheet. Tämä laskuri sijoittuu kaaviossa virtauskaavioiden (Flow Diagram) ja perussuunnittelun (Basic Engineering Level) rajakohtaan [7].

Putkisto- ja instrumentointikaavio eli PI-kaavio on ennen kaikkea suunnittelutyökalu, jonka pohjalta tehdään laitoksen kokoonpano-, asennus- ja muutossuunnitelmat. PI-kaavio on prosessin toimintamalli, jossa esitetään yksityiskohtaisesti prosessin tietosisältö kaaviomuodossa. PI-kaavion pitää palvella suunnittelua, käyttöä, kunnossapitoa ja tarkastavaa viranomaista sekä työturvallisuussuunnitelmien ja -määräysten laatijoita. Standardi SFS-EN-ISO-10628-2 antaa ohjeet PI-kaavion laatimiseen. [6.]

### 3 Putkimitoituksen perusteet

Putkimitoitusta tehdään suunnitteluprojektin elinkaaren aikana useita kertoja. Ensimmäisessä vaiheessa käytetään hyväksi prosessin laskennallisista taseista saatavia tietoja. [8.] Tilavuusvirran ja fluidikohtaisen suositusvirtausnopeuden avulla saadaan ratkaistua sopiva putken nimellishalkaisija. Toki voidaan myös iteroida nimellishalkaisijaa käyttäen ja verrata saatua virtausnopeutta valittuihin suositusvirtausnopeuksiin [9]. Outotecillä on luotu sisäinen ohjeistus, jonka avulla yhdistetään virtaava aine ja putkiluokka standardien PSK 4201 sekä PSK 0901 avulla [10]. Tätä luokitusta käytetään hyväksi soveltuvien osin materiaalitiedon osalta putken virtausnopeutta ja halkaisijaa määritettäessä.

Putkimitoituksen ja mitoitussuunnittelun tavoitteena on määrittää jokaiselle putkiston osalle ja segmentille pienin hyväksyttävä sisähalkaisija, joka suoriutuu suunnitteluvirtauksesta ilman että painehäviö muodostuu kohtuuttomaksi ja virtausnopeus pysyy määrittelyalueella [3].

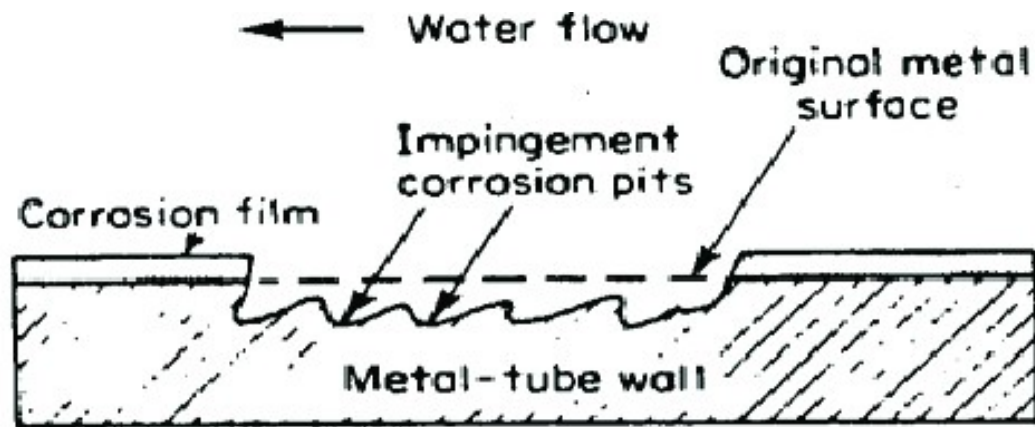
Alustavan mitoituksen haasteena on toisaalta pyrkimys mahdollisimman hyvään estimaattiin ja toisaalta puutteelliset tiedot. Tiedossa ei ole esimerkiksi putkien pituuksia, laitteiden korkoja ja sijaintia toistensa suhteen eikä välttämättä edes kaikkia säiliöitä ja laitteita puhumattakaan niiden mitoituksista. Pumppulaskentaa pyritään välttämään siihen asti, että layout- ja putkistosuunnittelijat ovat saaneet edes jonkinlaisen mallin, joka täsmentyy suunnittelun edetessä. [1.] Kokoonpuristumattomien virtausten putkimitoitukseen yleisesti käytetty Bernoullin yhtälö sitoo toisiinsa paineen, virtausnopeuden ja korkeuseron. Tässä työssä sitä ei voida puuttuvien tietojen vuoksi käyttää, joten halkaisijan määrittäminen tapahtuu pelkän virtausnopeuden perusteella. Tämä menetelmä ei siis huomioi putkessa eri syistä tapahtuvia painehäviöitä tai fluidin viskositeettia, vaan perustuu täysin

suositeltuihin virtausnopeusarvoihin. Tässä ei myöskään oteta kantaa virtauksen laminaarisuuteen tai turbulentsuuteen. Näin ollen putkihalkaisijat tulee tarkistaa vielä uudestaan putkiston anatomian täsmentyessä putkistojen dynaamisten painehäviöiden laskennan yhteydessä. Esimerkiksi pitkissä ja mutkaisissa putkistoissa painehäviöt voivat muodostua merkittävän suuriksi, jolloin tulisi käyttää pienempiä virtausnopeuksia. [11.] Nyt kun putkiston anatomia on tuntematon, halkaisijan laskennassa on käytettävä esimerkiksi standardissa PSK 2401 määritettyjä suositusvirtausnopeuksia, joille on haettu lisäreferenssejä kirjallisuudesta. Eri lähteiden suositusvirtausnopeudet on määritetty puhtaasti kokemusperäisesti, joten ne saattavat poiketa jonkin verran toisistaan. [3; 9; 13]

Putkikoko (tässä: sisähalkaisija eli virtauksen poikkipinta-ala) voidaan määrittää joko suositellun virtausnopeuden avulla, käytävissä olevan paine-eron perusteella tai optimoimalla [13; 9]. Käytännössä tässä työssä voidaan käyttää vain suositeltua virtausnopeutta, virtaavaa ainetta ja putkiluokkatietoa. Fluidien suositusvirtausnopeuksia käsitellään enemmän virtaavien aineiden yhteydessä kohdassa 4.

### 3.1 Virtausnopeuden vaikutukset systeemissä

Virtausnopeus on merkittävä asia, kun suunnitellaan putkistoa. Kyse ei ole ainoastaan siitä nopeudesta, jolla virtaava aine siirtyy paikasta toiseen, vaan myös esimerkiksi korroosiosta, eroosiosta, eroosiokorroosiosta, tärinästä ja melusta sekä painehäviöstä. Eroosiokorroosio on nimensä mukaisesti fysikaalisen eroosion ja kemiallisen korroosion yhteisvaikutus [15], kuten kuvasta 4 voidaan nähdä. Virtausnopeuden neliö korreloi myös painehäviön kanssa: mitä suurempi virtausnopeus, sitä suurempi painehäviö. Suuri painehäviö merkitsee sitä, että fluidin siirtämiseen tarvitaan enemmän pumpputehoa kuin maltillisemmalla painehäviöllä, mikä nostaa operointikustannuksia. [3; 11; 12; 14.]



Kuva 4. Virtaavan aineen ja putkimateriaalin välinen kemiallinen reaktio luo putken sisäpinnalle korroosiofilmin, jonka kova virtaus irrottaa. Paljastunut pinta reagoi jälleen virtaavan aineen kanssa muodostaen uuden filmin, joka taas irtoaa, ja putken pinta vahingoittuu lisää. [15.]

Virtausnopeus lisää virtaavan aineen eroosiorossoipotentialia, mikä vaikuttaa suoraan putken materiaalin ja seinämäpaksuuden valintaan. Molemmat vaikuttavat suoraan putkiston hintaan. Erityisesti tämä näkyy silloin, kun virtaava aine on kemiallisesti aggressiivista tai sisältää runsaasti kiintoainepartikkeleita. Toisaalta kiintoainesta sisältävä liete, slurry tai suspensio vaatii yleensä turbulenttisen virtauksen ja minimissään 1 m/s virtausnopeuden, jotta vältetään kiintoaineksen erottumiselta ja kasautumiselta putken pohjalle, putkikäyriin tai komponenttien liitoskohtiin. [3; 11; 12; 14.] Tähän perehdytään tarkemmin osassa 4, jossa esitellään tämän työn kannalta tärkeimmät virtaavat aineet.

Suuret virtausnopeudet vaativat myös putkiston kannakoinnilta enemmän kuin maltilliset ja pienet. Virtausnopeuden kasvaessa putkisto alkaa väristä enemmän ja enemmän, mistä koituu mekaanista räsitusta putkille, lisävaatimuksia kannakoinnille sekä meluhaittoja. Erityisesti kaksifaasivirtaus tuottaa herkästi melua jo melko maltillisillakin nopeuksilla, mikä on hyvä pitää mielessä paisuntahöyrystyvien lauhdelinjojen mitoituksessa. [3; 11; 14; 16; 17.]

### 3.2 Putkiluokat ja nimellishalkaisijat, määrittely ja merkitys suunnittelussa

Putkiluokaksi kutsutaan samaan putkilinjaan soveltuvien putkien ja putkenosien valikoidun, jossa mitat ja materiaalit on määritelty [18]. Putken nimellishalkaisija määritellään standardin SFS-EN ISO 6708 [19] mukaan vapaasti suomennettuna seuraavasti: nimellishalkaisija on aakkosnumeerinen merkintä, jota käytetään putkiston ja sen osien koon määrittämiseen. Se koostuu kirjaimista DN ja dimensiottomasta numero-osasta, joka viittaa epäsuorasti putken tai putkiston osan ulko- tai sisähalkaisijan (esimerkiksi sisäkierteen yhde) todelliseen kokoon millimetreinä.

Kyseessä on siis putken nimellishalkaisija, joka ei ole todellinen, mitattavissa oleva mitta vaan pikemminkin luokitustunnus. Jokaisen putkiluokan omasta määrittelystä löytyy millimetrimitat kunkin nimellishalkaisijan mukaisille todellisille mitoille (toleranssit huomioiden). Virtausnopeuden laskennassa käytetään putken todellista sisähalkaisijaa, joka saadaan vähentämällä ulkohalkaisijasta kaksi kertaa seinämäpaksuus. Seinämäpaksuudet vaihtelevat materiaaliluokan sisällä paineluokittain. [19.]

Putkiluokan valinta ja virtaava aine kulkevat käsi kädessä, koska putken materiaali valitaan virtaavan aineen kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien sekä putken sisällä vallitsevan paineen ja lämpötilan mukaan. Putkimateriaalin eroosion- ja korroosionkesto määrittää myös osaltaan virtausnopeutta siten, että suuri virtausnopeus edellyttää suurta eroosion- ja korroosionkestoa. Putkiluokastandardit eivät siis ota suoraan kantaa virtaavaan aineeseen vaan valinta tehdään putkiluokkaan määritellyn materiaalin ja virtaavan aineen ominaisuuksien perusteella. Onkin toivottavaa, että putkiluokka ja siten putkimateriaali määritellään oikein jo alkuvaiheessa. Vaikka tässä työssä laskennassa ei huomioida painehäviötä, putken paineluokka valitaan vaadittavan suunnittelupaineen ja -lämpötilan mukaiseksi. Operointipaine vaikuttaa erityisesti kokoonpuristuvien virtausten tilavuuteen ja siten putken halkaisijaan ja toisaalta luonnollisesti putken seinämän mekaaniseen lujuuteen kohdistuviin vaatimuksiin. Virtausnopeus kasvaa putken halkaisijan pientyessä, kuten kuvasta 5 voidaan nähdä. [3; 9; 20; 21.]

Putkessa tapahtuvalle virtaukselle keskimääräinen nopeus lasketaan seuraavasta kaavasta

$$v = \frac{Q \times 4}{\pi \times D^2}$$

missä  $v$  on virtausnopeus, m/s  
 $Q$  on tilavuusvirtaus, m<sup>3</sup>/s  
 $D$  on putken sisähalkaisija, m

Kuva 5. PSK-standardissa 2401 annetusta virtausnopeuden laskukaavasta voidaan nähdä, miten putken sisähalkaisija ja virtausnopeus vaikuttavat toisiinsa. [9]

### 3.3 Käytetyt standardit

Standardisoinnin tarkoitus on laatia yhteiset toimintatavat ja lisätä tuotteiden yhteensopivuutta ja turvallisuutta [22]. Eri mailla, maanosilla ja mantereilla on omia standardisointilaitoksia, mutta esimerkiksi vanhoihin saksalaisiin DIN-standardeihin nojaava EN on yhteiseurooppalainen standardijärjestelmä, joka toimii SFS-standardisoinnin lähteenä ja pohjana. Myös monet tässäkin työssä käytetyt PSK-standardit pohjautuvat näihin. Eurooppalaisten standardien lisäksi kansainvälisissä projekteissa käytetään melko usein yhdysvaltalaisia ANSIn/ASME:n painelaite- ja putkistosuunnittelustandardeja. [22.] ASME-standardin putket ovat tyypillisesti paksuseinäisempiä kuin EN-standardien putket, mutta suurten valmistusmäärien vuoksi ne saattavat olla suuremmista materiaaliluista huolimatta hinnaltaan edullisempia kuin vastaavat ohuempiseinäiset putket. ASME:n putkiluokista löytyy yleensä vastaavuudet eurooppalaisiin putkiluokkiin mutta putkikoko ilmaistaan tuumamitoituksena ja kirjaimin NPS. Myös American Water Works Associationin (AWWA) standardeja käytetään. Ne ovat analogisia ASME:n standardien kanssa, mutta kevyemmissä luokissa. Venäläiset GOST-standardit on alun perin kopioitu saksalaisista DIN-standardeista ja nykyään ne lähestyvätkin EN-standardeja. Valitettavasti GOST-standardit ovat vaikeasti saatavilla ja revisiointi on hiukan sekavaa, joten niiden käyttö vaatii runsaasti kokemuseräistä tietoa. [2; 21.]

### 3 PUTKILUOKAN MERKINTÄ

Putkiluokan täydellinen merkintä sisältää sanan putkiluokka, putkiluokkastandardin, kirjaimen E, nimellispaineen lukuarvon (bar), materiaalitunnuksen ja lisätunnuksen.

Esimerkki:	Putkiluokka	PSK 4233	E	16	H1	A
Nimi						
Standardi						
EN-viite <sup>1)</sup>						
Nimellis-paine						
Materiaalitunnus						
Lisätunnus						

Kuva 6. Putkiluokan merkinnästä käy ilmi mm. materiaali ja paineenkesto [18].

Tässä työssä päädyttiin käyttämään putkiluokkiin ja nimellishalkaisijoihin (EN) sekä nimellisputkikokoihin (ASME) EN -standardien kanssa yhteneviä PSK-standardeja (kuva 6) sekä vastaavia ASME -standardeja. Eri virtaavien aineiden suositusvirtausnopeuksien peruslähteenä käytetään standardia PSK 2401 [9], johon kirjatuille arvoille etsitään referenssejä, vertailuarvoja ja täsmennyksiä muualta kirjallisuudesta. Outotecin toimeksiantot ovat eri puolilta maailmaa ja mittayksiköt ja putkiluokat valitaan laitoksen sijaintipaikan sekä tilaajan toiveen mukaan kokonaistaloudellisuutta silmällä pitäen. [8.]

