



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Stefania Aspholm-Tsironi

Kaasulinjan painehäviön laskentamalli

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

18.5.2019

Tekijä Otsikko	Stefania Aspholm-Tsironi Kaasulinjan painehäviön laskentamalli
Sivumäärä Aika	33 sivua + 6 liitettä 18.5.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	kemiantekniikka
Ohjaajat	lehtori Timo Seuranen osastopäällikkö (Putkisto- ja yleisprosessisuunnittelu) Merja Hakaste-Härmä
<p>Insinööriyön toimeksiantajana toimi Outotec (Finland) Oy. Tavoitteena oli kehittää kaasulinjan painehäviön laskentamalli. Mallin avulla käyttäjä voi likimääräisesti laskea painehäviötä erilaisille kaasuille linjastossa, sillä niiden määrittäminen on tärkeää prosessin toimivuuden kannalta. Työkaluksi valittiin Excel, koska sen avulla on mahdollista kehittää helpokäyttöisiä laskentamalleja hyödyntäen funktioita ja makroja. Laskentamallin valmistuttua sen luotettavuutta testattiin muodostamalla esimerkkitalanteita: samat laskelmat suoritettiin ChemCad-simulointiohjelmalla, ja tuloksia verrattiin keskenään.</p> <p>Laskentamallia laadittaessa perehdyttiin funktioiden muodostamiseen automatisoinnin helpottamiseksi. Näin malli saatiin käyttäjäystävällisemmäksi. Koska kyseessä on kaasulinjasto, käytettävät yhtälöt eroavat nestevirran linjastoista, sillä kaasun kokoonpuristuvuus oli otettava huomioon. Mallissa putkisto jaettiin segmentteihin, sillä kaasun ominaisuudet, kuten tiheys, muuttuvat paineen myötä, ja muutoksia täytyy seurata. Laskentamallissa oletettiin, että virtaus on isoterminen, joten monimutkaisia adiabaattisen virtauksen yhtälöitä ei tarvinnut käyttää.</p> <p>Esimerkkitalannetta käytettiin, jotta käyttäjän olisi helpompaa ymmärtää mallin toimivuutta. Esimerkissä muodostettiin suojattu välilehti, jossa laskettiin painehäviötä linjastossa, kun virtaava fluidi oli happi. Tuloksia verrattiin ChemCadista saatuihin tuloksiin, ja ne olivat lähes samat. Tiheyden laskemisessa havaittiin pieni ero, joka johtui mahdollisesti pyöristetystä kokoonpuristuvuuskertoimen arvosta, kun taas simulointiohjelmassa oli käytetty tarkempaa arvoa. Vertailu kuitenkin todisti laskentamallin luotettavuuden.</p> <p>Työn tavoitteet onnistuivat, ja lopputulokseksi saatiin helpokäyttöinen painehäviön laskentamalli. Mallia voi tulevaisuudessa tarvittaessa kehittää lisäämällä makroja tai käyttämällä adiabaattiseen virtaukseen tarkoitettuja yhtälöitä erittäin tarkkojen tulosten saavuttamiseksi.</p>	
Avainsanat	painehäviö, laskentamalli, Excel, funktiot, kokoonpuristuvuus, kaasulinja

Author Title	Stefania Aspholm-Tsironi Excel Spreadsheet for Pressure Drop Calculations
Number of Pages Date	33 pages + 6 appendices 18 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Biotechnology and Chemical Engineering
Professional Major	Chemical Engineering
Instructors	Timo Seuranen, Senior Lecturer Merja Hakaste-Härmä, Head of Piping and Diagrams
<p>The commissioner of this thesis was Outotec (Finland) Oy. The aim of the thesis was to develop a spreadsheet for pressure drop calculations in gas pipelines. The user of this spreadsheet can roughly calculate pressure drops for various gases in the pipeline since their determination is important for processes to function properly. Excel was chosen as a software program as it can be used to create easy-to-use spreadsheets by developing functions and macros. The purpose was to test the reliability of the spreadsheet once it was completed, by creating an example calculation, by performing the same calculations with a ChemCad-simulation software and by comparing the spreadsheet results with the simulation software results.</p> <p>In order to create the spreadsheet, it was necessary to get acquainted with how functions and macros can be created for automation purposes. This way, the workload of the user would reduce significantly, and the sheet would become more clear. Since the calculations would be made for a gas pipeline, the equations differ from the ones used in liquid lines, due to the compressibility of the gas that must be taken into account. On the spreadsheet, the pipe had to be divided into segments, because the properties of gas such as density change with pressure, and they need to be followed. It was also assumed that the flow was isothermal; thus, no complicated equations meant for adiabatic flow had to be used.</p> <p>An example calculation was performed, for the user to understand the functionality of the spreadsheet. In this example a protected sheet was created, assuming the flowing gas was oxygen. The results were compared to the results obtained from ChemCad and were almost identical, with a small difference in the calculation of density, possibly due to the compressibility factor, which was rounded to the nearest one, whereas a more accurate value was used in the simulation program. However, the comparison ensured the reliability of the spreadsheet.</p> <p>The goals of the thesis were achieved, and as a result, an easy-to-use pressure drop spreadsheet was created. This spreadsheet can be modified in the future, by adding macros or by using equations for adiabatic flow, to obtain highly accurate results.</p>	
Keywords	spreadsheet, gas pipeline, functions, Excel, pressure drop, compressibility

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Prosessiteollisuuden kaasulinjastot	2
2.1	Kaasun ominaisuudet	3
2.2	Ideaalikaasu	3
2.3	Reaalikaasu	4
2.4	Tiheys	6
2.5	Viskositeetti	7
3	Kaasulinjastoon liittyvät parametrit	8
3.1	Bernoullin yhtälö	8
3.2	Tilavuusvirta	9
3.3	Virtausnopeus	10
3.4	Reynoldsin luku	11
3.5	Putkivastuskerroin	12
3.6	Putken halkaisija	14
3.7	Kokonaispainehäviö	14
4	Putkiluokat	19
5	Excel-laskentamallin luominen	19
6	Excel-laskentamallin luotettavuuden testaus	26
7	Yhteenveto	28
	Lähteet	30

Liitteet

Liite 1. Taulukko erilaisista venttiileistä ja paikallisvastuskertoimista

Liite 2. Taulukko standardin PSK 4201 mukaisista materiaalitunnuksista

Liite 3. Quick user guide -työarkki

Liite 4. Example calculation for oxygen -työarkki

Liite 5. Calculations -työarkki

Liite 6. Pipe diameters -työarkki

Lyhenne

CNGA California Natural Gas Association. Yhtälö on tarkoitettu puristuvuuskertoimen laskemiseen.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Outotec (Finland) Oy, vuonna 2006 perustettu suomalainen teknologia- ja projektiyhtiö, joka syntyi Outokumpu Oyj:n erottaessa teknologiatoimintansa omaksi yhtiökseen. Yhtiö on suunnittelu- ja asiantuntijayritys, joka myy ja toimittaa laitos- ja kaivosteknologiahankkeita. Suunnitellut prosessit ja teknologiat on tarkoitettu mineraalien ja metallurgian käsittelyyn. Perinteisen malmi- ja metalliteknologian rinnalle on noussut Outotecin ympäristö- ja energialiiketoiminta. Outotecin kehittämien teknologioiden avulla on saatu mm. kaivoksien ja jalostamoiden suuret vesi- ja energiakulutukset vähentymään huomattavasti. [1.]

Kaasulinjaston mitoittaminen voi olla tärkeä osa projektia. Mitoituslaskentamalleissa otetaan huomioon kaikki linjastoon liittyvät parametrit. Mitoituksen avulla on mahdollista täydentää PI-kaavioita, laite- ja muita prosessidokumentteja tarvittavilla tiedoilla sekä selvittää prosessiin liittyvät parametrit, kuten nopeus, painehäviö ja virtauksen tyyppi.

Yleisesti ottaen virtauksen painehäviön laskeminen on tärkeää prosessin toimivuuden kannalta. Putken koko sekä putkiston vastukset määräävät painehäviön suuruuden, joten niihin perustuvat oikeat mitoitukset voivat minimoida painehäviöitä linjastossa. [2.]

Työn tarkoituksena oli kehitellä Outotecille Excel-laskentamalli kaasulinjaston painehäviön laskemista varten. Yhtiöllä on jo olemassa vastaava laskentamalli nestevirtausten painehäviöille. Erona nesteen ja kaasun painehäviön laskennassa on kaasun ominaisuuksien muuttuminen putkistossa paineen muutoksen myötä, minkä takia putki täytyy jakaa segmentteihin ja seurata, miten kaasun ominaisuudet ja siihen liittyvät parametrit muuttuvat. Mallista oli tarkoitus tehdä mahdollisimman käyttöystävällinen, joten Excel-funktioihin perehtyminen oli välttämätön sen automatisoimiseksi. Oli myös tärkeää perehtyä alan kirjallisuuteen, että pystyi huomioimaan kaikki parametrit ja käyttämään asianmukaisia kaavoja. Koska laskelmat oli mahdollista suorittaa monella eri tavalla, kaikki tavat esitettiin yhtiön edustajalle, minkä jälkeen valittiin haluttu laskentavaihtoehto. Laskentamallin luotettavuuden

varmistusta varten luotiin esimerkkitilanne hapen painehäviön määrittämiseen, ja verrattiin tuloksia Chemcad-simulointiohjelmasta saatuihin tuloksiin.