### 4 Tässä työssä tarkoitetut virtaavat aineet eli fluidit

Fluidiksi kutsutaan sellaista ainetta, joka ei pysyvästi vastusta muodonmuutosta. Kun aineeseen kohdistuu sopiva voima, sen fluidikerrokset liukuvat toistensa ohi siihen asti, että uusi muoto on saavutettu. Muodonmuutoksen aikana vaikuttavien leikkausjännitysten suuruus riippuu fluidin viskositeetista ja liukumisnopeudesta; lepotilassa ei ole leikkausjännityksiä. [3; 12; 13]

Fluidin tiheys on sekä paine- että lämpötilariippuvainen. Kokoonpuristumattomien fluidien (yl. nesteet) tiheys muuttuu lämpötilan ja paineen muuttuessa vain vähän, mutta esimerkiksi kaasujen tiheys muuttuu olosuhdemuutosten yhteydessä hyvinkin paljon. Kaasut ja höyryt ovat tyyppiesimerkkejä kokoonpuristuvista virtauksista. [3; 13.] Mikäli kaasun tai höyryn tiheyden muutos on vähittäinen tai maksimissaan 10 %, virtausta voidaan käsitellä kokoonpuristumattomana käyttäen keskimääräistä tiheyden arvoa [3].

Tässä työssä käsitellään sekä kokoonpuristuvia että -puristumattomia fluideja ja oman lisänsä tuo lauhteen paluulinjan lauhteenpoistimen jälkeinen paineenmuutoksen aiheuttama kaksifaasivirtaus. Fluidit pyrittiin luokitteluun mahdollisimman laajoihin ryhmiin, mutta osa on kuitenkin käsiteltävä erikseen ominaisuuksiensa tai merkityksensä vuoksi. Tällaisia aineita ovat mm. rikkihappo, höyry ja jotkut kaasut jo aiemmin mainitun lauhteen lisäksi.

Tässä työssä fluidien pääluokiksi on valittu kokoonpuristumattomat nesteet ja lietteet (slurryt) sekä kokoonpuristuvat kaasut ja höyryt ja vielä lisäksi paineen alentuessa äkillisesti höyrystyvät lauhteet. Pääluokat on jaoteltu tarvittaessa alaluokkiin.

#### 4.1 Nesteet

Kaivosteollisuuden prosessit ovat vuosien kokemuksen myötä melkoisen vakiintuneet. Outotecin ratkaisut ovat niin muodoin myös prosessimielessä kypsiä ja vakiintuneita, joten nesteputkien suunnittelutarve on tyyppillisesti melko selkeä. Tarvitaan vesi-, happo-, emäs- ja palavia eli polttoöljylinjoja. Kukin näistä aineista asettaa omat vaatimuksensa niin materiaaleille kuin virtausnopeudellekin. Jo aiemmin mainittu standardi PSK 2401 valittiin virtausnopeuksien viitelähteeksi, johon verrataan myös muiden lähteiden suositusvirtausnopeuksia mahdollisuuksien mukaan. Nesteiden virtausnopeussuosituksissa on joissakin lähteissä annettu pumpun imu- ja painelinjoille eri suositukset, tässä käytetään painepuolen suositusnopeutta. [8; 23]



#### 4.1.1 Vedet sekä pumpattavat ja painovoimaiset lauhteet

Laitoksen toimiessa käytössä on erilaisia vesityyppejä eri tarkoituksiin, esimerkiksi hienojakoisen kiintoaineen kuljettimeksi, höyryn tuotantoon, jäähdytykseen, liuottimeksi tai venttiilien tiivistevedeksi. Vesien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaihtelevat jonkin verran, mutta tähän alkuvaiheen karkeaan mitoitukseen pidettiin riittävänä tarkkuutena veden tiheyden likiarvoa  $1000 \text{ kg/m}^3$ , jota käytetään kaikkien vesien laskennassa kaikissa lämpötiloissa ja paineissa. Toisin sanoen kaikki vedet katsottiin kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan samankaltaisiksi kaikissa olosuhteissa. Myös pumpattavat ja painovoimaiset lauhteet käsitellään vetenä. Lauhdelinjat, joissa tapahtuu paisuntahöyrystymistä, käsitellään erikseen myöhemmin luvussa 4.5 Paisuntahöyrystyvät lauhteet. Mikäli tarvitaan veden muiden ominaisuuksien arvoja, ne määritetään siten, että ne ovat linjassa mainitun tiheydestimaatin kanssa. [8; 23]

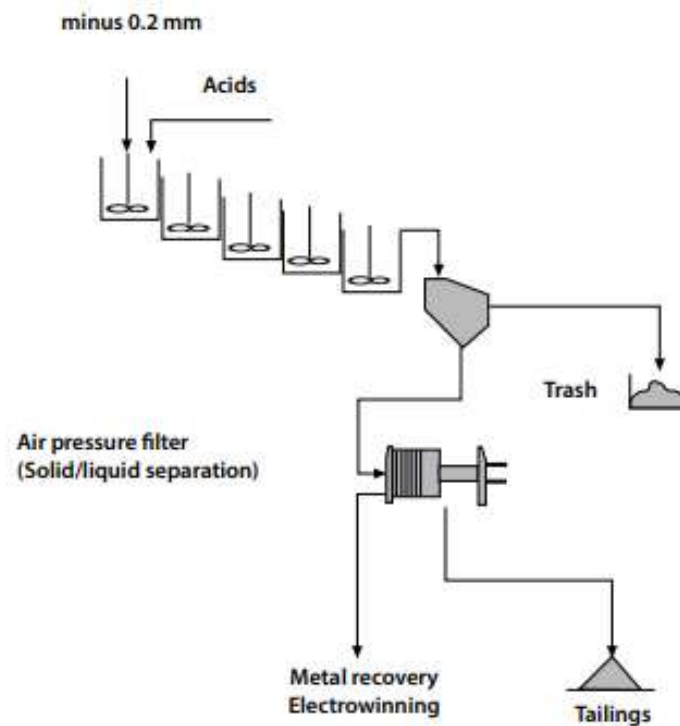
Vesi on amfoteerinen liuote, jonka eroosikorroosipotentiali kasvaa voimakkaasti virtausnopeuden kasvaessa [3; 25 s. 87–90]. Tässä työssä oletetaan veden virtaavan yleensä teräsputkessa ottamatta kantaa teräksen laatuun. Hiiliteräs ja kirkkaat teräkset eroavat korroosiomielessä aika tavallakin [3], mutta suositusvirtausnopeuksia käytettäessä sitä ei tässä vaiheessa tarvitse ottaa huomioon. Teräsputkityyppi määräytyy muutenkin tyyppillisesti asiakkaan olosuhteiden ja toiveiden mukaan [1], joten tämä asia huomioidaan laskennassa myöhemmin.

Kirjallisuudesta löytyy ohjearvoja veden virtausnopeudelle joko putken halkaisijan mukaan tai esimerkiksi käyttötarkoituksen mukaan määriteltynä. Liitteeseen 1 on koottu arvoja eri lähteistä, joita vertailtiin soveltuvin osin PSK 2401:n arvoihin ja todettiin, että eri lähteiden arvot ovat melko hyvin linjassa PSK 2401:n arvoihin. Painovoimaisissa linjoissa putket on mitoitettava tulvintavaaran vuoksi selvästi suuremmiksi kuin pumpattavissa linjoissa eli käytännössä näillä linjoilla virtausnopeuden on oltava alle  $1 \text{ m/s}$  [8].

#### 4.1.2 Hapot

Kaivosteollisuus on joutunut hyväksymään sen, että raakamalmien pitoisuudet ovat nykyään verraten pieniä, koska tunnetut rikkaat esiintymät on hyödynnetty. Tarvitaan siis suuria määriä louhittua raakamalmia, josta toivottu kaivannainen eristetään

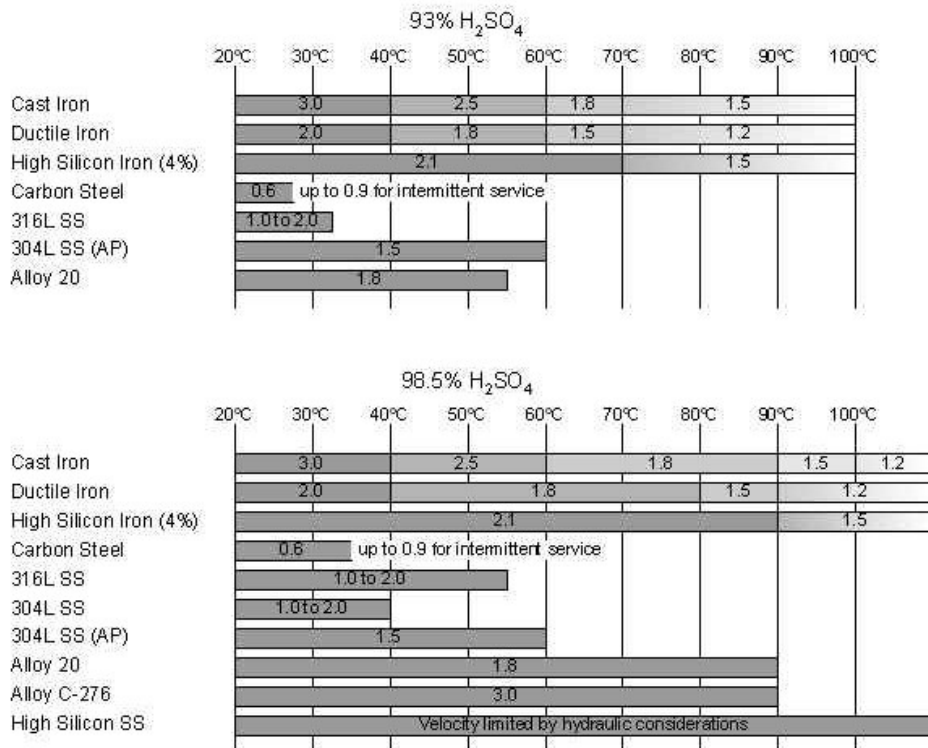
mahdollisimman tehokkaasti. Tähän käytetään tyypillisesti märkäprosessia ja vahvaa happoa (tai emästä) joko liuottimena tai elektrolyytinesteenä. Myös elektrolyysissä syntyvän anodilietteestä (anode slime) voidaan liuottaa kuparijäämiä rikkihapon avulla. Taivutellun kaivannaisen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat menetelmän valintaan. Tyypillinen sekoitintankeissa tapahtuva liuotusprosessi ja sen jälkeinen elektrolyysi on havainnollistettu kuvan 7 virtauskaaviossa. On huomattava, että elektrolyysistä yli jäävä neste ei ole tässä vaiheessa suoranaista jätettä, koska se sisältää vielä runsaasti hyödynnettäviä elementtejä. [26; 38; 39.]



Kuva 7. Sekoitusliuotuksen virtauskaavio happoa käyttäen. Tailingseille ei ole vakiintunutta suomenkielistä termiä, joskus voidaan puhua hännistä. Kyseessä ei kuitenkaan ole poiste, koska hännissä on runsaasti talteen otettavia mineraaleja [40].

Prosessissa käytetään useimmiten rikkihapon,  $H_2SO_4$ , eri väkevyyksisiä liuoksia, jotka saattavat olla myös kuumia [40]. Rikkihappo on kaksiarvoinen vahva happo, joten se siis protolysoituu täysin kaksivaiheisessa reaktiossa. Reaktion ensimmäinen vaihe, jossa muodostuu vetysulfaatti-ioneja ( $HSO_4^-$ ), tapahtuu käytännössä täydellisesti, mutta koska vetysulfaatti-ioni on heikko happo, vain osa ioneista protolysoituu edelleen sulfaatti-ioneiksi ( $SO_4^{2-}$ ). [25, s. 69]

Epäjalot metallit, esimerkiksi nikkeli, reagoivat jo laimean rikkihappoliuoksen kanssa, mutta jalometalleista kupari ja hopea vaativat väkevän liuoksen. Platinaryhmän jalometallit eivät liukene rikkihappoon lainkaan ja kullankin liukoisuus on erittäin huono. Nostamalla väkevän rikkihappoliuoksen lämpötilaa kullan liukoisuus paranee. [40; 42.] Muovi-putket, joita yleensä käytetään väkevien happojen putkina, eivät kestä korkeita paineita tai lämpötiloja. Mikäli happo on kuumaa tai paineistettua valitaan useimmiten kromi-nikkeli-molybdeenivahvistettu ruostumaton teräs. Molybdeenilisä parantaa putken kloridiperäisen korroosion kestoa merkittävästi. [27.] Tällöin suositusvirtausnopeudeksi annetaan jopa 1,5–2,0 m/s riippuen putken halkaisijasta sekä rikkihappoliuoksen konsentraatiosta ja lämpötilasta, mutta yleisluontoisesti maksimina pidetään 1,5 m/s, joka valittiin arvoksi tähän työhön sen laajemman sovellettavuuden takia. Kuvassa 8 on esitetty erilaisten putkimateriaalien suositeltuja virtausnopeuksia eri lämpötiloissa ja kahdella eri rikkihapon konsentraatiolla. Kuvasta voi myös hahmottaa lämpötilan ja konsentraation vaikutusta liukoisuuteen. Hiukan ehkä yllättäen hiukan laimeampi rikkihappoliuos liuottaa lämpötilan kohotessa aggressiivisemmin kuin lähes puhdas rikkihappo. [29; 9.]



Kuva 8. Rikkihapon materiaalikohtaisia suositusvirtausnopeuksia eri lämpötiloissa. [29]

#### 4.1.3 Emäkset

Prosessissa käytetään emäksisiä nesteitä joidenkin kaivannaisten liuottamiseen, prosessissa käytettyjen happojen neutralointiin ja pesuihin, erityisesti kaasujen pesuun märkäpesureissa [30; 8; 26]. Emäksien, kuten happojenkin, valinnassa kiinnitetään huomiota käyttötarkoituksen lisäksi myös raaka-aineen hintaan suhteessa tehoon. Usein käytettyjä ovat kalsiumhydroksidi eli sammutettu kalkki ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), natriumhydroksidi ( $\text{NaOH}$ ) sekä natriumkarbonaatti ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Kalsiumioni saattaa olla haitaksi vaahdotusprosessissa, jolloin valinta tällöin luonnollisesti kallistuu natriumpohjaisten emästen suuntaan. Tosin sulfaattiyhdisteiden flotaatiossa kalsiumionista on hyötyä [26]. Kriittisistä metalleista esimerkiksi litium ( $\text{Li}$ ) rikastetaan emäksisessä ympäristössä ja kulan syanidiliuotuksessa käytetään pH-stabiilaattorina kalkkimaitoa eli kalsiumhydroksidin vesiliuosta [30].

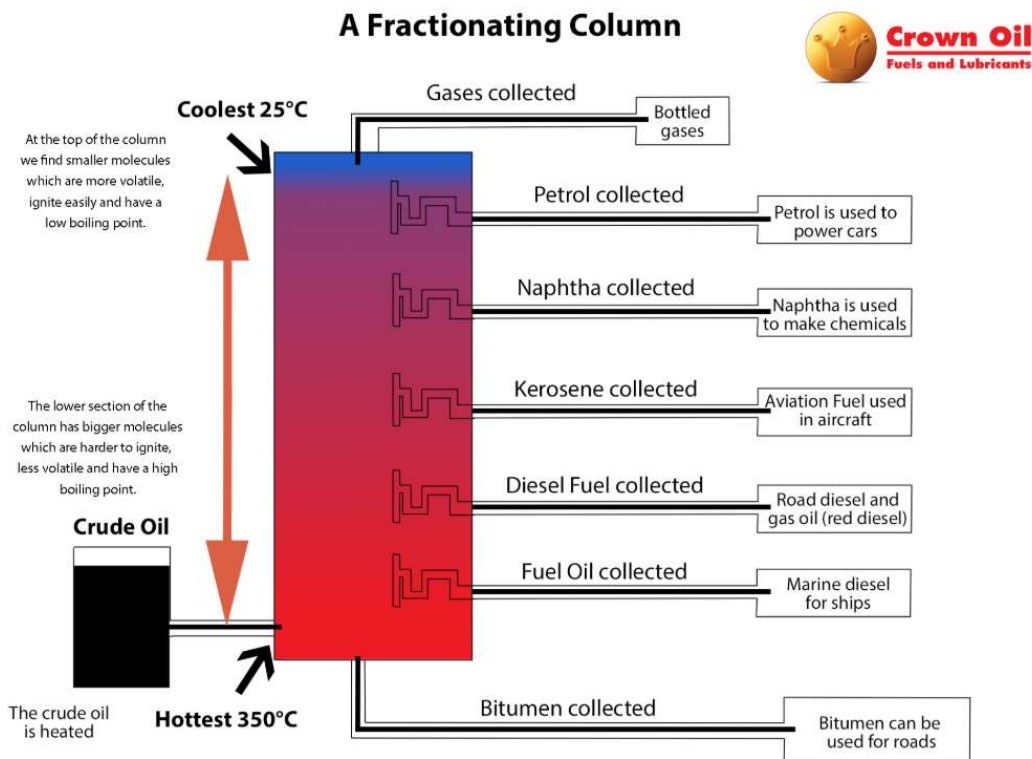
Vahvat emäkset ovat voimakkaita pelkistimiä, ja tämä ominaisuus tekee niistä erittäin korrodoivia [25, s.499–506]. Nikkelivahvisteisen teräksen korroosionkesto on varsin hyvä emäksisessä ympäristössä. Usein käytettyä on austeniittinen ruostumaton kromi-nikkeli-molybdeenivahvisteinen teräsputki, jolle PSK on määritellyt 9 putkiluokkaa paineenkestoiltaan aina 0 bar(g):ista 160 bar(g):iin. [26; 30; 18.]

Luvussa 4.1.2 mainittujen happamien prosessien poistojen neutraloinnissa emäksillä on kriittinen rooli. Emäs valitaan poisteen koostumuksen mukaan sellaiseksi, että syntyvä lopputulos on ympäristön kannalta mahdollisimman neutraali. Kaasun märkäpe-sussa käytetään perinteisesti natriumhydroksidiliuosta, joka on sekä edullinen että re-generoitavissa kohtuullisin kustannuksin. Natriumhydroksidin eli lipeän avulla saadaan poistettua esimerkiksi haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC-päästöjä), hiilidioksidia sekä rikkiä. [26; 27.] Kalkkimaito käsitellään tässä yhteydessä, vaikka se olisi perusteltua kä-sitellä myös lietteissä.

Emäsluosten virtausnopeuksia oli melko hankala löytää. Lipeäliuokselle löytyi jonkin verran kirjallisuusviitteitä, mutta kalkkimaidosta oli erityisen vähän tietoa. Päädyttiin käyt-tämään kalkkimaidon suhteen Outotecin sisäistä ohjeistusta, PSK 2401 -standardia sekä ainoaa löydettyä lähdeä. Sekä Outotecin sisäinen ohjeistus että löydetty lähde antavat samat raja-arvot eli 1,5–2,5 m/s, tosin löydetyssä suunnitteluohjeessa mainitaan erityi-esti tasaisen virtauksen ylläpitämisen tärkeydestä. Lisäksi on mainittava, että lietteiden kohdalla mainittu minimi 1m/s sedimentaation välttämiseksi pätee myös kalkkimaitoon. Oman lisänsä näiden vesiliuosten määrittelyn hankaluuteen tuo se, että molempien mai-nittujen emästen liukoisuus vaihtelee voimakkaasti lämpötilan mukaan. [27.]

#### 4.1.4 Palavat nesteet

Prosesseissa saatetaan käyttää myös palavia nesteitä. Dieseliä käytetään sulattojen uu-nien lämmityksessä ja erityisesti kriittisten pumppujen varavoimalähteenä sähkökatkon tai muun vastaavan poikkeustilanteen yhteydessä ja kerosiiniä käytetään saannosten liuotuksessa sekä liuottimena että kantaja-aineena saannokselle spesifille reagenssille. [26; 29; 31; 33]



Kuva 9. Jakotislauksessa raakaöljystä erotetaan useita jakeita eri käyttötarkoituksiin. Diesel ja kerosiini ovat peräkkäin, diesel pykälää raskaampi jae. [35]

Diesel on kevyttä polttoöljyä, josta on puhdistettu hiukan enemmän rikkiä ja hiukkas- päästölähteitä kuin lämmityspolttoöljystä. Kerosiinista tulee useimmiten mieleen lentokonepetrooli, mutta sitä tuotetaan hiukan erilaisina jalosteina eri käyttötarkoituksiin, myös polttoöljyksi. Diesel ja kerosiini ovat muuten ominaisuuksiltaan varsin samankaltaisia ja molemmat on valmistettu raakaöljystä jakotislaamalla. Jakotislauksen periaate selviää kuvasta 9. Sekä dieselin että kerosiinin tiheys on noin  $0,80 \text{ kg/dm}^3$  ( $15^\circ\text{C}$ ) kun raskaampien polttoöljyjen litrapaino saattaa olla jopa 1 kg. Tiheys vaikuttaa aineen virtausominaisuuksiin, joten eri polttoöljyjen virtausnopeudet määritetään kullekin laadulle sopiviksi. [33; 34; 35; 36]

Mikäli palavan nesteen virta saattaa sisältää kiintoainepartikkeleita tai putken pohjalle kertyvää vettä, virtausnopeuden minimiarvoksi suositellaan noin 1 m/s ja maksimiksi noin 4,5 m/s kiintoainepartikkelien aiheuttaman korroosion ja mahdollisten paineiskujen välttämiseksi. [36; 37] Tässä työssä monesti viitattu standardi PSK 2401 antaa palaville nesteille ohjearvoiksi 1-2 m/s ja öljylle, jonka tiheys on 0,8-0,9 kg/dm<sup>3</sup>, suositusarvo on 1,5-3 m/s. [9].

## 4.2 Lietteet eli slurryt

Kaivosteollisuuden märissä erotus- ja rikastusprosesseissa on erilaisia kiintoaineen ja nesteen seoksia, joita kutsutaan slurryiksi (suom. liete). Kiintoaineen pitoisuus ja partikkelikoko vaihtelee jonkin verran. Ensimmäisessä vaiheessa ennen erotusta partikkelit ovat suurimmillaan ja esimerkiksi elektrolyysissä anodilta syntyvässä suspensiossa, anodilietteessä, pienimmillään [39]. Näiden linjojen putkituksessa on erityisen tärkeää huomioida helppo huollettavuus, pitkäikäisyys ja pumppujen kokonaistaloudellisuus. Mikäli linja on paineistettu, käytetään tyypillisesti nikkelivahvisteisia teräsputkia, joiden eroosion- ja korroosionkestoa ja käyttöikää voidaan lisätä seinämäpaksuutta lisäämällä. Materiaalivalinnassa on tarvittaessa huomioitava lietteissä nesteenä olevat aggressiiviset kemikaalit ja niiden aiheuttama syöpyminen. [40; 41; 42; 43.]

Hiekansekaisen lietteen putkikoon valinnassa on kiinnitettävä huomiota muun muassa kiintoainepartikkelien kokojakaumaan ja kokoon, tiheyteen sekä virtaavan nesteen tiheyteen ja viskositeettiin pH:n ja lämpötilan lisäksi. Lisäksi virtauksen tyyppi on hyvä pitää mielessä. Mitä suurempi partikkelikoko ja hitaampi virtausnopeus, sitä helpommin kiintoaines laskeutuu ja kerrostuu putken pohjalle ja voi jopa aiheuttaa tukoksen. Toisaalta korkeat virtausnopeudet aiheuttavat suurempia painehäviöitä ja myös voimakkaampaa putken mekaanista kulumista kuin maltillisemmat virtausnopeudet. Virtausnopeuden suositellaan olevan suurempi kuin kriittinen virtausnopeus, jotta voidaan välttyä sedimentaatiolta ja putken tukkeutumiselta. Kriittinen virtausnopeus on laskettavissa Durand-Condollion yhtälöllä, jota ei käsitellä tässä työssä. Kuvassa 10 on havainnollistettu sekä liian alhaisen että sopivan virtausnopeuden tuottamia virtaustyyppisiä. [40; 41.]

Käytännössä nyrkkisääntönä voidaan pitää, että lietteen virtausnopeus on oltava vähintään 1 m/s, jotta kiintoaineen kerrostumiselta vältyttäisiin [3; 11; 12; 14; 16; 24].



Kuva 10. Erilaisia virtausprofiileja, joista alin kuva edustaa toivottua virtaustyyppiä. Kahdessa ylemmässä kuvassa näkyy kiintoaineen saostuminen putken pohjalle. [41]

Lietteen ihanteelliseksi virtausnopeudeksi on kirjallisuudessa määritelty 2-6 m/s, jolloin liete voidaan luokitella homogeeniseksi. Erityisesti suositellaan tasaista virtausta, esimerkiksi vakaa 4 m/s sopii 10 % kiintoainetta sisältävälle lietteelle. Tässä on huomioitava sekä kiintoainepitoisuus että partikkelikokojakauma: mitä pienempiä partikkeleita, sitä parempi suspendoituminen ja homogeenisempi liete. On hyvä pitää mielessä, että vaikka vain noin viisi prosenttia koko teollisuudenalalla asennetuista pumpuista on liete-pumppuja, silti niiden energiankulutus voikin nousta jopa 80 %:iin laitoksen käyttökustannuksista. Tässä työssä käsitellään lietteitä, joiden tiheys ja viskositeetti ovat lähellä veden vastaavia aineominaisuuksia. [40; 41]



### 4.3 Kaasut

Kaasu- ja höyryvirrat ovat kokoonpuristuvia virtauksia eli sekä paine että lämpötila vaikuttavat niiden tiheyteen eli molekyylien etäisyyteen toisistaan ja näin tilavuuteen. Toimeksiantajan käytössä on aiemmin insinööriyönä laadittu kaasulinjojen painehäviölas-kuri, joten siihen asiaan ei tässä työssä perehdytä lainkaan. Tässä työssä sekä kaasut että erilaiset höyryt käsitellään ideaalikaasulain mukaisina kaasuihin. [44; 45]

Yleisesti voidaan sanoa, että kaasujen virtausnopeuden tulee olla 3-30 m/s, mutta on muistettava, että kaasun ominaispiirteet, esim. syttyvyys tai palavuus, vaikuttavat arvoihin merkittävästi. [9; 46]

Tässä yhteydessä on hyvä mainita siitä, että kokoonpuristuvien virtausten putkilinjami-toitus ilman tietoa linjan pituudesta ja virtausvastuksista ym. on vielä karkeampaa kuin kokoonpuristumattomien virtausten.

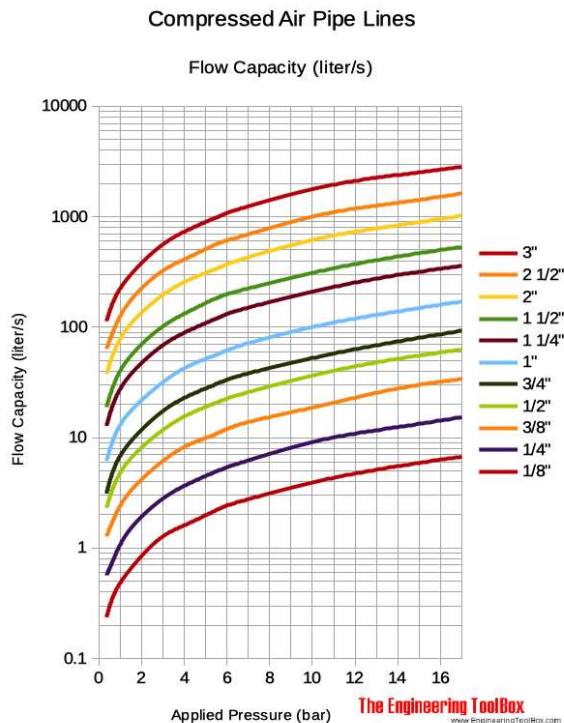
Kaasuvirrat ilmoitetaan virtauskaavioissa yleensä normaalikuutiometreinä eli tilavuutena silloin, kun paine on 101325 Pa(a) ja lämpötila 0 °C. Lämpötila ja paine vaikuttavat kaa-sun tilavuuteen, joten normaalikuutiometrit on muunnettava kuutiometreiksi vallitsevissa prosessiolosuhteissa ennen kuin virtausnopeus voidaan laskea. Tyypillisesti lasken-nassa on käytetty joko ideaalikaasuyhtälöä ja kaasun moolitilavuusvakiota tai jatkuvuus-yhtälöä, mutta Kemianteollisuus ry:n julkaisemasta Teollisuuskaasujen keskusjaketelujär-jestelmät -oppaasta löytyi yhtälö [47, s. 25], jolla voi laskea normaalikuutiometreistä suo-raan virtausnopeuden. Valitettavasti mainittu yhtälö ei ota lämpötilaa huomioon, joten siitä saadut tulokset poikkeavat kahden aiemmin mainitun yhtälön antamista tuloksista merkittävästi etenkin silloin, kun prosessilämpötila on korkea. Vertailulaskenta on esitetty liitteessä 2. Vertailulaskennan jälkeen päädyttiin käyttämään jatkuvuusyhtälöä, koska se huomioi sekä paineen että lämpötilan, mutta siinä on vähemmän välivaiheita kuin ideaa-likaasuyhtälössä. Jatkuvuusyhtälö ja ideaalikaasuyhtälö antoivat varsin samankaltaiset tulokset vertailulaskennassa.