2 Prosessiteollisuuden kaasulinjastot

Prosessiteollisuuden linjastoihin liittyvät mitoitus- ja suunnittelukriteerit ovat tärkeitä prosessien toimivuuden kannalta. Neste- ja kaasulinjastojen mallitukseen voidaan käyttää samantyyppisiä yhtälöitä, mutta kaasujen kokoonpuristuvuus vaikuttaa huomattavasti aineominaisuuksiin. Tiheys, viskositeetti, paine ja puristuvuustekijä ovat tärkeimmät kaasun aineominaisuudet, jotka täytyy ottaa huomioon linjastoa suunniteltaessa ja mitoittaessa. Lisäksi kaasulinjaston yksityiskohtainen mitoitus edellyttää kaasun termodynamiikan tuntemusta. [3, s. 1.] Kuvassa 1 on esitetty vedyn kuljetukseen tarkoitettu kaasulinjasto.



Kuva 1. Kaasulinjasto vedyn kuljetukseen [4].

Kehitetty Excel-laskentamalli on tarkoitettu lähinnä prosessiputkien painehäviöiden laskemiseen yleisimmille käytössä oleville kaasuille. Tällaisia kaasuja ovat mm. happi, typpi, ilma, vety, argon, hiilidioksidi ja helium.

2.1 Kaasun ominaisuudet

Kaasun ominaisuudet, kuten puristuvuuskerroin, tiheys ja viskositeetti, muuttuvat paineen myötä. Tämä johtuu siitä, että kaasun molekyylit ovat kauempana toisistaan verrattuna nesteen molekyyleihin, joten pienikin muutos paineessa vaikuttaa kaasun tiheyteen. [5, s. 1.] Yleensä kaasut, kuten typpi, happi, vety, jalokaasut ja hiilidioksidi, voidaan olettaa ideaalikaasuksi mm. NTP-olosuhteissa tai paineen ollessa alle 10 bar [6; 7; 8, s. 251].

2.2 Ideaalikaasu

Idealikaasu on teoreettinen kaasu, jonka molekyylit ovat vuorovaikutuksessa ainoastaan niiden törmätessä toisiinsa. Törmätessään molekyylit on oletettu liikkuvan suoraviivaisesti ja vakionopeudella. Idealikaasumallin avulla on pystytty kuvaamaan useimpien kaasujen käyttäytymistä. Se noudattaa idealikaasun tilanyhtälöä, joka on esitetty kaavassa 1. [8.]

$$p * V = n * R * T , \quad (1)$$

jossa

p on kaasun paine (Pa)

V on kaasun tilavuus (m³)

n on kaasun määrä (mol)

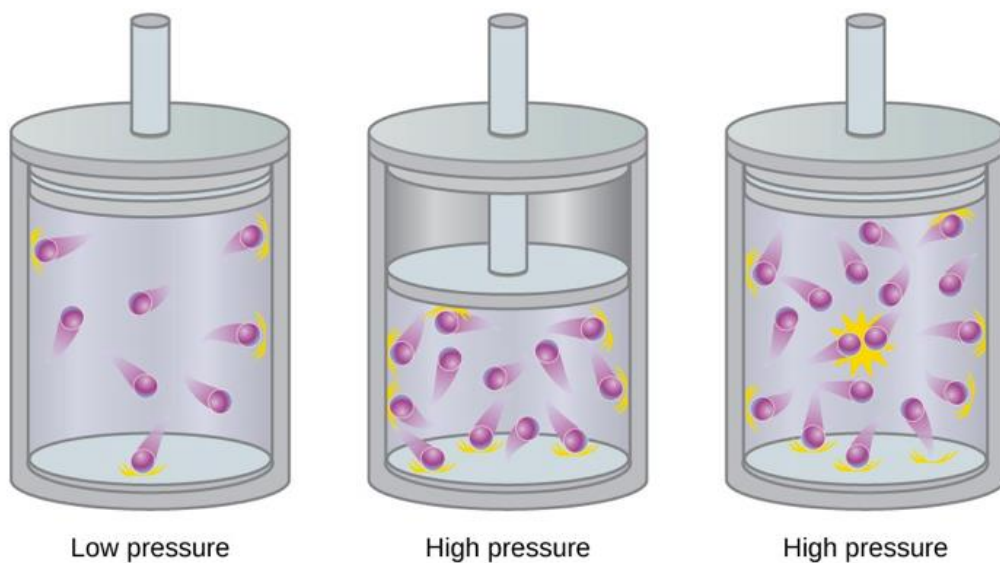
R on kaasuvakio (J/K*^{mol})

T on kaasun lämpötila (K).

Idealikaasun tilanyhtälö pätee kuitenkin ainoastaan alle 10 baarin paineissa. Paineen ollessa korkeampi, yhtälössä täytyy ottaa huomioon myös puristuvuuskerroin Z, joka on mittana sille, kuinka lähellä idealikaasu on reaalikaasua [5, s. 21].

2.3 Reaalikaasu

Reaalikaasu on todellinen kaasu, jonka molekyylit ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Se käyttäytyy kuten ideaalikaasu ainoastaan normaaliolosuhteissa ja alhaisessa paineessa. [9.] Kuvassa 2 on esitetty, miten kaasun molekyylit käyttäytyvät, kun painetta nostetaan. Reaalikaasun molekyylit lähenevät toisiaan paineen ollessa korkea, jolloin niiden tilavuus on merkityksellinen suhteessa kaasun kokonaismäärään. Tästä johtuen korkeissa paineissa kaasun kokoonpuristuvuus on pienempi, ja vaikka sen tilavuus pienenee jatkuvasti paineen kasvaessa, tämä lasku ei ole suhteellinen. [10.]



Kuva 2. Kaasumolekyylin käyttäytyminen painetta nostettaessa [10].

Ideaalikaasun tilanyhtälön käyttäminen reaalikaasun laskelmissa paineen ollessa yli 10 baaria johtaa epätarkkoihin tuloksiin. Tarkemmat tulokset saadaan modifioimalla yhtälöä 1, määrittämällä kriittinen paine ja kriittinen lämpötila, minkä jälkeen lasketaan alennettu paine (P_r) ja alennettu lämpötila (T_r). Näiden avulla käyttämällä puristuvuuskerroimen Standing-Katz-diagrammia puristuvuuskerroin voidaan määrittää. Kaava 2 on modifioitu versio ideaalikaasun tilanyhtälöstä reaalikaasuille. [5, s. 22.]

$$p * V = Z * n * R * T , \quad (2)$$

jossa

Z on puristuvuuskerroin (dimensioton).

Kaavassa 2 puristuvuuskerroimen arvon voidaan olettaa olevan 1 muun muassa NTP-olosuhteissa, alle 10 baarin paineissa ja Machin luvun ollessa alle 0,3. Tällöin suurin osa kaasuista käyttäytyy ideaalikaasun tavoin.

Opinnäytetyössä on tarkoitus kehittää Excel-laskentamalli, joka sisältää kaikki tarvittavat kaavat kaasulinjan painehäviön laskemiseen. Yleisin tapa määrittää puristuvuuskerroin on käyttää Standing-Katz-diagrammia. Laskentamalleissa kuitenkin tarvitaan kaava, jotta kertoimen määrittäminen olisi helpompaa. Kun kaasun paine, lämpötila ja paino ovat tiedossa, helppo tapa laskea puristuvuuskerroin on käyttää CNGA-yhtälöä (kaava 3) [5, s. 24].

$$Z = \frac{1}{1 + \frac{P_{avg}^{344,400(10)^{1,785G}}}{T_f^{3,825}}}, \quad (3)$$

jossa

P_{avg} on kaasun keskimääräinen paine (Pa)

T_f on kaasun keskimääräinen lämpötila (K)

G on kaasun paino (dimensioton).

Kaasun painosuhte G on dimensioton. Se voidaan laskea kaavalla 4 [5, s. 3].

$$G = \frac{\rho_g}{\rho_{air}}, \quad (4)$$

jossa

ρ_g on kaasun tiheys

ρ_{air} on ilman tiheys.

Keskimääräinen paine kaasulinjassa voidaan laskea tarkasti käyttämällä kaavaa 5. [5, s. 24]:

$$P_{avg} = \frac{2}{3} * \frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 * P_2^2}, \quad (5)$$

jossa

P_1 on sisääntulopaine (Pa)

P_2 on ulostulopaine (Pa).

CNGA-kaavaa voidaan käyttää tilanteissa, joissa paine on yli 7 bar. Paineen ollessa alle 7 baaria puristuvuustekijäksi voidaan olettaa arvo 1. [11.]

2.4 Tiheys

Tiheyden muutokset ovat merkittäviä, kun kyseessä ovat pitkät putkistot, joilla on suuri painehäviö. Muutokset täytyy huomioida kaasulinjaston laskuja suoritettaessa. Tiheys ei muutu lyhyissä putkistoissa, joissa on pieni painehäviö, joten niissä voidaan käyttää kokoonpuristumattomiin virtauksiin tarkoitettuja yhtälöitä. [11.] Jos painevaihtelualue ideaalikaasulla ei ole liian suuri, tiheys voidaan laskea kaavalla 6 [12].

$$\rho_2 = \rho_1 * \frac{p_2}{p_1}, \quad (6)$$

jossa

ρ on kaasun tiheys (kg/m³)

p_1 on sisääntulopaine (Pa)

p_2 on ulostulopaine (Pa).

Reaalikaasujen tiheys lasketaan kaavasta 7 [12].

$$\rho = \frac{n * M}{V} = \frac{p * M}{Z * R * T}, \quad (7)$$

jossa

p on kaasun paine tietyssä lämpötilassa (Pa)

M on kaasun moolimassa (g/mol)

Z on puristuvuuskerroin (dimensioton)

T on kaasun lämpötila (K)

R on kaasuvakio (J/K*³mol).

Kaava 7 on suosituin tapa määrittää tiheys kaasulinjastossa. Paineella on suora vaikutus tiheyteen, ja ne yhdistyvät toisiinsa tämän yhtälön avulla.

2.5 Viskositeetti

Kaasun viskositeetti on lämpötilasta ja paineesta riippuvainen: niiden kasvaessa myös kaasun viskositeetti kasvaa. Mitä pienempi viskositeetti on, sitä helpommin se virtaa putkistossa, aiheuttaen vähemmän painehäviötä. Kaasun viskositeetti on huomattavasti pienempi verrattuna nesteeseen viskositeettiin. Esimerkiksi veden viskositeetti on 1,0005 mPa*s, kun taas hapen on 0,0204 mPa*s. Pienestä arvosta huolimatta kaasun viskositeetti on tärkeä virtauksen tyypin määrittämisessä. [5, s. 5; 13; 14.]

Seoksen tai mm. maakaasun viskositeetti voidaan laskea monella eri tavalla. Maakaasun viskositeetin määrittämiseen voidaan käyttää kaavaa 8, jossa on yhteenlaskettu kaikkien maakaasun sisältävien komponenttien viskositeetit. [5, s. 5.]

$$\eta = \frac{\sum(\eta_i * y_i \sqrt{M_i})}{\sum(y_i \sqrt{M_i})}, \quad (8)$$

jossa

η_i on kaasuseoksen dynaaminen viskositeetti (Pa*s)

η on kaasuseoksen komponentin dynaaminen viskositeetti (Pa*s)

y_i on kaasuseoksen komponentin mooliosuus tai prosenttiosuus

M_i on kaasuseoksen komponentin molekyylipaino (g/mol).

Toinen tapa laskea kaasun dynaaminen viskositeetti on Sutherland's-yhtälön avulla (kaava 9) [15].

$$\mu = \mu_o * \left(\frac{T_o + C}{T + C}\right) * \left(\frac{T}{T_o}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

jossa

μ on dynaaminen viskositeetti sisääntulolämpötilassa T (Pa*s)

μ_o on viskositeetti referenssilämpötilassa (Pa*s)

T on sisääntulolämpötila (K)

T_o on referenssilämpötila (K)

C on Sutherland's vakio.

Taulukossa 1 on esitetty Sutherland's vakion arvoja sekä referenssilämpötilat ja referenssiviskositeetit erilaisille kaasuille dynaamisen viskositeetin laskemiseen.

Taulukko 1. Sutherland's-vakion arvot kaasuille viskositeetin laskemiseen [15].

Gas	C [K]	T_0 [K]	μ_0 [$\mu\text{Pa s}$]
air	120	291.15	18.27
nitrogen	111	300.55	17.81
oxygen	127	292.25	20.18
carbon dioxide	240	293.15	14.8
carbon monoxide	118	288.15	17.2
hydrogen	72	293.85	8.76
ammonia	370	293.15	9.82
sulfur dioxide	416	293.65	12.54
helium	79.4 ^[16]	273	19 ^[17]

Sutherland'sin yhtälö pätee kaasuille, jos lämpötila on välillä $0 < T < 555$ K [15].

3 Kaasulinjastoon liittyvät parametrit

Kaasulinjaston parametrien, kuten tilavuusvirran, virtausnopeuden, halkaisijan ja painehäviön, laskemiseen on kehitetty monenlaisia kaavoja. Suurimmaksi osaksi nämä kaavat on muodostettu yksinkertaistamalla ja soveltamalla kaasulakeja Bernoullin yhtälöön. [5, s. 31.]

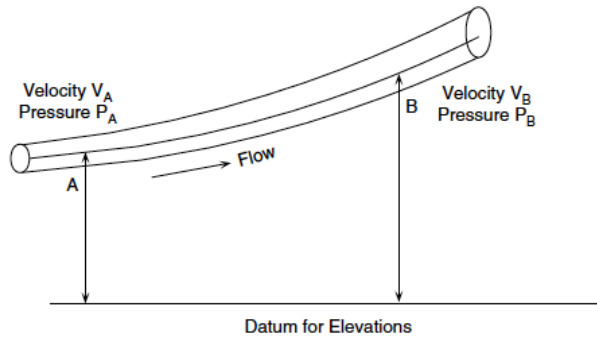
3.1 Bernoullin yhtälö

Bernoullin yhtälö on energiayhtälö, joka yhdistää paineen, virtausnopeuden ja korkeuseron toisiinsa. Sen mukaan fluidin nopeuden kasvaessa paine pienenee ja päinvastoin. Bernoullin yhtälöstä on rakennettu erilaisia muotoja riippuen virtauksen tyypistä. Kokoonpuristumattomille, eli useimmille nestevirroille, sekä kaasuille, joilla on pieni Machin luku, on voimassa yksinkertaistettu muoto (kaava 10). Kokoonpuristuviin virtauksiin puolestaan on kehitetty edistyneempiä muotoja. [16.]

$$P_A + \frac{1}{2} * \rho * v_A^2 + \rho * g * h_A = P_B + \frac{1}{2} * \rho * v_B^2 + \rho * g * h_B , \quad (10)$$

jossa
 h on korkeusero (m).

Yhtälö 10 on muodostettu ottaen huomioon kaksi pistettä A ja B putkilinjastossa, kuten kuvassa 3 on esitetty.



Kuva 3. Kaasun kulkeminen linjastossa kahden pisteen välillä [5, s. 32].

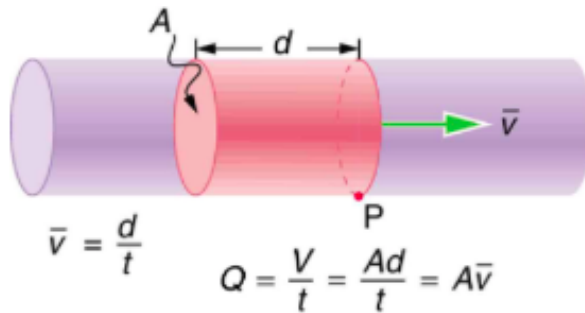
3.2 Tilavuusvirta

Tilavuusvirralla tarkoitetaan fluidin tilavuutta, joka kulkee virtauskanavan poikkileikkauksen läpi aikayksikössä. Tilavuusvirta voidaan ratkaista yhtälöstä 11, jos massavirta on tiedossa.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T \cdot Z}{M \cdot p}, \quad (11)$$

jossa
 \dot{V} on tilavuusvirta (m^3/s)
 \dot{m} on massavirta (kg/s)
 M on kaasun moolimassa (kg/mol).

Kuvassa 4 on esitetty yleinen kaava tilavuusvirralle fluidin kulkiessa putken läpi tietyssä ajassa.



Kuva 4. Fluidin kulku putken läpi [17].

Yleensä virtauskanava on lieriömäinen, joten putken poikkileikkauksen pinta-alan A tilalle voidaan lisätä termi $\pi \cdot r^2$, josta voidaan johtaa kaava halkaisijalle tai virtausnopeudelle [18].

3.3 Virtausnopeus

Kaasun virtausnopeuden riippuvuus paineesta (kokoonturistuvuudesta johtuen) aiheuttaa sen jatkuvaa muuttumista kaasulinjastossa, vaikka putken halkaisija pysyisikin samana. Paineen laskiessa virtausnopeus kasvaa ja päinvastoin. Virtausnopeutta voidaan käyttää mm. sisähalkaisijan laskemisessa, jos tilavuusvirta on tiedossa. Kaasulinjastossa suositellaan alle 18–24 m/s virtausnopeuksia, jotta melu, värinä ja korrosio putkistossa minimoituisi. Minimi kaasun virtausnopeus tulisi olla 10–15 m/s. Syövyttävälle kaasulle suositeltava nopeus on 15 m/s. [5; 19.] Taulukossa 2 on esitetty PSK 2401:n (20, s. 3) mukaisia virtausnopeuksia kaasuille eri kokoisissa putkistoissa.

Taulukko 2. Ilman ja kaasujen suositeltavat virtausnopeudet [20, s. 3].

Ilmat ja kaasut	Airs and gases	DN	Virtausnopeus/Velocity
Työilma	Plant air	25-200	5–10 m/s
Instrumentti-ilma	Instrument air	10-25	5–10 m/s
Instrumentti-ilma	Instrument air	25-200	10–15 m/s
Kuljetusilma	Conveying air	25-200	15–30 m/s
Alipaineilma	Vacuum air	-	10–20 m/s
Palavat kaasut	Flammable gases	-	10–20 m/s
Palamattomat kaasut	Non-flammable gases	-	15–25 m/s

Suosittelavia tai PSK-standardin mukaisia kaasun virtausnopeuksia voidaan käyttää laskujen helpottamiseksi, mutta tarkemmissa laskuissa käytetään kaavoja. Jos tilavuusvirta sekä halkaisija on tiedossa, virtausnopeus voidaan laskea yhtälöstä 12 [5, s. 38].