### 4.3.1 Ilmat

Ilma on kaasuseos, joka sisältää noin 78 % typpeä, 21 % happea ja 1 % argonia. Todelliset osuudet ovat hieman alemmat, koska ilmassa on aina jonkin vesihöyryä (0,1–4 %) ja ns. hivenkaasuja (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ym.) mukana. [48]

Laitoksella tarvitaan ilmaa useisiin eri tarkoituksiin mm. aineen kuljetukseen, putkilinjojen kuivaamiseen ja puhdistamiseen ja erilaisten instrumenttien käyttämiseen unohtamatta ilmastoinnin (ja työympäristön) tarpeita. [9; 49]

Tilaajan suunnittelemissa laitoksissa ilman tyypillinen operointipaine on luokkaa 600 kPa(g) ja tarvittaessa tässä onkin käytetty tätä painetta. Suunnittelussa käytetty lämpötila on yleensä noin 20 °C. Näillä arvoilla saadaan riittävä tarkkuus suunnittelun tässä vaiheessa. [8, 49.] Virtausnopeudet vaihtelevat välillä 5–30 m/s ja ilman käyttötarkoitus ja putken halkaisija vaikuttavat suositusnopeuteen [9]. Kuvan 11 nomogrammi havainnollistaa näitä riippuvuuksia tilavuusvirran arvoja hyödyntäen.



Kuva 11. Paineilman suositustilavuusvirtoja paineen ja putken nimellishalkaisijan funktiona [52].

Ilmaputkia voidaan tehdä useista materiaaleista. Käytännössä valinta kuitenkin osuu usein samaan ruostumattomaan teräkseen, mitä muissakin putkilinjoissa käytetään. Tämä minimoi asennusvaiheessa tapahtuvien virheiden määrää ja lisää näin turvallisuutta sekä on usein kokonaisedullisin ratkaisu muutenkin. Myös käytetty kompressorityyppi tuo vaatimuksia putkimateriaalin korroosionkestolle [50].

#### 4.3.2 Happi

Happi kuuluu vaarallisiin kaasuihin yhdessä vedyn ja asetyleenin kanssa. Se on itsessään palamaton, mutta ylläpitää voimakkaasti palamista. Happi esiintyy tyypillisesti kaksiatomisena molekyylinä ( $O_2$ ), se on myrkytön, hajuton ja mauton kaasu. [51; 52; 53; 54.] Sen tiheys  $1,429 \text{ kg/m}^3$  [53; 54] on suurempi kuin ilman tiheys  $1,2754 \text{ kg/m}^3$  [55], eli happi on raskaampaa kuin ilma. Tämän vuoksi mahdolliset vuodot voivat kertyä ja kerrostua mataliin kohtiin tai suljettuihin tiloihin, esimerkkeinä erilaiset kanaalit, ojat, kaivot tai huonosti tuulettuvat huoneet [53]. Vaikka happi ei olekaan myrkyllistä, niin kuvassa 12 kuvattu lisähapen tuoma mahdollisen palamisen voimistuminen ja syttymisherkkyiden kasvu on syytä huomioida laitoksen turvallisuusarviossa.

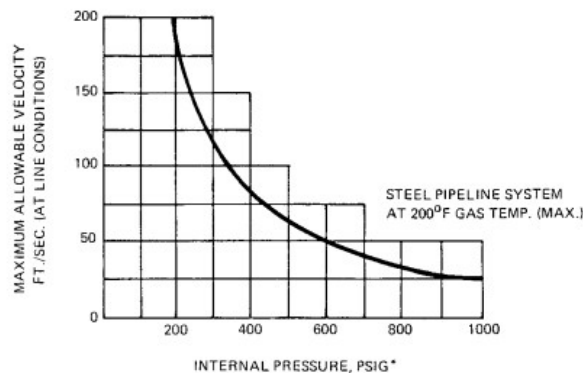
Happipitoisuus %	Vaikutus palamiseen
0-20	palaminen hidastuu tai sammuu
21	normaali ilman happipitoisuus
24	palamisnopeus kaksinkertaistuu
40	palamisnopeus kymmenkertaistuu, palon sammuttaminen mahdotonta niin kauan kuin palavaa ainetta on jäljellä
100	rauta palaa hapessa ja esim. öljyinen trasseli räjähtää

Toimeksiantajan suunnittelemissa laitoksissa happea käytetään pääasiassa palamisen tehostamiseen erilaisten prosessiuunien polttimissa sekä liuotusprosesseissa reaktoreiden ja autoklaavien hapetusreaktioihin. Kaikki palaminen vaatii happea, mutta palavan kaasun liekin lämpötila voidaan maksimoida syöttämällä happea oikeassa suhteessa. Tällöin esimerkiksi propaanin liekin lämpötila  $2\ 850 \text{ C}$  saavutetaan syöttämällä happea

sekoitussuhteessa 4,0. Ilman lisähappea propaanin liekin lämpötila on 2 000 C. Tässä käytettiin propaania esimerkkinä, mutta trendi on yleispätevä kaikilla palavilla kaasuilla. [56; 57.]

Hiilivetyjen palaessa happisaturaatio vaikuttaa myös palamisen yhteydessä syntyvien pienhiukkasten ja typen oksidien määrään. Nämä hiukkaset ja yhdisteet on puhdistettava palokaasuista, mikä vaikuttaa prosessin kokonaiskustannuksiin. Teoriassa typen oksidien syntyminen voidaan välttää polttamalla typetöntä polttoainetta happiatmosfäärissä. [58.]

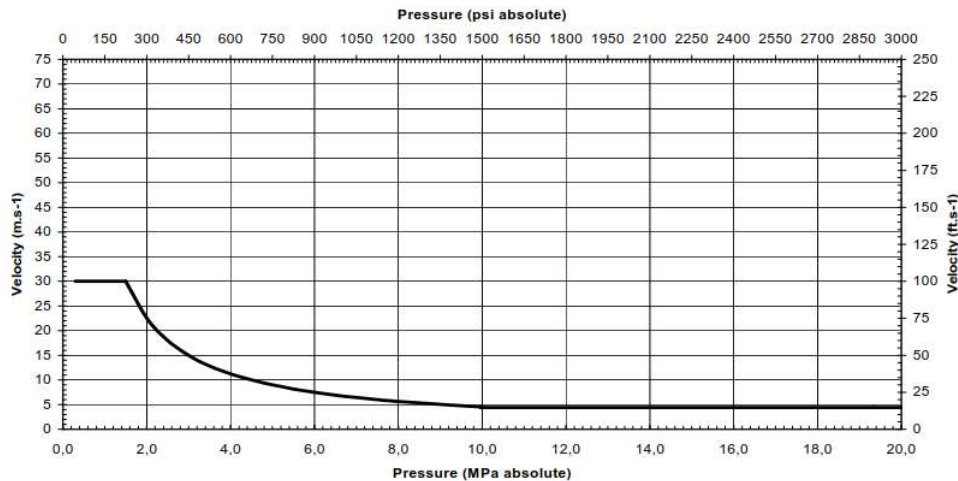
Happiputkiston suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota virtausnopeuteen paineen ja lämpötilan funktiona putkimateriaalin lisäksi. Mikäli virtausnopeudet ylittyvät, on riskinä putkimateriaalin itsesytyminen ja voimakas palaminen. Kuvasta 13 voi havaita, että teräsputkessa nopeuskäyrä ei ole lineaarinen. On syytä panna merkkille, että kuvaaja antaa arvot törmäyksettömälle virtaukselle. Mikäli kyseessä on virtaus, jossa hiukkaset törmäävät, niin suurin sallittu virtausnopeus likimain puolittuu. Mikäli annetut ohjevirtausnopeudet ylittyvät, putkimateriaali on vaihdettava esimerkiksi kupariin tai kupariseosteiseen materiaaliin myös venttiilien ja muiden lisäosien osalta. [3.]



Kuva 12. Hapen virtausnopeuskäyrä teräsputkessa, kun virtaus on törmäyksetön [3]

Toimeksiantajan edustajan päätöksellä happiputket lasketaan sillä oletuksella, että hiukkaset törmäävät (impingement) putkilinjassa. Tämä on järkeenkäyvää, koska vain suorat putkijaksot, jotkin suuren kaarevuussäteen haarat ja käyrät sekä enintään 3:1 putkisupistukset luetaan osiksi, jotka eivät ole alttiita hiukkasten törmäykselle. Käytännössä kaikki

T-haarat, pienen kaarevuussäteen käyrät, suurin osa venttiileistä, sihdeistä ja suodattimista sekä kuristus- ja mittauslaipat ynnä äänenvaimentimet, eli normaalit toiminnalliset putkistot, ovat alttiina hiukkasten törmäyksille. Tällöin maksimivirtausnopeuskäyrä noudattaa kuvan 14 käyrää. [59; 60.]



Kuva 13. Hapen virtausnopeuskäyrä teräsputkessa, kun hiukkaset törmäävät virtauksessa. [60].

Jos hapen paine on pienempi kuin 300 kPa(a) (3 bar(a)), virtausnopeutta ei tarvitse rajoittaa teräsputkissa, mutta putkikomponenttien valintaan on tällöin kiinnitettävä erityisen paljon huomiota [60]. Silloin jos virtausnopeus jää pienemmäksi kuin kuvan 13 perusteella laskettu suurin sallittu virtausnopeus, voidaan käyttää mitä tahansa metallia [59; 60]. Eri tilanteisiin soveltuvat metallit löytyvät ohjeen "Oxygen Pipeline and Piping Systems (EIGA)" liitteistä C ja D [59].

#### 4.3.3 Typpi ja muut palamattomat kaasut

Esimerkiksi palavien kaasujen putkistojen huuhteluun käytetään usein typpeä sen kemiallisen passiivisuuden vuoksi. Tällöin putki saadaan kuivattua ja poistettua mahdolliset partikkelit ja jäämät putken seinämistä ennen kuin palavaa kaasua ajetaan sisään. Kyse on siis turvallisuudesta. Laitoksella voi olla käytössä myös muita inerttejä eri tarkoituksiin. Nämä kaasut luetaan vaarattomiksi kaasuiksi. [51.]

Mikäli laitoksen suunnittelun yhteydessä ilmenee tarve käyttää muita palamattomia kaasuja esimerkiksi tulipalon sammutukseen, myös niille voidaan käyttää ohjearvoina standardin PSK 2401 antamaa virtausnopeuden vaihteluväliä 15–25 m/s [9].

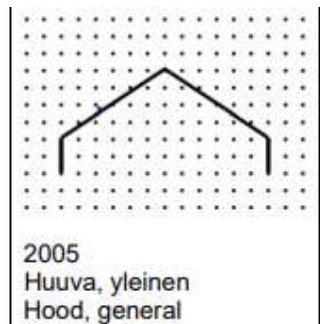
#### 4.3.4 Palavat kaasut

Tässä yhteydessä palavilla kaasuilla tarkoitetaan yleensä polttoaineeksi käytettävää paineistamalla nesteytettyä kaasua, joka on butaania tai propaania tai niiden seosta. Proessin hönkäkaasuihin toisinaan syntyvä vety käsitellään myöhemmin kohdassa 4.3.5. Propaanin liekin lämpötila tuli esiin jo hapen yhteydessä luvussa 4.3.2. Nestekaasu on määritelmällisesti kaasumainen hiilivety, joka valmistetaan tislaamalla ja edelleen jalostamalla raakaöljystä. Se on paineistettu pullotuksen yhteydessä, ja huoneenlämmössä pullon paine on noin 800 kPa [61].

Virtausnopeuden maksimiarvojen määrittämiseksi on noudatettava kohdemaan laeissa, asetuksissa ja viranomaisten määräyksissä annettuja arvoja, ja nämä on tarkistettava aina huolellisesti jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa. Esimerkiksi Suomessa toimitaan standardin SFS 5987 mukaan ja rajoitetaan nestekaasun virtausnopeus runkolinjassa maksimissaan 15 metriin sekunnissa vähintään 25 baarin paineessa [62]. Ensimitoitus voidaan kuitenkin tehdä standardin PSK 2401 antamilla arvoilla, min. 10 m/s ja max. 20 m/s [9].

#### 4.3.5 Hönkäkaasut

Hönkäkaasu on neste- tai kaasupinnasta ilmaan haihtuvaa kaasua, jota muodostuu itsekseen. Sitä muodostuu tyypillisesti nestettä sisältävän altaan nestepinnan yläpuolelle tai neste- tai kaasusäiliön ilmatilaan. [63.] Avoimen säiliön kaasut kerätään usein huuvaan (kuva 15), josta lähtee putki kohti jatkokäsittelypaikkaa tai suoraan ilmakehään. Näille putkille on tyypillistä virtaavan kaasun pieni paine sekä suuri tilavuusvirta ja putken suuri halkaisija, jolloin virtausnopeudet ovat varsin maltilliset [63; 64]. Suunnittelun lähtökohdana on yleensä painehäviöiden minimointi, jota ei käsitellä tässä insinööriyössä. Putken suuri nimellishalkaisija kuitenkin tukee tätä tavoitetta, kuten kuvan 5 kaavasta voi nähdä.



Kuva 14. Hönkäkaasujen keräilyyn käytetyn huuvan piirrosmerkki standardista PSK 3601 [65].

Putkistoa suunnitellessa ja mitoittaessa on aina muistettava, että putkiston tulee kestää suurin sallittu käyttöpaine. Vaarallisten kemikaalien hönkäputket mitoitetaan kuitenkin vähintään 50 kPa painetta kestäviksi, myös silloin, jos suunnittelupaine on tätä pienempi paitsi, jos kyseessä on alipaineputkisto [64].

Tässä työssä hönkäkaasut käsitellään kaasujen erikoistapauksena ja niiden putkimitoitukseen käytetään tapauskohtaisesti soveltuvia joko palavien tai palamattomien kaasujen kaavoja ja raja-arvoja. Suositellaan kuitenkin määrittämään putken halkaisija siten, että virtausnopeus pysyy mahdollisimman maltillisena painehäviöiden minimoimiseksi.

#### 4.4 Höyryt

Tämän työn kohdeprosesseissa käytetään höyryä kuumentamiseen ja lämmittämiseen (prosessiliuokset, reaktorit, autoklaavit, rumpukuivaimet). Autoklaavissa höyryä käytetään suorana lämmönlähteenä, kun taas esimerkiksi rumpukuivaimelle höyryn lämpöenergia siirtyy lämmönvaihtimien kautta samoin kuin liuosten lämmitykseen.

Höyry tulee prosessialueelle joko alueen ulkopuolisesta lähteestä tai se generoidaan esimerkiksi jätelämpökattilassa [66].

#### 4.5 Paisuntahöyrystyvät lauhteet

Pumpattavia lauhteita käsitellään tässä työssä kuten vettä. Niiden lämpötilan on oltava vähintään 15 °C alempi kuin nesteen kiehumispiste vallitsevissa olosuhteissa, jotta niillä ei ole (paisunta)höyrystymisriskiä. Yleistäen voidaan ajatella, että lauhdeputkisto on hyvä sijoittaa mahdollisimman alas kuitenkin niin, että lauhde voi valua painovoimaisesti lauhdesäiliöön. Höyrylinjoista on voitava poistaa lauhdetta ainakin alimmista pisteistä ja ennen säätöventtiilejä ja pitkissä höyryputkistoissa muutenkin noin 40 – 50 metrin välein. Kaksifaasivirtausputket on pidettävä niin lyhyinä kuin mahdollista sekä minimoitava käyrien ja nousujen määrä. [21.]