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{A}, \quad (12)$$

jossa

\bar{v} on virtausnopeus (m/s)

A on putken poikkipinta-ala (m²).

Kaasun virtausnopeuden tulisi olla 50 % pienempi kuin suurin sallittu virtausnopeus [5, s. 41].

3.4 Reynoldsin luku

Parametri, jota käytetään virtauksen tyypin määrittämisessä, on dimensioton Reynoldsin luku. Se määräytyy viskositeetin, virtausnopeuden, putken halkaisijan ja tiheyden perusteella. [5, s. 43.] Putkivirtaukselle Reynoldsin luku voidaan laskea kaavasta 13 [21].

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot \rho}{\eta \cdot \pi \cdot D}, \quad (13)$$

jossa

D on putken halkaisija (m)

\dot{V} on tilavuusvirta (m³/s)

ρ on fluidin tiheys (kg/m³)

η on dynaaminen viskositeetti (Pa*s).

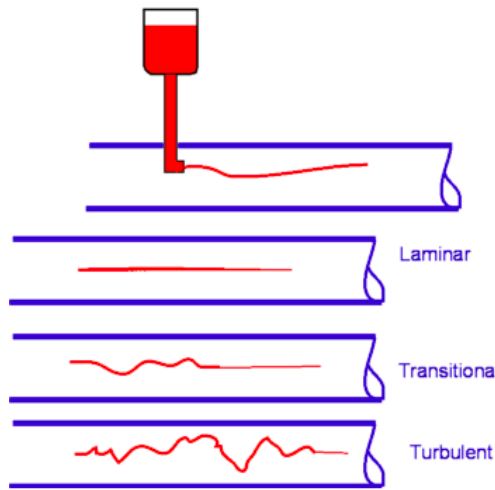
Jos putkivirtauksessa:

Re < 2300, virtaus on laminaarinen, eli jokainen fluidialkio liikkuu suoraviivaista reittiä, joka on putkensuuntainen

Re = 2300–4000, siirtymäalue, eli virtaus voi olla turbulenttinen, laminaarinen tai vaihdella näiden kesken

$Re > 4000$, virtaus on turbulenttinen, eli jokainen fluidialkio liikkuu virtaussuuntaan, mutta myös sivusuunnassa, aiheuttamalla voimakasta sekoitusta putken sisältöön. Virtaus voidaan kuitenkin varmistaa turbulenttiseksi, vasta sitten kun $Re = 10\,000$. [22, s. 25.]

Kuvassa 5 on esitetty virtauksen eri tyypit putkessa.



Kuva 5. Reynoldsin koe [23].

Osborne Reynolds sai määritettyä virtaustyyppit ruiskuttamalla väriainetta lasiputken läpi kulkevaan virtaukseen. Kokeesta selvisi, että pienillä nopeuksilla virtauksen linja oli suoraviivainen, kun taas nopeutta lisäämällä ilmestyi pieniä pyörteitä. Kiihdyttämällä nopeutta edelleen koko neste lopulta värjäytyi, eli laminaari virtaus oli muuttunut turbulentiksi. [23.]

3.5 Putkivastuskerroin

Putkivastuskerroin on parametri, joka riippuu Reynoldsin luvusta ja putkiston karheudesta. Putkivastuskertoimen avulla voidaan laskea kitkasta aiheutuva painehäviö kaasulinjassa käyttämällä mm. Darcy Weisbachin yhtälöä. [24.] Jos virtaus on laminaarinen, putkivastuskerroin voidaan laskea kaavalla 14 [21].

$$\xi = \frac{64}{Re}, \quad (14)$$

jossa

ξ on putkivastuskerroin (dimensioton).

Jos virtaus on kokonaan turbulenttinen, putkivastuskerroin määritetään Moodyn käyrästä. Excelissä määrittämisen helpottamiseksi ja iteroinnin välttämiseksi on kehitetty seuraava kaava 15. [21.]

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = -2,0 \log \left(\frac{k}{3,7d} - \frac{5,02}{Re} \log \left(\frac{k}{3,7d} + \frac{13}{Re} \right) \right), \quad (15)$$

jossa

k on putken absoluuttinen karheus (mm)

d on putken halkaisija (mm)

k/d on suhteellinen karheus (dimensioton).

Taulukossa 3 on esitetty yleisimmät karheuden arvot eri materiaaleille.

Taulukko 3. Karheuksia erilaisille materiaaleille [25].

Materiaali	Material	Karheus, k/mm, Roughness, k/mm
alumiini	aluminum	0,001-0,002
lyijy	lead	0,001-0,002
vedetty kupari	drawn copper	0,0015
vedetty messinki	drawn brass	0,0015
PVC, muoviputket	PVC, plastic pipes	0,0015
lasikuitu	fiberglass	0,005
tavallinen teräsputki	commercial steel	0,045-0,09
ruostunut teräs	rusted steel	0,15-4,0
niitattu teräs	riveted steel	0,9-9,0
ruostumaton teräs	stainless steel	0,015
uusi valurauta	new cast-iron	0,25-0,8
kulunut valurauta	worn cast-iron	0,8-1,5
syöpynyt valurauta	corroded cast-iron	1,5-2,5
galvanoitu rauta	galvanised iron	0,17
asfaltoitu valurauta	asphalted cast-iron	0,13
takorauta	wrought iron	0,03
vedetty putki	drawn tubing	0,0015
höylätty lauta	wood stave	0,18-0,9
tavallinen lauta	ordinary wood	5,0
betoni	concrete	0,3-3,0

Tilanteesta riippuen valitaan putken karheus, joka jaetaan putken sisähalkaisijalla putkivastuskertoimen määrittystä varten. Putken valmistaja yleensä antaa karheusarvon tai karheusarvon alueen.

3.6 Putken halkaisija

Putkikoko voidaan määrittää paine-eron perusteella, optimoimalla tai käyttämällä suositeltavaa virtausnopeutta. Yleisin tapa laskea putken sisähalkaisija suositeltujen virtausnopeuksien avulla on käyttämällä kaavaa 16. [21; 26.]

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \bar{v}}}, \quad (16)$$

jossa

D on sisähalkaisija (m).

Putkilinjastoissa suositetaan suuria halkaisijoita, sillä niiden ansiosta kitkahäviöt pienenevät huomattavasti [27].

3.7 Kokonaispainehäviö

Painehäviöllä tarkoitetaan kahden pisteen välillä olevaa paine-eroa linjastossa [28, s. 675]. Kokonaispainehäviö aiheutuu kaasun ja putken seinämän välisestä kitkasta kaasun kulkiessa mm. mutkien ja venttiilien läpi, tai kaasun korkeuden muutoksista. Painehäviön laskeminen on tärkeää, sillä sen avulla voidaan määrittää riittävä sisääntulopaine kaasulle, että se pystyy kulkemaan koko prosessin läpi. Prosessissa käytetyn paineen täytyy olla suurempi kuin kokonaispainehäviö käyttölämpötiloissa ja käytettävissä virtausnopeuksissa. [21; 29; 30.] Suorittamalla asianmukaisia putken mitoituslaskelmia on mahdollista vähentää kokonaispainehäviötä [31]. Jos laskelmat tehdään suorassa putkessa ja virtaus on laminaarinen, painehäviö saadaan Hagen Poiseuillen yhtälöstä (kaava 17) [21].

$$\Delta p = 64 \cdot \eta \cdot \frac{L}{D^2} \cdot \frac{\bar{v}}{2}, \quad (17)$$

jossa

ΔP on painehäviö (Pa)

η on kaasun dynaaminen viskositeetti (Pa*s)

L on putken pituus (m)

\bar{v} on virtausnopeus (m/s)

D on putken sisähalkaisija (m).

Turbulenttisisessä putkivirtauksessa painehäviö saadaan Darcyn yhtälöstä (kaava 18) [21].

$$\Delta p = \rho * \xi * \frac{L}{D} * \frac{\bar{v}^2}{2}, \quad (18)$$

jossa

ξ on putkivastuskerroin (dimensioton).

Darcy'n yhtälö pätee ainoastaan jos virtaus on kokoonpuristumaton. Kaasuille se pätee, jos painehäviö on alle 40 % alkupaineen arvosta. Jos se ylittää 40 %, täytyy käyttää kokoonpuristuviin virtauksiin tarkoitettuja yhtälöitä, kuten Weymouthin yhtälöä (kaava 19). [5, s. 61; 32.]

$$Q = 3,7435 * 10^{-3} * E \left(\frac{T_b}{P_b} \right) * \left(\frac{P_1^2 - e^S * P_2^2}{G * T_f * L_e * Z} \right)^{0,5} * D^{2,667}, \quad (19)$$

jossa

Q on kaasun tilavuusvirta (m³/day)

E on putkilinjan tehokkuus (dimensioton)

T_b on referenssi lämpötila (K)

P_b on referenssi paine (kPa)

T_f on keskimääräinen lämpötila (K)

L_e on ekvivalenttipituus (m)

S korkeuden säätöparametri (dimensioton).