Höyryn jäähtyessä se lauhtuu eli tiivistyy nesteeksi (kondensoituu), joka on vettä. Lauhde saattaa olla vain muutaman asteen höyryä viileämpää, jolloin paineen nopea aleneminen aiheuttaa sen, että osa nesteestä höyrystyy uudestaan erittäin nopeasti. Ilmiötä kutsutaan paisuntahöyrystymiseksi (flash steaming). Näin tapahtuu tyypillisesti lauhteenpoistimen jälkeen, ja näiden putkilinjojen suunnitteleminen onkin hiukan haasteellista. [21, 67, 68, 69.]

Paisuntahöyrystynyt lauhde jatkaa matkaa kaksifaasivirtauksena, jolloin nesteen ja kaasun (höyry) virtausnopeudet poikkeavat toisistaan siten, että höyryn virtausnopeus on suurempi kuin nesteen. Kaksifaasivirtaus tuo muitakin haasteita, mutta tässä ei paneuduta niihin tarkemmin. Suuremman ongelman luo se tosiasia, että kilogramma höyryä on tilavuudeltaan merkittävästi suurempi kuin kilogramma nestettä. Näin paisuntahöyrystyvän putkilinjan mitoituksessa on ehdottomasti huomioitava paisuntahöyryn tilantarve. Mikäli näin ei toimita, putkistolle ja sen komponenteille aiheutuu merkittävää haittaa syntyvästä paineiskusta. Koska höyrystyvän lauhteen tilavuus on huomattavasti suurempi kuin nesteen, putkihalkaisijan laskennassa voidaan laskennan yksinkertaistamiseksi jättää nesteen tilavuus ja virtausnopeus huomiotta. [69; 70; 71.]

Paisuntahöyrystyvien lauhteiden mitoitukseseen käytetään eri menetelmiä. Tähän työhön valittiin menetelmä, joka perustuu paine-eroon ennen ja jälkeen lauhteenpoistimen. Menetelmässä lasketaan paine-eron indusoiman höyryn massan prosentuaalinen osuus lauhteen kokonaismassasta ominaisentalpioiden ja kylläiseen höyryyn sitoutuneen lämmön kuormituksen avulla, minkä jälkeen saadaan laskettua höyrystyvän osuuden



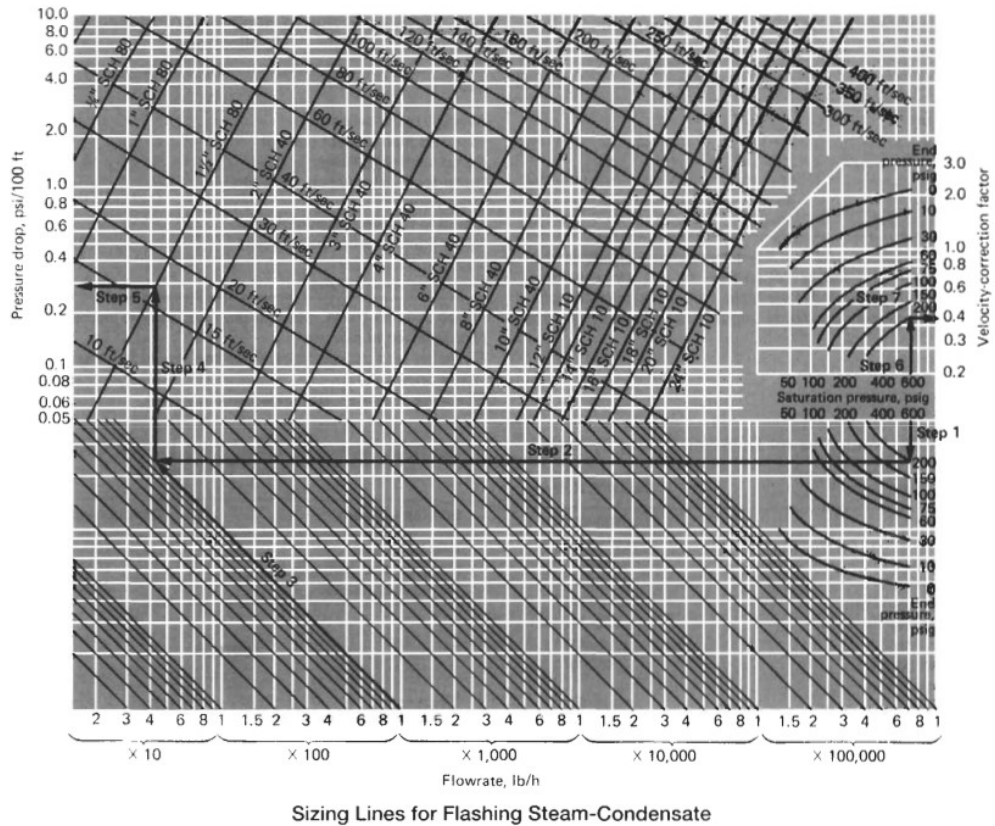
tilavuus höyryn ominaispainon avulla. [72; 73; 74.] Laskenta ja yhtälöt esitellään tarkemmin osassa 6.1.5.

Tässä työssä määritettiin aiempien projektien perusteella tyypillisesti käytetyn höyryn lämpötila-alue noin 150 °C:seen ja paine-ero ~450 kPa:iin, jolloin lauhteesta höyrysty laskennallisesti hiukan alle 9 %. Päätettiin käyttää laskennassa vakiona kymmentä prosenttia ja käyttää halkaisijan laskennassa vain höyryn tilavuutta ja virtausnopeutta.

## 5 Tarvemäärittely ja aiemmat käytänteet

Alkuvaiheen putkihalkaisijoiden määrittelyssä on aiemmin käytetty kuvan 16 kaltaisia nomogrammeja. Nykyään, kun tietokoneen käyttö laitossuunnittelussa on oletusarvo, myös putkimitoitukset halutaan usein tiedostoina ja taulukkolaskentaohjelmalla lasketuina siten, että laskentaan käytetyt arvot ja perusteet ovat nähtävissä yhdellä vilkaisulla. Nomogrammin lukeminen vaatii jonkin verran harjaannusta, mutta saadut tulokset ovat varsin kilpailukykyisiä laskureilla saatujen arvojen kanssa [8, 27]. Tämä insinööri työ pyrkii vastaamaan määritettyyn tarpeeseen ja osaltaan yhdenmukaistamaan alkuvaiheen laskentaa.

Outotecilla on ollut käytössä muutamia erinomaisia laskureita, jotka kuitenkin laskevat vain esimerkiksi veden ja ilman putkihalkaisijoita tai ovat tarkoitettuja myöhempiin suunnitteluvaiheisiin, kun layout on jo hahmottunut ja pumppulaskenta on järkevää tehdä. Tyypillisesti käytössä on ollut myös eri palveluntarjoajien verkkolaskureita esimerkiksi paisuntahöyrystyvien lauhteiden laskentaan. Yhteistä näille kaikille on ollut kuitenkin se, ettei laskentaa ja laskentaperusteita ole voitu dokumentoida kätevästi ja yhteneväisesti ja lisäksi eri fluidien laskemiseen on tarvittu eri sovelluksia.



Kuva 15. Nomogrammi paisuntahöyrystyvän lauhdelinjan mitoitukseen. [8].

Internetissä on vapaasti käytettävissä eri yritysten putkikokolaskureita. Laskurit on tyypillisesti tarkoitettu vain jonkin tai joidenkin rajattujen virtaavien aineiden laskentaan ja monet käyttävät amerikkalaisia yksiköitä. Useimmat näistä on tarkoitettu vaiheeseen, joissa painehäviöiden laskenta on jo mielekästä, joten ne eivät palvele tarkoitustaan varhaisvaiheen mitoitusyökaluina. Kuvassa 17 on ensimmäiset hakutulokset, kun [www.google.com](http://www.google.com)iin on syötetty hakusanat "pipeline sizing calculation online".

<https://www.tlv.com> › global › water-pipe-sizing-velocity ▾ Käännä tämä sivu

Online calculator to quickly determine **Pipe Sizing** by Velocity for Water. Includes 53 different calculations. Equations displayed for easy reference.

#### Natural Gas Pipeline Sizing - CheCalc

<https://checalc.com> › solved › gasPipeSizing ▾ Käännä tämä sivu

Equation in English Units, Pipe ID (D) 19.00. inch. Pressure (Pavg) 903.70. PSIA. Z Factor (Z) 0.8793. Length (Le) 10.0242. mile. Friction Factor (f) 0.01199. Transmission Factor (F) 18.2645. Gas Flowrate (Q) 422.41. MMSCFD. Velocity Inlet. 32.71. ft/s.

#### Pipe diameter and flow rate calculator, online

<https://www.pipeflowcalculations.com> › flowrate › calcul... ▾ Käännä tämä sivu

Pipe diameter calculation for known flow rate and velocity, in closed round pipe, applicable for liquids and gases.

#### Natural Gas - Pipe Sizing Calculator - Engineering ToolBox

<https://www.engineeringtoolbox.com> › natural-gas-pipe-... ▾ Käännä tämä sivu

Calculate the capacities and dimensions of natural gas pipe lines.

#### Pipe Sizing - Engineering ToolBox

<https://www.engineeringtoolbox.com> › steam-condensate... ▾ Käännä tämä sivu

Sizing steam and condensate pipes - pressure loss, recommended velocity, capacity and more. ... Steam Pipe - Online Pressure drop Calculator. Calculate ...

#### Pipe Water Velocity and Minimum Pipe Diameter Calculator

[irrigation.wsu.edu](http://irrigation.wsu.edu) › Content › Calculators › General › Pi... ▾ Käännä tämä sivu

Use the water velocity form to calculate the velocity of water in a pipe. Use the second form to calculate the diameter of a pipe required for 5 fps pipe velocity.

#### Pipe size diameter calculator software - Pipe Flow Software

<https://www.pipeflow.com> › pipe-flow-wizard-software ▾ Käännä tämä sivu

Pipe Flow Wizard Software for pipe sizing and diameter calculations.

#### Pressure Drop Online-Calculator - SF Pressure Drop

Kuva 16. Verkossa vapaasti saatavilla olevia putkilinjojen mitoituslaskureita.

Laskurit ovat usein varmatoimisia ja niihin ohjelmoitu varsin vaativiakin laskentoja, esimerkiksi kaasulinjojen painehäviöt ja paisuntahöyrylinjojen laskenta. Huonona puolella on mm. se, että yksi laskuri ei riitä sekä se, että niistä saa laskentaperusteet talteen vain kuvakaappauksina eikä editoitavana datana. Lisäksi ongelmana voi olla laskennassa käytetyt yhtälöt, joihin on syötettävä arvoja, joita ei ole tiedossa eli ne pitää arvioida, tästä esimerkkinä Spirax Sarcon erinomainen Flash Condensate -laskuri, johon on arvioitava kaksifaasivirtauksen molempien faasien virtausnopeudet lauhteenpoistimen syöttö- ja ulostulopaineiden lisäksi [72].

## 6 Putkilinjan mitoitustyökalu

Tämän insinööriyön käytännön osuutena on MS Excelissä toteutettu laskuri, jonka avulla voi määrittää eri fluideille tarkoitettujen putkien halkaisijan vertailemalla laskettua virtausnopeutta määritettyihin suositus- ja muihin ohjevirtausnopeuksiin. Laskurin tarkoitus on mitoituksen lisäksi tuottaa dokumentoitua tietoa suunnitteluprosessin alkuvaiheen alustavaan putkimitoitukseen.

### 6.1 Laskurin rakenne ja toiminta

Laskurissa on kansilehti, jossa kerrotaan mistä on kysymys ja annetaan käyttöohjeet ja johon kirjataan projektin yksilöintitiedot (kuva 18). Laskuri toteutettiin englanniksi Outotecin toiveesta. Seuraava välilehti on varsinainen laskentaan tarkoitettu välilehti (kuva 19), jossa määritetään virtaava aine alaluokkineen pudotusvalikoiden avulla. Ohjelma nostaa näkyviin asianmukaisen syöttökenttärivin ja kun käyttäjä on valinnut mieleisensä halkaisijan putkelle, hän painaa "PRINT" -painiketta ja rivin tiedot tulostuvat välilehden alaosaan uusin rivi aina ylimmäiseksi. Laskenta voidaan toistaa mille tahansa pudotusvalikon fluidille, eikä putkien eli tulostettujen rivien lukumäärää ole rajoitettu. Valmis rivi voidaan kopioida, poistaa tai palauttaa editoitavaksi rivin päähän syntyvien Active-x -komponenttien avulla. Tarkoitus on, että käyttäjä kopioi tämän laskentavälilehden uudeksi välilehdeksi ennen kunkin alueen laskennan aloittamista. Tämä mahdollistaa sen, että laitoksen eri alueiden putkimitoitukset ovat kukin omilla välilehdillään tai käyttäjä voi myös halutessaan tehdä välilehdistä PI-kaaviokohtaiset tai luoda jonkin muun luokitusperusteen.

Thist tool is designed for preliminary phase of P&ID designing, to be replaced with more p

<b>PROJECT ID</b>		Please, fill in these
PROJECT NAME		
CUSTOMER NAME		I appreciate all feedba
PROJECT NUMBER		BR, Satu ( satu.siitone

Kuva 17. Laskurin kansilehdelle kirjatut tunnistetiedot kopioituvat automaattisesti laskurin kaikille laskentavälilehdille.

Laskentavälilehden jälkeen tulevat parametri- ja datalehdet, joille on koottu tarvittavat taustatiedot. Datalehdet on luokiteltu siten, että kullakin lehdellä on vain yhdentyypistä tietoa, esimerkiksi veden suositus- ja maksimivirtausnopeudet kullekin putkikoolle tai kaasujen laskennassa käytetyt kaavat tai höyryn laskennassa käytetyt taulukot, putkiluokat arvoineen jne.

12						
13	<b>Liquid</b>		<b>Water</b>			
14						
15						
16	Line specifications, user fills in					User
17	Line ID	P&ID No.	Fluid code	Nominal flow m <sup>3</sup> /h	De flow	
18						

Kuva 18. Kuvan vasemmasta reunasta voi huomata miten rivien numerointi ei ole jatkuva. Tämä johtuu siitä, että ohjelma piilottaa tarpeettomat rivit automaattisesti ja nostaa näkyviin vain käyttäjän sillä hetkellä tarvitsemat rivit.

Varsinainen laskentalehti hakee tarvittavat arvot ja tiedot datalehdiltä ja laskee todellisen virtausnopeuden käyttäjän syöttämälle tilavuus- tai massavirralle. Käyttäjä vertaa saatua arvoa suositusarvoihin ja joko syöttää uudet arvot tai hyväksyy sen hetkisen nimellishalkaisijan ja todellisen virtausnopeuden. Laskuri vertaa saatua laskennallista arvoa datalehdeltä haettuihin taulukkoarvoihin ja vertailun perusteella hakee laskennallisen arvon soluun informatiivisen värin. Lyhyesti: jos arvo on ulkona alueelta, solu on punainen ja suositusarvossa tai suositusalueella olevan arvon väri on vihreä. Kyseinen ominaisuus ei kuitenkaan rajoita käyttäjän mahdollisuutta valita mieleisensä putkihalkaisija ja virtausnopeus, vaan kyseessä on siis puhtaasti ohjeellinen toiminne. Kuvassa 20 lietteelle laskettu virtausnopeusarvo ylittää selvästi maksiminopeussuosituksen.

User selections		Calculated	Values from database				User fills in	
Pipe class	DN/NPS	Real velocity m/s	ID mm	Optimal velocity m/s	Min. velocity m/s	Max. velocity m/s	NOTES	TOP
E10H1A01	20	38	22,9	4	1	6	Slurry	Slurry

Kuva 19. Todellisen, laskennallisen virtausnopeuden arvosolu on punainen, koska virtausnopeuden maksimiarvo ylittyy.

Parametrivälilehdelle on määritelty laskurin ohjelmointiin tarvittavia parametrejä ja se on piilotettu käyttäjältä. Myös laskentavälilehdelle (Master Calculation Sheet) määritetyt parametrit ovat piilossa käyttäjältä (kuva 21).

The image shows two screenshots of the Outotec software interface. The top screenshot displays the 'User selections' section with fields for PROJECT ID, PROJECT NAME, CUSTOMER NAME, and PROJECT NUMBER. It also shows a 'COLOR CODING' legend and a 'PRINT' button. The bottom screenshot shows the same interface but with the 'User selections' section hidden, leaving only the 'Line specifications' section visible. The 'Line specifications' section includes fields for Line ID, P&ID No., Fluid code, Nominal flow m<sup>3</sup>/h, Design flow m<sup>3</sup>/h, Design Pressure kPa(a), Design Temperature °C, Pipe class, and DN/NPS.

Kuva 20. Ylemmässä näytökuvaleikkeessä parametrit ovat näkyvillä, ja välilehdelle voi tehdä muutoksia. Alemmassa kuvassa on käyttäjänäkymä.



## 6.2 Nesteyhtälöt ja virtausten ohjearvot

Prosessissa käytetyt nesteet eroavat fysikaalisilta ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan niin paljon, että on perusteltua jaotella nesteet vielä neljään luokkaan. Koska kyse on kuitenkin kokoonpuristumattomista virtauksista, kaikille soveltuu jo kuvassa 5 alustavasti esitelty yhtälö 1 [9, 75].

$$v = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot D^2} \quad (1)$$

jossa  $v$  on virtausnopeus,  $m/s$   
 $Q$  on tilavuusvirtaus,  $m^3/s$   
 $D$  on putken sisähalkaisija,  $m$

Tätä yhtälöä käytetään poikkeuksetta kaikille tässä työssä mainituille nesteille.

Nesteille on annettu yleisiä virtausten raja-arvoja, esimerkiksi 1-3 m/s painepuolelle [75], mutta pidettiin parempana yksilöidä eri nestetyypeille omat arvot. Arvot on tarkoitettu nesteille, joiden lämpötila on noin 20°C. Erityisesti happojen ja emästen kohdalla on tarkistettava virtausnopeuden raja-arvot luotettavasta lähteestä, mikäli lämpötila poikkeaa kohtuullisen paljon oletuslämpötilasta.

### 6.2.1 Vedet ja pumpattavat lauhteet, virtausnopeuksien ohjearvot

Pumpattavia lauhteita käsitellään tyypillisesti vetenä, joten virtausnopeudet ovat samat kuin vedelle on annettu taulukossa 1.

Taulukko 1. Vesien ja pumpattavien lauhteiden virtausnopeuksien ohjearvot standardin 2401 mukaan putkikoon perusteella luokiteltuna [9].

DN	≤ 25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
$v$ (m/s)	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	2,0	2,5	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,7	5,0
$v_{\max}$ (m/s)	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5	5,0	5,0	5,5	5,5

### 6.2.2 Hapot, virtausnopeuden ohjearvot

Rikkihapon konsentraatio ja lämpötila vaikuttavat voimakkaasti sen korroosipotentiaaliin, mikä tulee huomioida virtausnopeutta säädettäessä. Mikäli suolahapon virtausnopeus ylittää taulukossa 2 annetun maksimin, sen molekyyli rakenne alkaa hajota ja syntyy vetykaasua sekä kloorikaasua. Vety pienenä atomina läpäisee käytännöllisesti katsoen kaikki materiaalit, joten se poistuu putkesta (heikentäen putken rakennetta poistuesaan) ja jäljelle jää kloorikaasu, jolla on erittäin suuri korroosipotentiaali, se on erittäin reaktiivista, minkä lisäksi se on varsin myrkyllistä.

Taulukko 2. Hapoista käsitellään tässä vain rikki- ja suolahapot, joille standardi PSK 2401 antaa taulukon mukaiset maksiarvot [9].

Happo	Maksiminopeus m/s
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,5
HCl	1

### 6.2.3 Emäkset, virtausnopeuden ohjearvot

Kalkkimaidon virtausnopeuden ohjearvoja ei juurikaan löytynyt. Australialaisen vesiyhtiön antama suositusarvo 2 m/s osuu juuri Outotecin oman ohjeistuksen vaihteluvälin keskelle. Mainittu vesiyhtiö antaa suunnitteluohjeissaan Outotecin oman ohjeistuksen kanssa yhtenevät suositusarvot. Taulukossa 3 on esitetty sekä kalkkimaidon että natriumhydroksidiliuoksen suositusvirtausnopeudet.

Taulukko 3. Emäksien virtausarvot vaihtelevat aineittain. Natriumhydroksidin eli lipeän vesiliuos on paljon käytetty prosessineste [9]. Myös kalkkimaitoa eli kalsiumhydroksidin vesiliuosta käytetään usein [76].

Emäs	Miniminopeus m/s	Maksiminopeus m/s	Suositusnopeus m/s
NaOH [9]	0,5	1	N/A
Ca(OH) <sub>2</sub> [27.; 76; 77]	1,5	2,5	2,0



#### 6.2.4 Palavat (Polttoöljy ym.), virtausnopeuden ohjearvot

Diesel ja kerosiini ovat tärkeimmät laitoksissa käytetyt palavat nesteet. Niillä on samat ohjearvot, kuten taulukosta 4 voidaan nähdä.

Taulukko 4. Dieselin ja kerosiinin tiheys on noin 0,8 kg/dm<sup>3</sup>, joten PSK 2401 suuremmat virtausnopeuden maksimiarvot kuin mitä yleiset palavien nesteiden arvot ovat [9].

Palava neste	Miniminopeus m/s	Maksiminopeus m/s
Diesel, kerosiini	1,5	3

#### 6.3 Lietevirtausten ohjearvot

Lietteille on tyypillisesti käytetty varsin maltillisia virtausnopeuksia. Tässä työssä käytetty PSK 2401 -standardi ei varsinaisesti käsittele lietteitä, mutta antaa kiintoaineen ja nesteen seokselle ohjeeksi 1-2 m/s. Toisaalta taas Metso Slurry Handling Solutions:issa kaivosteollisuuden lietteille annetaan virtausnopeudeksi 1-6 m/s, joka päätettiin valita tähän laskuriin keskustelussa toimeksiantajan edustajan kanssa (taulukko 5).

Taulukko 5. Lietteen ohjevirtausarvot Metso Slurry Handling Solutionsin mukaan.

Virtaava aine	Miniminopeus m/s	Maksiminopeus m/s
Liete	1	6

#### 6.4 Kaasuyhtälöt ja virtausten ohjearvot

Virtauskaavioissa kaasut esitetään tyypillisesti normaalikuutiolina, eli tilavuutena, joka kaasulla on, kun lämpötila on 0°C ja paine 101,325 kPa(a). Virtausnopeuslaskentaa varten on muunnettava kaasun tilavuus prosessiolosuhteita vastaavaksi. Laskuriin valitussa yhtälössä 2 on yhdistetty kaasujen jatkuvuusyhtälö virtausnopeusyhtälöön 1.

$$v = \frac{4 \cdot V_1 \cdot p_1 \cdot T_2}{\pi \cdot \left(\frac{D}{1000}\right)^2 \cdot p_2 \cdot T_1 \cdot 3600} \quad (2)$$

jossa	$v$	on virtausnopeus, $m/s$
	$V$	on tilavuusvirtaus, $m^3/s$
	$p$	on paine, $Pa$
	$T$	on lämpötila, $K$
	$D$	on putken sisähalkaisija, $mm$

#### 6.4.1 Ilmat, ohjearvot

Laitoksessa ja prosesseissa tarvitaan erilaista ilmaa eri käyttötarkoituksiin. Taulukossa 6 on esitetty ohjearvot tyypillisimmille ilmoille.

Taulukko 6. Ilman suositusvirtausnopeuksiin vaikuttaa sekä käyttötarkoitus että instrumentti-ilman kohdalla myös putkikoko [9].

Virtaava aine	Putken nimellishalkaisija	Virtausnopeus
Työilma	DN 25-200	10-15 m/s
Instrumentti-ilma	DN 10-25	5-10 m/s
Instrumentti-ilma	DN 25-200	10-15 m/s
Kuljetusilma	DN 25-200	15-30 m/s

#### 6.4.2 Happi, laskenta ja ohjearvot

Paine vaikuttaa erittäin paljon hapen maksimivirtausnopeuteen, kuten taulukosta 7 nähdään.

Taulukko 7. Suurimmat sallitut hapen virtausnopeudet teollisuudessa yleisesti käytetyn EIGA-happistandardin mukaan [60].

Paine, bar(a)?	Maksimivirtausnopeus, hiukkaset törmäävät
3-15	30 m/s
15-100	(450 bar*m/s)/p design, bar
100-200	4,5 m/s

#### 6.4.3 Typpi ja muut palamattomat kaasut, ohjearvot

Palamattomien kaasujen virtausnopeudet PSK 2401:n mukaan ovat 15-25 m/s [9].

#### 6.4.4 Palavat kaasut, ohjearvot

Tässä työssä tarkoitetaan palavilla kaasuilla paineen avulla nesteytettyjä palavia kaasuja, joiden suositusvirtausnopeudet ovat 10-15 m/s [9; 57; 61; 62].

#### 6.4.5 Hönkäkaasut, ohjearvot

Hönkäkaasuille ei löytynyt omia ohjearvoja, joten niille käytetään tässä työssä tavallisia palavien ja palamattomien kaasujen ohjearvoja. Erikseen huomautetaan maltillisen virtausnopeuden suosimisesta painehäviöiden minimoimiseksi.

Taulukko 8. Hönkäkaasujen virtausnopeuden raja-arvot [9].

Virtaava aine	Miniminopeus m/s	Maksiminopeus m/s
Hönkäkaasu, palava	10	20
Hönkäkaasu, palamaton	15	25

#### 6.5 Höyry-yhtälöt ja virtausten ohjearvot

Höyryn virtausnopeus lasketaan yhtälöllä 3:

$$v = \frac{m_s \cdot V}{3600 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (3)$$

jossa

$v$	on virtausnopeus, $m/s$
$V$	on höyryn ominaistilavuus, $m^3/kg$
$m_s$	on höyryn massavirta, $kg/h$
$D$	on putken sisähalkaisija, $m$

Koska höyryn ohjevirtausnopeustaulukosta puuttuvat arvot 1600 kPa:n ja 4000 kPa:n välillä, tälle painealueelle päätettiin käyttää samoja arvoja kuin kylläiselle välipaine-höyrylle (taulukko 9).

Taulukko 9. Höyryjen ohjevirtausnopeudet putkikoon mukaan [9].

Kylläinen		Kylläinen		Tulistettu	
matalapaine ( $p < 500$ kPa)		välipaine ( $p$ 500-1600 kPa)		Korkeapaine ( $p > 4000$ kPa)	
DN	v (m/s)	DN	v (m/s)	DN	v (m/s)
25	15	25	15	25	15
40	20	40	20	40	20
50	22	50	22	50	22
65	25	65	25	65	25
80	28	80	28	80	28
100	30	100	30	100	30
125	30	125	30	125	30
150	30	150	30	150	30
200	30	200	30	200	35
250	30	250	35	250	35
300	30	300	35	300	40
350	35	350	35	350	40
400	35	400	35	400	45
450	35	450	35	450	50
500	35	500	35	500	50
600	35	600	35	600	
700	35	700	40	700	
800	35	800	40	800	

## 6.6 Paisuntahöyrystyvät lauhteet, yhtälöt ja virtausten ohjearvot

Paisuntahöyrystyville lauhteille määritetään lauhteesta höyrystyvän osuuden prosenttiosuus yhtälön 4 avulla. Suunnittelun tässä vaiheessa tähän laskentaan tarvittavat tiedot ovat vielä jäsentymättömiä, joten käytettiin jo toteutuneiden projektien arvoja, joiden avulla laskettiin tyypilliseksi höyrystyvän osion prosenttiosuudeksi hiukan alle 9% kun paine-ero on noin 350-400 kPa. Tämän perusteella päädyttiin pyöristämään prosenttiosuudeksi 10%, jotta saadaan hiukan toleranssia paine-eroon.

$$Flash\% = \frac{h_{f1} - h_{f2}}{h_{fg2}} \quad (4)$$

jossa	<i>Flash%</i>	höyrystyvän lauhteen prosenttiosuus lauhteesta
	$h_{f1}$	kylläisen veden ominaisentalpia sisääntulossa $kJ/kg$
	$h_{f2}$	kylläisen veden ominaisentalpia ulostulossa $kJ/kg$
	$h_{fg2}$	kylläiseen höyryyn sitoutunut lämpö ulostulossa $kJ/kg$

Kun prosenttiosuus oli määritelty, yhtälöä 4 ei enää tarvittu aktiiviseen laskentaan ja voitiin siirtyä yhtälöön 5, joka on siis laskurissa käytetty, aktiivinen yhtälö, jonka avulla lasketaan höyryn virtausnopeus.

$$v = \frac{(V_c * \rho_c * 10\%) * V_s}{3600 * \pi * (\frac{D}{2})^2} \quad (3)$$

<i>missä</i>	$v$	on virtausnopeus, $m/s$
	$V_c$	on lauhteen tilavuusvirta, $m^3/h$
	$\rho_c$	on lauhteen tiheys, $kg/m^3$
	$V_s$	on höyryn ominaistilavuus, $m^3/kg$
	$D$	on putken sisähalkaisija, $m$

Paisuntahöyrystyvien lauhteiden höyryn suositusvirtausnopeus on 15 m/s [70; 73].

## 6.7 Käytetyt toiminteet Excelissä

MS Excelissä on primitiivisiä tietokantaominaisuuksia ja sen omat funktiot tukevatkin riittävästi yksinkertaisia ja jopa vaatimattomia toistuviakin hakuja. Kuitenkin jos tarvitaan useampia, toisilleen alisteisia hakuparametreja Excelin funktiot ja if-lauseet uhkaavat verryä hallitsemattoman pituisiksi, jolloin ne ovat myös erittäin haavoittuvia esimerkiksi solun sisällön siirtymiselle tai vahingoittumiselle. Tällainen tapahtuma saattaa halvaannuttaa koko toiminteen, ja virheen etsiminen on varsin työlästä. Myös myöhemmin mahdollisesti tarvittavien muutosten tekeminen on työlästä ja ylläpidettävyyks näin varsin huono. Valitettavasti myös Excelin käyttäjää helpottamaan tarkoitettut sisäänkoodatut toiminteet aiheuttavat usein häiriötilanteita, joita on mahdoton ennakoida ja erittäin vaikea selvittää

ja ratkaista. Ohjelma saattaa esimerkiksi luoda käyttäjää informoimatta luupin, joka aiheuttaa pahimmillaan kaiken toiminnallisuuden tuhoutumisen.