Virtauksen tyyppi (kokoonpuristuva tai kokoonpuristumaton) on mahdollista määrittää laskemalla Machin luku kaavasta 20 [33].

$$Ma = \frac{v}{a}, \quad (20)$$

jossa

Ma on Machin luku (dimensioton)
 α on äänen nopeus kaasussa (m/s)
 v on kaasun virtausnopeus (m/s).

Äänen nopeus on mahdollista laskea kaavasta 21 [33].

$$\alpha = \sqrt{\frac{\gamma * R * T}{M}}, \quad (21)$$

jossa

γ on adiabaattivakio (dimensioton)

R on kaasuvakio (J/K*mol)

T on kaasun lämpötila (K)

M on kaasun moolimassa (kg/mol).

Adiabaattivakio voidaan laskea kaavasta 22 [33].

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad (22)$$

jossa

c_p on isobaarinen ominaislämpökapasiteetti (J/K*kg)

c_v on isokoorinen ominaislämpökapasiteetti (J/K*kg).

Jos Machin luku on yli 0,3, se tarkoittaa, että virtaus on kokoonpuristuva [33]. Taulukossa 4 on esitetty kaasujen adiabaattivakiot.

Taulukko 4. Kaasujen adiabaattivakiot [33].

Kaasut	Adiabaattivakio (γ)
Yksiatomiset kaasut (He, Ar, Ne)	1,67
Kaksiatomiset kaasut (N ₂ , O ₂ , H ₂ , ilma)	1,4
Useampiatomiset kaasut (H ₂ O, CO ₂ , SO ₂ , CH ₄ , H ₂ S)	<1,3

Yksi tapa laskea painehäviö kaasun kokoonpuristuvalla virtauksella on käyttää yhtälöä 23 [34].

$$\Delta P = P_{in} - \sqrt{P_{in}^2 - 5,7 * 10^{-4} * \xi * L * Z_{avg} * T_{avg} * \rho_{std} * \frac{\dot{V}_{std}^5}{D^5}}, \quad (23)$$

jossa

ρ_{std} on kaasun tiheys standardiolosuhteissa (kg/m^3)

P_{in} on sisääntulopaine (MPa)

Z_{avg} on keskimääräinen puristuvuuskerroin (dimensioton)

\dot{V}_{std} on kaasun tilavuusvirta standardiolosuhteissa (m^3/s)

T_{avg} on keskimääräinen lämpötila putkistossa (K).

Jos putki on lyhyt, painehäviö voidaan laskea myös kaavasta 24 [33].

$$\Delta P = - \frac{\xi * \rho * \bar{v}^2 * p_1 * T}{2 * p * T_1} L , \quad (24)$$

jossa

p_1 on sisääntulopaine (MPa)

T on kaasun keskimääräinen lämpötila (K)

T_1 on sisääntulolämpötila (K)

p on keskimääräinen paine (MPa).

Olettamalla kitkakertoimen olevan vakio ja käyttämällä keskimääräistä lämpötilaa, painehäviön kaava 24, muuttuu kaavaksi 25 [33].

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \xi \frac{L * \rho * \bar{v}^2 * T}{d * 2 * T_1} , \quad (25)$$

jossa

p_1 on sisääntulopaine (MPa)

p_2 on ulostulopaine (MPa)

d on sisähalkaisija (m).

Isotermisessä virtauksessa lämpötila pysyy vakiona, joten painehäviö voidaan laskea modifioimalla kaavaa 25, jolloin saadaan kaava 26 [33].

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \xi \frac{L * \rho * \bar{v}^2}{d * 2} \quad (26)$$

Kaavoissa 25 ja 26 on tarkoitus laskea ensin ulostulopaine p_2 , kun p_1 on tiedossa, minkä jälkeen nämä paineet vähennetään toisistaan painehäviön saamiseksi.

Adiabaattisen virtauksen painehäviön laskemisessa loppupaine täytyy ratkaista iteroimalla eli laskemalla ensin kaavasta 26 painehäviö, jotta saataisiin loppupaineelle jokin arvo. Seuraavaksi täytyy laskea putken loppulämpötila ja keskimääräinen lämpötila, minkä jälkeen lasketaan uusi painehäviö kaavalla 25. Iterointia jatketaan samalla tavalla, kunnes painehäviön muutosta ei enää tapahdu. Loppulämpötila lasketaan kaavasta 27. [33.]

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (27)$$

Hydrostaattisella paineella tarkoitetaan korkeuserosta aiheutuvaa painehäviötä [35]. Sen määrittäminen on tärkeää, jotta vältytään mm. putken korroosiolta, sillä hydrostaattisella paineella on siihen suora vaikutus. Erityisesti jos kyseessä on teräsputki, hydrostaattisen paineen korroosiovaikutus on suuri. [36.] Hydrostaattinen paine lasketaan kaavalla 28.

$$\Delta P = \rho * g * h , \quad (28)$$

jossa

h on korkeusero (m).

Painehäviön laskennassa on tärkeää määrittää myös kertahäviöt, johtuen mm. linjastossa sijaitsevista venttiileistä ja putken mutkista [37]. Jos kyseessä on tuotantolaitosten linjasto, venttiilien ja mutkien aiheuttama painehäviö saattaa olla paljon suurempi kuin suorassa putkessa. Pitkissä linjastoissa näitä painehäviöitä ei usein tarvitse huomioida. Kertahäviöt voidaan laskea kaavasta 29. [37; 38.]

$$\Delta P = \zeta * \rho * \frac{\bar{v}^2}{2} , \quad (29)$$

jossa

ΔP on kertahäviö (Pa)

ζ on paikallisvastuskerroin (dimensioton).

Liitteessä 1 on esimerkkejä mm. tyypillisistä venttiileistä, mutkista sekä niiden paikallisvastuskertoimista [39].

4 Putkiluokat

Putkiluokalla tarkoitetaan kokoelmaa putken osista sekä putkista, jotka soveltuvat samaan putkilinjaan. Putkiluokassa on määritetty mitat ja materiaalit. Niihin kuuluvia putkenosia ovat mm. putkikäyrät, suorat putket, laipat, T-putket ja tiivisteet.

Virtaava aine, paine, lämpötila ja korroosio-olosuhteet määräävät putkilinjojen putkiluokan [40, s. 2]. Kuvassa 6 on esitetty tarkka putkiluokan merkintätapa.

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

Kuva 6. Esimerkki tarkkan putkiluokan tunnuksesta [40, s. 2].

Putkiluokassa esiintyvän nimellispaineen yksikkö on bar. Halutessa voidaan käyttää lyhennettyä tunnusta, esim. E16H1A. Liitteessä 2 on esitetty taulukko standardin PSK 4201:n mukaisista materiaalitunnuksista, joita putkiluokissa käytetään.

5 Excel-laskentamallin luominen

Excel-laskentamallin laatiminen edellytti aiheeseen liittyvään teoriaan perehtymistä, jotta kaikki kaasulinjastoon liittyvät parametrit tulisivat huomioonotetuiksi ja että käytetyt yhtälöt olisivat asianmukaisia. Mallia rakennettaessa oletettiin virtauksen olevan isoterminen, jotta monimutkaisia adiabaattiseen virtaukseen liittyviä yhtälöitä ei tarvitsisi käyttää. Adiabaattisen virtauksen yhtälöt olisivat vaatineet makroja, joita tässä mallissa ei haluttu käyttää.

Kuvassa 7 on esitetty laskentamallin työarkit: käyttöopas, esimerkkilasku hapelle, täytettävät taulukot ja tulokset, laskelmat, putken halkaisijat ja kaavat.



Kuva 7. Excel-laskentamallin työarkit.

Työarkkien lisääminen helpottaa mallin käyttämistä, sillä käyttäjä voi suoraan täydentää tarvittavat taulukot ja nähdä lopulliset tulokset Fill up & results -työarkissa. Laskentamalli on pyritty luomaan siten, että kaikki tiedot syötettäisiin samaan välilehteen, ja laskentataulukko poimisi niitä laskujen suorittamista varten.

Ensimmäinen työarkki "Quick user guide" sisältää englanninkielisen lyhyen käyttöoppaan mallin käyttämistä varten. Sen lisäksi siinä on kuvailtu seuraavan työarkin esimerkin sisältöä, jota on käytetty mallin toimivuuden ymmärtämiseksi. Käyttöopas on esitetty liitteessä 3.

Seuraavassa työarkissa nimeltään "Example calculation for oxygen" on suoritettu laskuesimerkki hapen virtaukselle kaasulinjastossa. Käyttäjän on tarkoitus ottaa mallia siitä omien laskelmien tekoa varten. Laskuesimerkissä on oletettu seuraava tilanne:

- Virtaus on isoterminen.
- Putkimateriaali on ruostumatonta terästä.
- Alkupaine on 17 baaria.
- Lämpötila on 20 °C.
- Massavirta on 500 kg/h.
- Putken kokonaispituus on 200 metriä.
- Putken segmentin pituus on 5 metriä.
- Alkuhalkaisija on 26,9 mm, ja se muuttuu 33,7 millimetriksi noin linjaston puolella välissä.
- Korkeusero on 5 metriä 15 metrin putkenpituudella, 10 metriä 90 metrin putkenpituudella ja 15 metriä 180 metrin pituudella.
- Putkivastuskertoimet on valittu, kun pituus on 20, 60, 130 ja 195 metriä.