Laskuri päätettiin toteuttaa Visual Basic -ohjelmointikielellä siten, että toiminnot kirjataan suoraan koodiin ja pyritään välttämään Excelin omia funktioita ja makroja lukuun ottamatta joitakin näppäinmakroja ja ActiveX -pudotusvalikkoelementtejä. Tällä ajateltiin saavutettavan parempi ylläpidettävyys ja vakaampi sekä kevyempi laskuri. Kommentolausekkeiden pituuden kasvaessa (tai koodirivien määrän kasvaessa) virhealttius kasvaa, minkä lisäksi selkeästä ja tiivistä koodista on helpompi löytää mahdolliset virheet. Laskurin ylläpito on myös helppoa, kun lähes kaikki toiminnot on kirjattu yhteen ja samaan paikkaan, yhdeksi kokonaisuudeksi, jonka muokkaaminen on helppoa Visual Basic -editorissa.

```
Sub doFlows(row, pipeClass, pipeDN, innerD)
    Top = getp(curTopNameCell)
    Subi = getp(curSubNameCell)

    ' input values from workrow
    designFlow = ActiveSheet.Range(ActiveSheet.Cells(row, 8).Address).Value
    designP = ActiveSheet.Range(ActiveSheet.Cells(row, 9).Address).Value
    designT = ActiveSheet.Range(ActiveSheet.Cells(row, 10).Address).Value

    ' need to know if kelvins are good, cannot assume "" => 275.5K
    If designT = "" Then
        designTK = -1
    Else
        designTK = 273.15 + designT
    End If
    realV_err = ""
    designP_err = ""
    maxV_err = ""
    optimalV_err = ""
    'Debug.Print "doFlows", Top, Subi, row, pipeDN, pipeClass, innerD, design-
Flow, designP

    realV = "?"
    optimalV = "?"
    minV = "?"
    maxV = "?"
    If designFlow > 0 And innerD > 0 Then
        If Top = "Gas" Then
            p1 = 101325
            p2 = 1000 * designP
            t1 = 273.15
            t2 = designTK
            If p2 > 0 And t2 > 0 Then
                realV = (4 * designFlow * p1 * t2) / (3.14 * (innerD / 1000) *
(innerD / 1000) * p2 * t1 * 3600)
            Else
                If Not p2 > 0 Then
                    realV_err = "NEED DP"
                ElseIf Not t2 > 0 Then
```

```

        realV_err = "NEED DP"
    End If
End If
Else
    realV = (designFlow / 3600 * 4) / (3.14 * innerD / 1000 * innerD /
1000)
End If
Else
    If Not designFlow > 0 Then
        realV_err = "NEED DF"
    ElseIf Not innerD > 0 Then
        realV_err = "NEED ID"
    End If
End If

```

Esimerkkikoodi 1. Visual Basic -funktion doFlows- fragmetti: Funktio määrittää asiaankuuluvan yhtälön ja sen avulla mitoitusarvot syötettyjen parametrien avulla. Fragmentissa on osuus, jossa käsitellään ensisijaiseksi virtaavaksi aineeksi kaasu (Top), jonka tilavuusvirta on annettu normaalikuutiometreinä.

Visual Basicin avulla saatiin luotua selkeä ja yksinkertainen käyttöliittymä, jonka esiohjelmoitujen ja käyttäjän syöttämien parametrien avulla saadaan laskettua todelliset virtausnopeudet siten, että käyttäjä voi vapaasti iteroida sopivan nimellishalkaisijan ja halutessaan päättää virtausnopeuden suosituksista välittämättä. Tämän jälkeen käyttäjä voi tulostaa rivin linjaluetteloon laskurin alle. Linjaluettelon rivit on mahdollista palauttaa muokattaviksi tarvittaessa, eikä niiden lukumäärää ole rajoitettu.

## 7 Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli luoda putkimitoitus työkalu PI-kaavioiden suunnittelun alkuvaiheeseen. Työn valmistuttua huomattiin, että laskurille on tarvetta myös myöhemmässä suunnitteluvaiheessa, koska kaikissa putkilinjoissa ei luonnollisestikaan ole pumppuja. Esimerkiksi painovoimaisten linjojen sekä kaasulinjojen mitoitus ei onnistu pumppulasennan työkalulla.

Yrityksen aikaisemmin teettämien insinööri- ja diplomitöiden perusteella työn todettiin täyttävän annetut vaatimustasot sisältönsä ja haastavuutensa osalta, jotka lisäksi kasvoivat työn edetessä. Alkuarvio perustui yhden yksinkertaisen yhtälön käyttöön ja täysin uudenlaisen laskentatyökalun luomiseen, jollaista yrityksellä ei ollut valmiiksi käytössään. Myöhemmin tämä johti lisätyötunteihin ja ulkopuolisen konsultin hyödyntämiseen, joita vaadittiin erityisesti laajassa ja haastavassa ohjelmointityössä. Konsultin ohjeilla saatiin työkalun toiminnallisuutta parannettua sekä säästettiin aikaan

ongelmatilanteissa. Paras tulos olisi saavutettu esimerkiksi prosessitekniikan ja ohjelmointitaitoisen tietotekniikan opiskelijan yhteistyöhankkeella. Näin olisi paikattu puutteet laajempien ohjelmointiopintojen puuttumisesta kemiantekniikan pääainekokonaisuudessa.

Vastaava työkalu on kehitteillä ainakin yhdessä saksalaisessa yrityksessä, jonka edustajan kanssa toimeksiantajan edustaja keskusteli asiasta. Yleinen konsensus tuntui olevan, että tällaiselle on suuri tarve, koska useissa yrityksissä mitoitukselta vastaavat henkilöt tekevät mitoituksen oman kokemuksensa perusteella. Monissa suunnittelutoimistoissa on havahduttu siihen, että virtausnopeuteen perustuvan putkihalkaisijan määrittelyn käytänteitä on harmonisoitava suunnittelun laadun parantamiseksi. Nyt aikaansaatu työkalu vastaa nimettyyn tarpeeseen, vaikka jo ennen työn valmistumista havaittiin runsaasti kehityskohteita. Esimerkiksi slurryjen laskentaan laskuri on aivan liian yksinkertainen. Teoreettinen ja karkea alkumitoitus toki onnistuu, mutta todellisuudessa slurryjen ominaisuuksien vaihtelun vuoksi näin yksinkertaistettu kaava ei tuota riittävää tarkkuutta edes alkuvaiheen mitoitukseen. Toisaalta laskurin kehittäminen pidemmälle olisi vaatinut jo ehkä oman laskurinsa kullekin fluidikategorialle jo pelkästään tarvittavan datan ja monimutkaistuvien yhtälöiden vuoksi.

Tämän laskurin vahvuutena on sen helppo muokattavuus ja ylläpidettävyys, mutta heikkoutena puolestaan se, että se on tehty runsaasti ylläpitoa vaativalle pohjalle eli Excelille. Usein tämän kaltaiset työkalut rappeutuvat melko nopeasti, mikäli työkalun luonut henkilö vaihtaa työpaikkaa tai työtehtävää siten, ettei hän enää ehdi ylläpitää masteria.

Laskuri kuitenkin onnistui erinomaisesti ja sitä on helppo muokata ja ylläpitää, mikäli jatkossa huomataan muutostarpeita. Laskuria muokattiinkin jo melko paljon koekäyttäjien kommenttien perusteella. Käyttöönoton jälkeen huomattiin joitakin puutteita, jotka on myös korjattu, esimerkkeinä toivottiin laskurista kertaalleen tulostetun putkiluettelon palauttamista laskuriin, päivämääräkenttää sekä suurempaa vapaan kommentoinnin kenttää.



## Lähteet

- 1 Virtanen, Tiia. 2019. Chief Engineer, Piping and Generic Process Design, Outotec (Finland) Oy, Espoo. Keskustelu 14.11.2019.
- 2 Jaatinen, Taisto. 18.3.2019. PSK Yleistä putkistosuunnittelu (osana putkisto- ja laitosuunnittelukurssia). Luentomateriaali. JETS Consulting Oy, PSK Standardisointiyhdistys ry, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 3 Nayyar, Mohinder L. 2000. Piping Handbook. 7<sup>th</sup> ed. E-kirja. New York: McGraw-Hill.
- 4 Nykänen, Panu. 2016. 150 Years' Evolution Toward a Greener Future: The Outotec Story. E-kirja. Nykänen, Panu & Outotec Oyj
- 5 Outotec Corporate Brochure. 2018. Verkkoaineisto. Outotec Oyj. <[http://www.outotec.com/globalassets/company/about-outotec/ote\\_corporate\\_brochure\\_en\\_2018\\_web.pdf](http://www.outotec.com/globalassets/company/about-outotec/ote_corporate_brochure_en_2018_web.pdf)>. Luettu 14.11.2019.
- 6 PSK 3603. PI-kaavion esitystapa ja merkitsemisohje. 2012. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 7 Outotec (Finland) Oy. 2019. General Process Engineering Guideline. Sisäinen dokumentti.
- 8 Hakaste-Härmä, Merja. 2019. Head of Process and Piping, Outotec (Finland) Oy, Espoo. Keskustelut 5.11.2019 – 7.2.2020.
- 9 PSK 2401. Putkiston virtausnopeudet. 2009. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 10 Outotec (Finland) Oy. 2019. General Piping Index. Sisäinen dokumentti.
- 11 Relationship Between Pressure Drop and Flow Rate in a Pipeline. Verkkoaineisto. Engineered Software Knowledge Base. <<http://kb.eng-software.com/eskb/ask-an-engineer/theory-equations-and-calculated-results-questions/relationship-between-pressure-drop-and-flow-rate-in-a-pipeline>>. Luettu 20.11.2019.
- 12 Ellenberg, Phillip. 2010. Piping and pipeline calculations manual for construction, design fabrication, and examination. E-kirja. Elsevier Inc.

- 13 Seuranen, Timo. 2017. Virtaustekniikka prosessiteollisuudessa. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 14 Process Piping Fundamentals, Codes and Standards. Verkkoaineisto. Continuing Education & Development, Inc. <<https://www.cedengineering.com/userfiles/Process%20Piping%20%20Materials%20-%20Module%202.pdf>>. Luettu 25.11.2019.
- 15 Pratikno, Herman. 2015. Aging Treatment to Increase the Erosion-Corrosion Resistance of AA6063 Alloys for Marine Application Verkkoaineisto. <[https://www.researchgate.net/figure/Mechanism-of-erosion-corrosion-of-metal-6\\_fig1\\_282831644](https://www.researchgate.net/figure/Mechanism-of-erosion-corrosion-of-metal-6_fig1_282831644)>. Luettu 13.12.2019.
- 16 Piping Considerations – Maximum Fluid Velocity. Verkkoaineisto. Emerson Swan. <<https://www.emersonswan.com/ckfinder/userfiles/files/PIPING%20CONSIDERATIONS.pdf>>. Luettu 25.11.2019.
- 17 Kolmetz Handbook of Process Equipment Design. Piping Hydraulics Fluid Flow Line Sizing and Material Selection. Verkkoaineisto. KLM Technology Group. <[http://www.kolmetz.com/pdf/EGD2/ENGINEERING\\_DESIGN\\_GUIDE-LINES\\_fluid\\_flow\\_hydraulics\\_sizing\\_and\\_selection\\_rev\\_web.pdf](http://www.kolmetz.com/pdf/EGD2/ENGINEERING_DESIGN_GUIDE-LINES_fluid_flow_hydraulics_sizing_and_selection_rev_web.pdf)>. Luettu 25.11.2019.
- 18 PSK 4201. Putkiluokat, määrittely. 2013. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 19 SFS-EN ISO 6708. Pipework components. Definition and selection of DN (nominal size). 1996. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS. Metalliteollisuuden Standardoimiskeskus.
- 20 Joronen, Olli-Pekka. 9.3.2019.PSK&Metropolia\_Putkiluokat (osana putkisto- ja laitossuunnittelukurssia). Luentomateriaali. Sweco Industry Oy, PSK Standardisointiyhdistys ry, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 21 Jaatinen, Taisto. 12.3.2019.PSK Putkisto 2019(osana putkisto- ja laitossuunnittelukurssia). Luentomateriaali. JETS consulting Oy, PSK Standardisointiyhdistys ry, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 22 Suomen Standardoimiliiton verkkosivut. Verkkoaineisto. Suomen Standardoimiliitto SFS. <[https://www.sfs.fi/julkaisut\\_ja\\_palvelut/standardi\\_tutuksi.](https://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi.)> Luettu 19.11.2019.
- 23 Sisäinen dokumentti. Outotec (Finland) Oy.

- 24 Process Design. Verkkoaineisto. Norsok Standard. < <https://www.standard.no/pagefiles/1130/p-001r3.pdf>>. Luettu 27.11.2019.
- 25 Zumdahl, Stephen S.. 1998. Chemical Principles. 3<sup>rd</sup> edition. Boston: Houghton Mifflin Company.
- 26 Darling, Peter. 2011. Mining: Ancient, Modern and Beyond. Teoksessa Darling, Peter (ed.). SME Mining Engineering Handbook. E-kirja. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- 27 Bonar, John A.. 2002. Fuel Ash Corrosion. Teoksessa Branan, Carl (ed.). Rules of Thumb for Chemical Engineers. 3<sup>rd</sup> Edition. E-kirja. Gulf Professional Publishing an Imprint of Elsevier Science.
- 28 Design Standard DS 72-01. Lime Storage Mixing & Dosing System -Basis of Design. 2012. Acquisition Group. Infrastructure Design Branch. E-kirja. Water Corporation Australia.
- 29 Sulphuric Acid on the Web. Knowledge for the Sulphuric Acid Industry. Verkkoaineisto. DKI. Engineering, Inc. <[http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Strong%20Acid/sa\\_piping.htm](http://www.sulphuric-acid.com/techmanual/Strong%20Acid/sa_piping.htm)> Luettu 7.1.2020.
- 30 Vuortenväli, Hanna. Chief Engineer, Generic Process Design, Outotec (Finland) Oy, Espoo. Keskustelut joulukuussa 2019.
- 31 Holmström, Hannu. Contractor, Alten Oy and Outotec (Finland) Oy, Espoo. Keskustelut joulukuussa 2019
- 32 Introduction to mining. E-kirja. Ciência Viva.
- 33 OVA-Ohje: Lentopetroli. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/lentopetroli.html>> Luettu 7.1.2020.
- 34 Käyttöturvallisuustiedote Polttoöljy. Verkkoaineisto. Neste Oyj. <[https://www.neste.fi/static/ktt/13865\\_fin.pdf](https://www.neste.fi/static/ktt/13865_fin.pdf)> Luettu 7.1.2020.
- 35 Guide to Kerosene. Verkkoaineisto. Crown Oil Ltd.. <<https://www.crown-oil.co.uk/guides/kerosene-guide/>> Luettu 7.1.2020.
- 36 The Engineering Toolbox. Oil Pipes – Recommended Flow Velocities. Verkkoaineisto. <[https://www.engineeringtoolbox.com/flow-velocity-steam-pipes-d\\_387.html](https://www.engineeringtoolbox.com/flow-velocity-steam-pipes-d_387.html)> Luettu 7.1.2020.