Tämä työarkki on suojattu, jotta käyttäjä ei vahingossa pääsisi tekemään muokkauksia. Example calculation for oxygen -välilehti on esitetty liitteessä 4.

"Fill up & results" on työarkki, jota käyttäjä pääsee itse muokkaamaan omien laskujen suorittamista varten. Se sisältää muuttujien taulukot, vakioarvot sekä tulokset. Täydennettävät solut on värjätty oransseiksi, tulokset vihreiksi ja vakiot sinisiksi. Taulukossa 5 on esitetty muuttujat.

Taulukko 5. Muuttujien taulukko Excel-laskentamallissa.

Fill up	Enter values here	Units
Inlet pressure	17	bar
Gas temperature	20	°C
Gas viscosity	20,561	μPa*s
Molar Mass	32	g/mol
Mass flow	500	kg/h
Compressibility factor	1	

Kun kyseessä on kokoonpuristuva virtaus, viskositeetti ja tiheys muuttuvat linjastossa, ja myös puristuvuustekijä täytyy ottaa huomioon. Laskemalla kuitenkin hapen viskositeetti sekä puristuvuustekijä jokaiselle putken segmentille todettiin, että viskositeetin muutos on mitätön. Tästä johtuen se voidaan lisätä muuttujien taulukkoon. Lisäksi puristuvuustekijä on pysynyt hyvin lähellä arvoa 1, joten tässä mallissa sen on oletettu olevan 1. Taulukosta 6 voidaan havaita, kuinka vähän puristuvuustekijä ja viskositeetti ovat muuttuneet putkessa.

Taulukko 6. Viskositeetin ja puristuvuustekijöiden arvot paineen muuttuessa.

p1 [Pa]	Pipe length [m]	Compressibility factor [dimensionless]	Viscosity of gas [Pa*s]
1700000	10	0,9888	0,000020561
1697104,942	20	0,98885463	0,000020559
1694204,801	30	0,988909559	0,000020559
1691299,526	40	0,988964792	0,000020557
1688389,113	50	0,989020333	0,000020556
1685473,523	60	0,989076188	0,000020555
1682552,728	70	0,989132362	0,000020554
1679626,7	80	0,98918886	0,000020553
1676695,41	90	0,989245689	0,000020551
1673758,842	100	0,989302854	0,00002055
1670816,956	110	0,989360361	0,000020548
1667869,793	120	0,989418217	0,000020548
1664917,121	130	0,989476427	0,000020546
1661959,113	140	0,989534998	0,000020545
1658995,669	150	0,989593037	0,000020544
1656026,757	160	0,989653251	0,000020543
1653052,346	170	0,989712948	0,000020541
1650072,419	180	0,989773034	0,000020539
1647086,945	190	0,989833517	0,000020539
1644095,866	200	0,989894406	0,000020537
1641099,176	210	0,989955707	0,000020536
1638096,831	220	0,990017431	0,000020535
1635088,798	230	0,990079586	0,000020533
1632075,057	240	0,99014218	0,000020532
1629055,562	250	0,990205224	0,00002053
1626030,292	260	0,990268726	0,000020529
1622999,202	270	0,990332698	0,000020528
1619962,256	280	0,990397149	0,000020526
1616919,434	290	0,990462091	0,000020525
1613870,687	300	0,990527534	0,000020534

Viskositeetin ja puristuvuustekijän laskemista varten käytettiin Peace software-online-laskuria, sillä puristuvuustekijän yhtälö oli monimutkainen ja useita iterointivaiheita olisi täytynyt suorittaa tarkan tuloksen saamiseksi [41].

Kuvasta 8 voidaan huomata, että Fill up & results -välilehti sisältää myös pudotusvalikkoja karheuden ja adiabaattivakioiden arvoista. Käyttäjä voi esimerkiksi valita putken materiaalin, jonka jälkeen viereiseltä solulta voidaan valita karheuden arvo. Adiabaattivakiot valitaan kaasun mukaan. Käyttämällä pudotusvalikoita vältetään pitkiltä taulukoilta, jotka tekisivät laskentamallista sekavan näköisen.

Select material	Select roughness [mm]
stainless_steel	0,015
Select gas type	Adiabatic gas constant [γ]
Diatomic gases (N2, O2, H2, Air)	1,4
Monatomic gases (He, Ar, Ne)	
Diatomic gases (N2, O2, H2, Air)	
Polyatomic gases (H2O, CO2, SO2, CH4, H2S)	

Kuva 8. Pudotusvalikot karheudesta ja adiabaattivakiosta.

Kuvassa 9 on esitetty pudotusvalikko segmentin pituuden valintaan sekä solu, johon on tarkoitus syöttää putken kokonaispituus. Tällöin ohjelma automaattisesti näyttää suoritettut laskut syötettyyn kokonaispituuteen asti.

Choose pipe segment length [m]	5
Total pipe length [m]	200

Kuva 9. Putken segmentin valinta ja putken kokonaispituus.

Excel-laskentamallissa on käytetty pääsääntöisesti funktioita, jotta sen käyttö helpottuisi ja turhia tietoja, kuten virheilmoituksia, ei ilmestyisi. Funktiot ovat käytännöllisiä, sillä muokatessa ne valitsevat esimerkiksi automaattisesti oikean kaavan putkivastuskertoimen laskemista varten sen mukaan, onko virtaus laminaarinen vai turbulenttinen, ja palauttavat tuloksen yhteen soluun. Kuvassa 10 on esitetty, miten funktioiden avulla taulukon alapuolelle muodostuu teksti virtauksen tyypistä, riippuen lasketusta Machin luvusta.

Determination of the type of flow (compressible/incompressible)	
Speed of sound [m/s]	Mach number
326,550988	0,033531046
The flow is incompressible.	
Friction factor depending on the type of flow	
The flow is Turbulent.	

Kuva 10. Machin luvun laskeminen.

Sisähalkaisijan sekä korkeuseron määrittystä varten on muodostettu taulukoita, joihin syötetään halutut arvot. Ensimmäisessä taulukossa, kuten kuvassa 11 nähdään: putken alkuhalkaisija on 0,0269 metriä ja se muuttuu 101 metrissä 0,0337 metriksi. Käyttäjä siis syöttää, mistä putken pituudesta halkaisijan muutos alkaa ja mikä sen arvo on, minkä jälkeen laskentamalli automaattisesti suorittaa laskut Calculations -työarkissa. Samalla tavalla toimii myös korkeuseron taulukko. Sinisiä soluja ei ole tarkoitus muokata.

Add start length of diameter change [m]	0	100	101
Enter pipe diameter [m]	0,0269	0,0269	0,0337
Add start length for elevation [m]	0	15	90
Elevation difference [m]	0	5	10

Kuva 11. Putken sisähalkaisija ja korkeusero.

Putken segmentoinnin takia käyttäjän täytyy syöttää putkivastuskertoimet jokaiselle segmentille erikseen. Käyttäjä voi valita putkivastuskertoimet taulukosta, joka on esitetty Fill up & Results -työarkissa. Kuvassa 12 on esitetty, mihin kohtaan funktiota kertoimet lisätään. Funktion punaiselle kohdalle on tarkoitus valita kertoimet taulukosta.

```
IFS(Calculations!B16<=$B$15;SUM(M53+M77);Calculations!B16=$B$15;"";Calculations!B16>$B$15;"")
```

Kuva 12. Funktio putkivastuskertoimien summan laskemista varten.

Samassa työarkissa on myös taulukko tärkeimmistä tuloksista, kuten tiheydestä, tilavuusvirrasta, virtausnopeudesta, ulostulopaineesta sekä kokonaispainehäviöstä jokaiselle putken segmentille. Tällöin käyttäjän ei tarvitse etsiä suuresta laskentataulukosta tarvittavia tietoja. Taulukossa 7 on esitetty osa tulostaulukosta.

Taulukko 7. Tärkeimpien tulosten taulukko.

Pipe segment lengths [m]	Density [kg/m ³]	Volume Flow [m ³ /s]	Velocity [m/s]	Outlet pressure [kPa]	Total pressure drop [kPa]
5	22,3	0,0062	10,9	1695	4,6
10	22,3	0,0062	11,0	1691	4,6
15	22,2	0,0063	11,0	1686	5,7
20	22,1	0,0063	11,0	1680	4,9
25	22,1	0,0063	11,1	1676	4,7
30	22,0	0,0063	11,1	1671	4,7
35	21,9	0,0063	11,1	1666	4,7
40	21,9	0,0063	11,2	1662	4,7
45	21,8	0,0064	11,2	1657	4,7
50	21,8	0,0064	11,2	1652	4,7
55	21,7	0,0064	11,3	1647	4,7
60	21,6	0,0064	11,3	1643	10,7
65	21,5	0,0065	11,4	1632	4,8
70	21,4	0,0065	11,4	1627	4,8
75	21,4	0,0065	11,4	1622	4,8
80	21,3	0,0065	11,5	1617	4,8
85	21,2	0,0065	11,5	1613	4,8
90	21,2	0,0066	11,5	1608	6,9
95	21,1	0,0066	11,6	1601	4,9
100	21,0	0,0066	11,6	1596	4,9

Seuraava työarkki on nimeltään "Calculations", jossa varsinaiset laskelmat suoritetaan. Kuvassa 13 on esitetty, mitkä kaasun parametrit on laskettu. Tämä välilehti on esitetty liitteessä 5.

p_1 [Pa]	Pipe length [m]	Density of gas [kg/m ³]	Volume flow [m ³ /s]	Velocity [m/s]	Diameter [m]	Friction factor	Re	Outlet pressure [Pa]	Pressure drop due to friction [Pa]	Pressure drop due to pipe fittings [Pa]	Elevation difference [m]	Pressure drop due to elevation	Total pressure drop [Pa]
------------	-----------------	-------------------------------------	---------------------------------	----------------	--------------	-----------------	----	----------------------	------------------------------------	---	--------------------------	--------------------------------	--------------------------

Kuva 13. Otsikot laskentataulukosta.