- 37 PetroWiki. Pipeline design consideration and standards. Verkkoaineisto. Society of Petroleum Engineers. <[https://petrowiki.org/Pipeline\\_design\\_consideration\\_and\\_standards#Velocity\\_considerations](https://petrowiki.org/Pipeline_design_consideration_and_standards#Velocity_considerations)> Luettu 7.1.2020.
- 38 Balsubramanian, A.. 2017. Overview of Mineral Processing Methods. Verkkoaineisto. University of Mysore. <[https://www.researchgate.net/publication/315117847\\_Overview\\_of\\_Mineral\\_Processing\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/315117847_Overview_of_Mineral_Processing_Methods)> Luettu 2.12.2019.
- 39 Saarinen, Saska. Master Thesis Worker, Contractor, Academic Work Oy and Outotec (Finland) Oy, Espoo. Keskustelut joulukuussa 2019.
- 40 Basics in Minerals Processing. 2018. E-kirja. Metso Corporation.
- 41 Metso® Slurry Handling Solutions, Slurry Hose System. Design Manual. 2013. E-kirja. Metso® Minerals (Sweden) AB.
- 42 Apostolidis, C. I. & Distin, P. A.. 1978. The kinetics of the sulphuric acid leaching of nickel and magnesium from reduction roasted serpentine. Hydrometallurgy. Vol 3, Issue 2, s. 181-196.
- 43 Speller, F. N. & Texter, C. R.. 1924. Effect of Alkaline Solutions on the Corrosion of Steel Immersed in Water. Industrial & Engineering Chemistry, ACS Publications. Vol 16, Issue 4, s. 332–440.
- 44 Seuranen, Timo. 2017. Kokoonpuristuvat virtaukset ja venttiilityypit. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 45 Engineering Design Guidelines. 2013. Piping Fluid Flow Material Selection and Line Sizing. Rev: 04. E-kirja. KLM Technology Group.
- 46 PetroWiki. Pipeline design consideration and standards. Verkkoaineisto. Society of Petroleum Engineers. <[https://petrowiki.org/Pipeline\\_design\\_consideration\\_and\\_standards#Gas\\_line\\_sizing](https://petrowiki.org/Pipeline_design_consideration_and_standards#Gas_line_sizing)> Luettu 7.1.2020.
- 47 Kemianteollisuus ry. 2016. Teollisuuskaasujen keskusjakelujärjestelmät. 3. painos. Helsinki: Chemas Oy.
- 48 Ilma, jota hengitämme. Verkkoaineisto. Euroopan ympäristökeskus. <<https://www.eea.europa.eu/fi/ymparisto-signaalit/signaalit-2013/artikkelit/ilma-jota-hengitamme#tab-aiheeseen-liittyy%C3%A4t-julkaisut>> Luettu 7.1.2020.
- 49 Compressed air pipe sizing calculation. Verkkoaineisto. The Workshop Compressor. <<http://theworkshopcompressor.com/learn/compressed-air-systems/compressed-air-piping/compressed-air-pipe-sizing-calculation/>> Luettu 7.1.2020.

- 50 Best Practice Manual. 2006. Fluid Piping Systems. E-kirja. Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd.
- 51 Ruukki, Joonas. 2012. Teollisuus- ja laboratoriokaasuverkon suunnittelu. Opinnäytetyö. Mikkelin Ammattikorkeakoulu, Talotekniikka. Theseus -tietokanta.
- 52 The Engineering Toolbox. Compressed Air Pipe Lines. Verkkoaineisto. <[https://www.engineeringtoolbox.com/air-flow-compressed-air-pipe-line-d\\_1280.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-flow-compressed-air-pipe-line-d_1280.html)> Luettu 7.1.2020.
- 53 Tukes -opas. 2003. Hapen turvallinen käsittely ja varastointi. E-kirja. Turvatekniikan keskus.
- 54 Sammi, T., Rapp, C. & Salo, J..Onnettomuustutkintaraportti. 2005. Happipullon räjähdysmäinen palo Messer Suomi Oy:n täyttölaitoksella Tuusulassa. Verkkoaineisto. Turvatekniikan keskus. <[https://tukes.fi/documents/5470659/9181216/Tuusula\\_messerhappipullo101105.pdf/e33440d3-54c3-43e5-a708-ae223c49b702/Tuusula\\_messerhappipullo101105.pdf](https://tukes.fi/documents/5470659/9181216/Tuusula_messerhappipullo101105.pdf/e33440d3-54c3-43e5-a708-ae223c49b702/Tuusula_messerhappipullo101105.pdf)> Luettu 7.1.2020.
- 55 ThoughtCo. What Is the Density of Air? Verkkoaineisto. <<https://www.thoughtco.com/density-of-air-at-stp-607546>> Luettu 7.1.2020.
- 56 Honkanen, Jyrki. 2012. Vanhassa vara parempi, vai onko polttoleikkauksesta enää mihinkään? Hitaustekniikka 1/2012, s. 10 – 13.
- 57 Agan nestekaasu. Verkkoaineisto. <[https://www.aga.fi/fi/images/AGAn%20nestekaasu\\_tcm634-153756.pdf](https://www.aga.fi/fi/images/AGAn%20nestekaasu_tcm634-153756.pdf)> Oy Aga Ab. Luettu 8.1.2020.
- 58 Mälkönen, Paavo. 2016. Prosessiunien toiminnan seuraaminen mallintamalla. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu, Kemian tekniikan koulutusohjelma. Aaltodoc -tietokanta.
- 59 Lautkaski, Risto. 2003. Happiputkistojen syttymissytyt. Tutkimusselostus. VTT Prosessit, Päästöjen hallinta. Verkkodokumentti. <[https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2003/b52003y\\_tutkintaselostus\\_1/b52003y\\_tutkintaselostus\\_1.pdf](https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/muutonnettomuudet/2003/b52003y_tutkintaselostus_1/b52003y_tutkintaselostus_1.pdf)> Onnettomuustutkintakeskus. Luettu 8.1.2020.
- 60 EIGA Oxygen Pipeline and Piping Systems. 2012. IGC Doc 13/12/E. E-kirja. European Industrial Gases Association AISBL.
- 61 Nestekaasutietoa. Verkkoaineisto. <[https://www.aga.fi/fi/products\\_ren/propane/propane\\_facts/index.html](https://www.aga.fi/fi/products_ren/propane/propane_facts/index.html)> Oy Aga Ab. Luettu 8.1.2020.

- 62 SFS 5987. Nestekaasun käyttölaitos. Suunnittelu, asennus, kunnossapito ja tarkastus. 2016. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, Öljy- ja biopolttoaineala ry.
- 63 Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Terrafame Oy, Kaivostoiminnan jatkaminen ja kehittäminen tai vaihtoehtoinen sulkeminen. 2017. Verkkodokumentti. <[https://www.terrafame.fi/media/mediapankki/kaivostoimintaa-koskeva-yva/yva-selostus/aa-terrafame\\_tuotanto\\_yva\\_selostus\\_180817\\_web.pdf](https://www.terrafame.fi/media/mediapankki/kaivostoimintaa-koskeva-yva/yva-selostus/aa-terrafame_tuotanto_yva_selostus_180817_web.pdf)> Terrafame Oy/ Pöyry Finland Oy.
- 64 Tukes -opas. Kemikaaliputkistojen turvallisuusvaatimukset. 2017. Verkkodokumentti. <[https://tukes.fi/documents/5470659/6372605/Kemikaaliputkistojen\\_turvallisuusvaatimukset.pdf/b2bc9865-b89c-4231-9a36-38c90f60814c/Kemikaaliputkistojen\\_turvallisuusvaatimukset.pdf](https://tukes.fi/documents/5470659/6372605/Kemikaaliputkistojen_turvallisuusvaatimukset.pdf/b2bc9865-b89c-4231-9a36-38c90f60814c/Kemikaaliputkistojen_turvallisuusvaatimukset.pdf)> Turvallisuus- ja kemikaalivirasto.
- 65 PSK 3601. Prosessiteollisuuden virtauskaavioiden piirrosmerkit. 2007. 2. painos. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 66 Eri projektien PI- ja virtauskaaviot. Sisäisiä dokumentteja. Helsinki: Outotec (Finland) Oy.
- 67 Condensate Recovery Piping. Verkkoaineisto. <<https://www.tlv.com/global/ME/steam-theory/condensate-recovery-piping.html>> TLV A Steam Specialist Company. Luettu 9.1.2020.
- 68 Flash Steam. Verkkoaineisto. <[https://www.tlv.com/global/ME/steam-theory/flash-steam.html#toc\\_3](https://www.tlv.com/global/ME/steam-theory/flash-steam.html#toc_3)> TLV A Steam Specialist Company. Luettu 9.1.2020.
- 69 Lauhteenpoisto. Verkkoaineisto. <<https://www.konwell.fi/fi/tuotteet/hoyry-ja-lauhde/teollisuusventtiilit/lauhteenpoisto>> Oy Konwell Ab. Luettu 9.1.2020.
- 70 Blom, Jussi. 2019. Aluepäällikkö Länsi-Suomi, Oy Konwell Ab, Helsinki. Konwell Höyry ja Lauhdekoulutus LABRA® materiaali. Sähköpostikeskustelun liitteenä 22.11.2019.
- 71 Akhtar, Zeb. 2017. Design Rules for Steam Condensate Systems. Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology, School of Energy Systems, Energy Technology. Lutpub -tietokanta.
- 72 Condensate Removal. Verkkoaineisto. <<https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/condensate-removal/example-selecting-the-trap>> Spirax Sarco Limited. Luettu 9.1.2020.

- 73 Steam Theory, Flash Steam. Verkkoaineisto. <[https://www.tlv.com/global/ME/steam-theory/flash-steam.html#toc\\_3](https://www.tlv.com/global/ME/steam-theory/flash-steam.html#toc_3)> TLV A Steam Specialist Company. Luettu 16.1.2020.
- 74 Amount of flash steam, DN behind trap. Verkkoaineisto. <<https://www.gestra.com/service-support/calcuquick-calculate-parameters.html?calc=7>> Gestra. Engineering steam performance. Luettu 16.1.2020.
- 75 Industry Design & Installation. 2019. E-kirja. Georg Fischer Piping Systems and Georg Fischer Ltd.
- 76 Design Standard DS 72-01. Lime Storage Mixing & Dosing System – Basis of Design. Verkkoaineisto. <<https://www.watercorporation.com.au/-/media/files/suppliers/resources/design-standards/ds72-01-lime-storage-mixing-and-dosing-system-basis-of-design.pdf>> Water Corporation. Luettu 14.1.2020.
- 77 Sisäinen dokumentti. Outotec (Finland) Oy.
- 78 Crane Technical Paper 410. Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe. 1985. New York: The Crane Company.
- 79 Technical Paper TP 89-63. 1989. Boston: Stone and Webster Engineering Corporation.

## Veden virtausnopeuden arvoja eri lähteistä

Taulukko 1. Veden suositussuunnitteluvirtausnopeudet putkistossa [78, s. 3-6].

Veden käyttötarkoitus	Suositusnopeus, ft/s	Suositusnopeus, m/s
Kattilan syöttövesi	8–15	2,5–4,6
Pumpun imu- ja tyhjennyslinjat	4–7	1,2–2,1
Käyttövesi	4–10	1,2–3,0
Vesijohtovesi	max. 7	max. 2,1

Taulukko 2. Tyypillisiä veden virtausnopeuksia [79].

Veden käyttötarkoitus	Suositusnopeus, ft/s	Suositusnopeus, m/s
Lauhdepumppu, paine	10	3
Paineenkorotuspumppu, paine	10	3
Syöttöpumppu, paine	20–25	6–7,5
Kiertovesijärjestelmä	≤9	≤3
Käyttövesi	5–10	1,5–3

Taulukko 3. Vedenjakelujärjestelmän suositeltuja virtausnopeuksia [50].

Putken nimellishalkaisija, DN	Putken nimellishalkaisija, NPS	Suositusnopeus, m/s
25	1"	1
50	2"	1,1
75	3"	1,15
100	4"	1,25
150	6"	1,5
200	8"	1,75
250	10"	2
300	12"	2,65



Taulukko 4. Veden suositus- ja maksimivirtausnopeudet PSK 2401 mukaan [9]

Putken nimellishalkaisija DN	Suositusvirtausnopeus v (m/s)	Maksimivirtausnopeus v <sub>max</sub> (m/s)	Putken nimellishalkaisija NPS
10	0,8	2,0	3/8"
15	0,8	2,0	1/2"
25	0,8	2,0	1"
32	1,0	2,0	1 1/4"
40	1,2	2,0	1 1/2"
50	1,4	2,5	2"
65	1,5	2,5	2 1/2"
80	1,6	2,5	3"
100	1,7	3,0	4"
125	2,0	3,0	5"
150	2,5	3,5	6"
200	2,8	4,0	8"
250	3,2	4,0	10"
300	3,4	4,0	12"
350	3,6	4,5	14"
400	3,8	4,5	16"
450	4,0	4,5	18"
500	4,2	5,0	20"
600	4,5	5,0	24"
700	4,7	5,5	28"
800	5,0	5,5	32"

## Eri kaasuyhtälöiden tulosten vertailu

Tilavuusvirtaus Nm <sup>3</sup> /h	Paine kPa(a)	Temperature C	Muunto m <sup>3</sup> /s; Ideaali- kaasuyhtälo	Virtaus- nopeus m/s	Muunto m <sup>3</sup> /s; Jatkuvuus- yhtälo	Virtaus- nopeus m/s	Kemian- teollisuuden yhtälo m/s	Jatkuvuus- yhtälo + virtausnopeus- yhtälo
863,0000	700,0000	50,0000	0,0411	0,5809	0,0411	0,5808	0,4877	0,5808
3,0000	100,0000	150,0000	0,0013	0,0185	0,0013	0,0185	0,0119	0,0185
10,0000	600,0000	560,0000	0,0014	0,0202	0,0014	0,0202	0,0066	0,0202
29,0000	400,0000	20,0000	0,0022	0,0310	0,0022	0,0310	0,0287	0,0310
1562,0000	200,0000	5,0000	0,2239	3,1673	0,2238	3,1667	3,0893	3,1667
3842,0000	1000,0000	2,0000	0,1089	1,5413	0,1089	1,5410	1,5197	1,5410
0,5000	1500,0000	60,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0002	0,0001	0,0002
100,0000	2200,0000	75,0000	0,0016	0,0231	0,0016	0,0231	0,0180	0,0231
500,0000	25,0000	30,0000	0,6249	8,8399	0,6247	8,8383	7,9111	8,8383
564,0000	700,0000	45,0000	0,0264	0,3737	0,0264	0,3737	0,3187	0,3737