Pipe diameters -välilehdessä on putkiluokat ja niille lasketut putken sisähalkaisijat. Nämä tiedot on otettu suoraan Outotec Oy:n nestevirtauksen laskentamallista, sillä ne ovat standardin mukaisia ja näin ollen pätevät myös kaasulinjastossa. Liitteessä 6 on esitetty osa kyseisestä välilehdestä.

Viimeinen työarkki on "Equations", jossa on esitetty kaikki laskentamallissa käytetyt kaavat. Kuvassa 14 näkyy osa niistä.

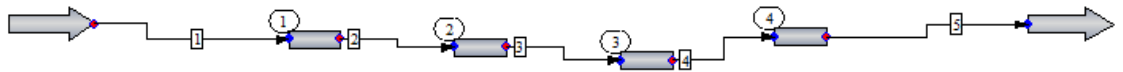
Equations used on this spreadsheet:	
$\dot{V} = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T \cdot Z}{M \cdot p}$	
$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \bar{v}}}$	
$\bar{v} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{D^2 \cdot \pi}$	
$Re = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot \rho}{\eta \cdot \pi \cdot D}$	
$\xi = \frac{64}{Re}$	

Kuva 14. Excel-laskentamallissa käytettyjen kaavojen työarkki.

Fill up & results -työarkin rakenne on sama kuin suojattu Example calculation for oxygen -työarkin. Erona on se, että suojattua työarkkia ei voi muokata.

6 Excel-laskentamallin luotettavuuden testaus

Excel-laskentamallin luotettavuuden arviointia varten käytettiin ChemCad-simulointiohjelmää. Tarkoituksena oli rakentaa ChemCadillä lyhyt kaasulinjasto ja testata, ovatko tulokset samanlaiset kuin laskentamallista saadut. Rakennettu kaasulinjasto koostui neljästä putkisegmentistä, eli tarkoitus oli verrata niitä Excel-laskentamallin neljän ensimmäisen rivin tuloksilla. Kuvassa 15 on esitetty ChemCadillä rakennettu kaasulinjasto.



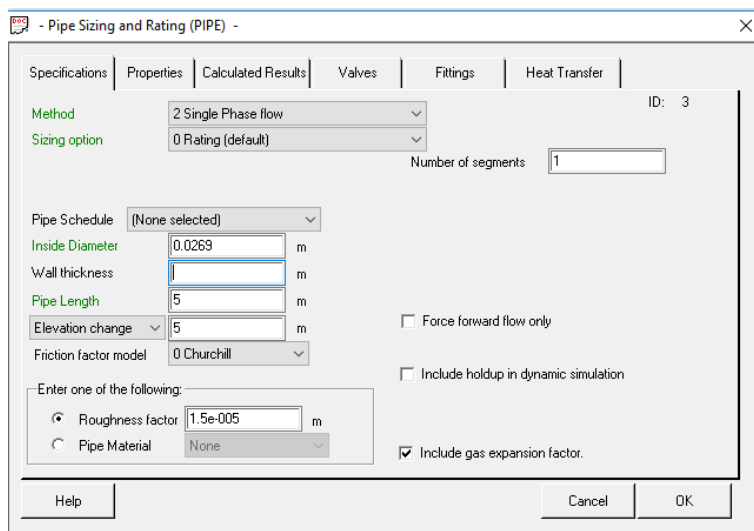
Kuva 15. ChemCad -simulointiohjelmalla rakennettu kaasulinjasto.

Kuten Excel-laskentamallissa, linjastossa virtaava kaasu on happi. Lähtöarvot syötettiin kuvan 16 mukaisesti sisääntulovirtaan.

Stream No.	1
Stream Name	
Temp C	20
Pres bar	17
Vapor Fraction	1
Enthalpy MJ/h	-4.531619
Total flow	500
Total flow unit	kg/h
Comp unit	kg/h
Oxygen	500

Kuva 16. ChemCadin kaasulinjaston sisääntulovirran lähtöarvot.

Seuraavaksi syötettiin jokaiselle putken pätkälle tarvittavat tiedot. Kuvassa 17 on esitetty kolmannelle putkisegmentille syötetyt arvot, jossa korkeusero on otettu huomioon.



Kuva 17. Syötetyt arvot kolmannelle kaasulinjaston putkisegmentille.

Taulukossa 8 on esitetty Excel-laskentamallin ja ChemCadin tulokset kaasulinjaston ensimmäiselle ja kolmannelle segmentille.

Taulukko 8. Ensimmäisen ja kolmannen segmentin tulokset.

	Ensimmäinen segmentti		Kolmas segmentti	
	Excel	ChemCad	Excel	ChemCad
Tiheys [kg/m ³]	22,3	22,6	22,2	22,4
Virtausnopeus [m/s]	10,9	10,8	11	10,9
Putkivastuskerroin [dimensioton]	0,0185	0,0186	0,0185	0,0186
Reynoldsin luku [dimensioton]	3,2*10 ⁵	3,2*10 ⁵	3,2*10 ⁵	3,2*10 ⁵
Ulostulopaine [bar]	16,9	16,9	16,9	16,9
Kitkasta johtuva painehäviö [kPa]	4,6	4,6	4,6	4,6
Korkeuserosta johtuva painehäviö [kPa]	0	0	1,1	1,1
Kokonaispainehäviö [kPa]	4,6	4,6	5,7	5,7

Vertaamalla Excel-laskentamallin ja ChemCadin tuloksia keskenään voidaan havaita, että ne ovat lähes samat. Pieni ero tiheyden ja virtausnopeuden välillä voi johtua puristuvuuskertoimesta, sillä laskentamallissa sen on oletettu olevan 1, kun taas ChemCadissa sen tarkka arvo on mahdollisesti otettu huomioon. Lisäksi simulointiohjelmassa on saatettu käyttää erilaisia yhtälöitä tulosten laskemiseksi, minkä voi myös vaikuttaa lopputuloksiin. Ero on kuitenkin mitätön, joten Excel-laskentamalli on todistetusti luotettava.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Outotec (Finland) Oy:lle luotettava ja käyttöystävällinen Excel-laskentamalli kaasulinjastojen painehäviöiden laskentaan. Ennen laskentaohjelman kehitystä oli olennaista tutustua aiheeseen ja varmistaa perehtymällä erilaisiin lähteisiin, että mallissa käytettävät yhtälöt pätevät kaasulinjastossa. Tämä osa opinnäytetyötä oli tärkeä, sillä nestelinjassa käytetyt yhtälöt ovat hyvin samanlaisia, ja niitä voi käyttää mm. jos käyttöpainet linjastossa ovat alhaisia, virtaus putkessa oletetaan isotermiseksi tai kaasun Machin luku on alle 0,3. Muussa tapauksessa kaasulinjastolle on tarkoitus käyttää yhtälöitä, joita on kehitetty adiabaattiselle virtaukselle. Suurin ero neste- ja kaasulinjassa on kaasun ominaisuuksien, kuten tiheyden, jatkuva muuttuminen, kun se virtaa linjan läpi. Tästä johtuen Excel-laskentamallissa putkisto täytyi jakaa segmentteihin, jotta kaasun ominaisuuksien sekä parametrien muutokset olisivat seurattavissa.

Yhtiön edustajalle esitettiin erilaisia yhtälöitä, joilla laskelmat voidaan suorittaa ja niistä valittiin sopivimmat laskentamalliin. Excel-laskentamallia kehitettäessä oli tärkeää miettiä, miten sitä voisi rakentaa, että se olisi mahdollisimman käyttäjäystävällinen. Käyttämällä erilaisia funktioita automatisointi onnistui, ja tällä tavalla siitä tuli selkeämpi. Laskentamallin rakenne muokattiin yhtiön edustajan toivomuksien mukaan.

Laskentamallin luotettavuutta testattiin ChemCad-simulointiohjelman avulla. Ohjelmalla rakennettiin kaasulinjasto ja käytettiin samoja lähtöarvoja kuin laskentamallin esimerkissä. Tarkoituksena oli varmistaa, että ChemCadin ja Excel-laskentamallin tulokset eivät poikkea toisistaan huomattavasti. Laskentamallin luotettavuus varmistui, sillä tulokset olivat lähes samat. Tiheyden laskemisessa havaittiin pieni ero, joka mahdollisesti johtuu siitä, että ChemCadissa käytetyt yhtälöt saattavat olla hieman erilaisia. Lisäksi laskentamallissa ei ole käytetty tarkkaa puristuvuuskertoimen arvoa, vaan sen on oletettu olevan 1. Jakamalla tiheyden tarkalla puristuvuuskertoimen arvolla huomattiin, että tulos oli sama kuin ChemCadilla laskettu tiheys.

Suurimmaksi osaksi insinööritöiden tavoitteet onnistuivat. Paikallisvastuskertoimien syöttöön voisi mahdollisesti miettiä parannuskeinoja. Niiden muutos jokaisessa segmentissä aiheuttaa sen, että jokaiselle putken pätkälle on valittava erikseen

kertoimet, mikä saattaa olla hieman työlästä käyttäjälle. Tämän ongelman voisi mahdollisesti ratkaista muodostamalla makroja.

Laskentamallin rakentamisen aikana Excel-ohjelman tietämykseni on kasvanut erittäin paljon, erityisesti funktioiden muodostamisessa. Mallia on mahdollista vielä kehittää tulevaisuudessa lisäämällä makroja, joiden avulla voi käyttää monimutkaisempia adiabaattiseen virtaukseen tarkoitettuja kaavoja. Tämä on kuitenkin hyvä mallipohja, jota voidaan kehittää eteenpäin erittäin tarkkojen ja realistisempien tulosten saavuttamiseksi.

Lähteet

- 1 Our business. Verkkoaineisto. Outotec. <<http://www.outotec.com/company/about-outotec/our-business/>>. Luettu 10.2.2019.
- 2 Factors affecting line sizing of piping or pipeline systems. 2019. Verkkoaineisto. What is Piping. <<http://www.whatispiping.com/factors-affecting-line-sizing-of-piping-or-pipeline-systems>>. Luettu 10.2.2019.
- 3 Kasch, Michael. 2007. Design calculations for oil and gas pipelines- Common aspects and specific topics. Verkkoaineisto. Pipeline technology conference. <<https://www.pipeline-conference.com/sites/default/files/papers/1.1%20Kasch.pdf>>. Luettu 15.4.2019.
- 4 Menachery, Martin. 2017. Air liquid Arabia open region's first hydrogen pipeline network. Verkkoaineisto. Refining & Petrochemicals. <<https://www.refiningandpetrochemicalsme.com/article-17289-air-liquide-arabia-opens-regions-first-hydrogen-pipeline-network>>. Luettu 4.4.2019.
- 5 Menon, E. Shashi. 2005. Gas Pipeline Hydraulics. E-kirja. Taylor & Francis Group.
- 6 Processes for ideal gases. 2017. Verkkoaineisto. Mechlectures. <<https://www.mechlectures.com/processes-ideal-gases/>>. Luettu 4.4.2019.
- 7 Definitions for ideal gas. Verkkoaineisto. Definitions. <<https://www.definitions.net/definition/ideal+gas>>. Luettu 5.4.2019.
- 8 Usman, Muhammad Rashid & Aslam, Rabya & Saleem, Mahmood. 2015. Chemical Engineering Terminology. Revised edition. Lulu.
- 9 Chua, Sean. 2010. What is a Real Gas. Verkkoaineisto. ALevelH2Chemistry. <<https://www.alevelh2chemistry.com/what-is-a-real-gas/>>. Luettu 15.1.2019.
- 10 Non ideal gas behavior. Verkkoaineisto. Lumen Learning. <<https://courses.lumenlearning.com/suny-albany-chemistry/chapter/non-ideal-gas-behavior/>>. Luettu 5.4.2019.
- 11 Bengtson, Harlan H. 2017. Natural Gas Pipeline Flow Equations. Harlan H. Bengtson.
- 12 Laine, Jouko. 1996. Kaasujen ainearvot prosessilaskentaa varten. Helsinki: Otatieto Oy.

- 13 Gases - Dynamic Viscosity. 2014. Verkkoaineisto. Engineering ToolBox. <https://www.engineeringtoolbox.com/gases-absolute-dynamic-viscosity-d_1888.html>. Luettu 10. 4.2019.
- 14 Water – Dynamic and Kinematic Viscosity. 2004. Verkkoaineisto. Engineering ToolBox. <https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html>. Luettu 10.4.2019.
- 15 Gas Viscosity Calculator. Verkkoaineisto. LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd. < <https://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.php>>. Luettu 14.1.2019.
- 16 Daniel Bernoulli: Bernoulli's principle and equation. 2019. Verkkoaineisto. Tecquipment academia. <<https://www.tecquipment.com/knowledge/2019/daniel-bernoulli-bernoullis-principle-and-equation>>. Luettu 7.4.2019.
- 17 Flow Rate and Its Relation to Velocity. Verkkoaineisto. Texas Gateway. <<https://www.texasgateway.org/resource/121-flow-rate-and-its-relation-velocity>>. Luettu 8.2.2019.
- 18 What is volume rate. Verkkoaineisto. Khan Academy. <<https://www.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-volume-flow-rate>>. Luettu 8.2.2019.
- 19 Pipeline design consideration and standards. Verkkoaineisto. SPE International. <https://petrowiki.org/Pipeline_design_consideration_and_standards>. Päivitetty 2.6.2015. Luettu 16.1.2019.
- 20 PSK 2401. Putkiston virtausnopeudet. 2009. PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 21 Virtaustekniikka prosessiteollisuudessa. 2016. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 22 Mononen, Kalle. 2015. Massaputkistojen virtaussuunnittelu. Insinööriyö. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 23 Classification of Flows, Laminar and Turbulent Flows. 2005. Verkkoaineisto. MDP. <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/pipeflow/node8.html>. Luettu 6.2.2019.
- 24 Bengtson, Harlan. Use the Friction Factor to Calculate Frictional Head Loss (Pressure Drop) for Pipe Flow. Verkkoaineisto. Bright Hub Engineering. < <https://www.brighthubengineering.com/hydraulics-civil-engineering/55227-pipe-flow-calculations-3-the-friction-factor-and-frictional-head-loss/>>. Luettu 16.1.2019.

- 25 Keskinen, Kari I. 2005. Taulukoita ja piirroksia kemian laitetekniikkaan. Helsinki: Otatieto.
- 26 Natural Gas Pipe Sizing Guide. Verkkoaineisto. DoItYourself. <<https://www.doityourself.com/stry/natural-gas-pipe-sizing-guide>>. Luettu 16.1.2019.
- 27 Miesner, O. Thomas & Leffler, L. William. 2006. Oil & Gas Pipelines. E-kirja. ProQuest Ebook Central.
- 28 Sumit, Shinde & Santosh Wankhede. 2018. Optimization of large size fabricated Y-Strainers for improvement in pressure drop value using CFD analysis. Verkkoaineisto. IJARIT. <<https://www.ijarrit.com/manuscripts/v4i4/V4I4-1374.pdf>>. Luettu 7.4.2019.
- 29 Adams, Danielle. 2019. Whats up with pressure drop. Verkkoaineisto. Alicat scientific. <<https://www.alicat.com/whats-up-with-pressure-drop/>>. Luettu 25.1.2019.
- 30 Pipe pressure drop calculations. Verkkoaineisto. Pipe Flow Software. <<https://www.pipeflow.com/pipe-pressure-drop-calculations>>. Luettu 25.1.2019.
- 31 Heat exchanger pressure drop and pumping power. 2016. Verkkoaineisto. Slideshare. <<https://www.slideshare.net/Khawwam/lecture-5-he-pressure-drop-and-pumping-power>>. Luettu 4.4.2019.
- 32 Darcy Weisbach. 2015. Verkkoaineisto. LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd. <<https://www.lmnoeng.com/DarcyWeisbach.php>>. Luettu 26.1.2019.
- 33 Kokoonpuristuvat virtaukset. Virtaustekniikka 3. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 34 Moshfeghian, Mahmood. 2009. How sensitive is pressure drop due to friction with roughness factor. Verkkoaineisto. John M. Campbell & Co. <<http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2009/03/how-sensitive-is-pressure-drop-due-to-friction-with-roughness-factor/>>. Luettu 26.1.2019.
- 35 What is hydrostatic pressure. Verkkoaineisto. Quora. <<https://www.quora.com/What-is-hydrostatic-pressure>>. Luettu 13.2.2019.
- 36 Large Diameter Pipelines. Verkkoaineisto. All about pipelines. <<http://www.allaboutpipelines.com/Article/Largediameterpipelines>>. Luettu 13.2.2019.

- 37 Putkivirtaus. Verkkoaineisto. Wiki. Metropolia.
<<https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/4.+Putkivirtaus>>. Päivitetty 26.8.2009. Luettu 7.4.2019.
- 38 Pressure drop evaluation along pipelines. Verkkoaineisto. PetroWiki.
<https://petrowiki.org/Pressure_drop_evaluation_along_pipelines#Pressure_drop_caused_by_valves_and_fittings>. Päivitetty 8.6.2015. Luettu 27.1.2019.
- 39 Pressure loss from fittings-Excess head (K) method. 2012. Verkkoaineisto. Neutrium. <https://neutrium.net/fluid_flow/pressure-loss-from-fittings-excess-head-k-method/>. Luettu 28.1.2019.
- 40 PSK 4201. Putkiluokat. 2017. Määrittely. 4. Painos. PSK Standardisointiyhdistys ry.
- 41 Wischnewski, Berndt. Calculation of thermodynamic state variables of oxygen. Verkkoaineisto. Peace software.
<https://www.peacesoftware.de/einigewerte/o2_e.html>. Luettu 9.4.2019.

Taulukko erilaisista venttiileistä ja paikallisvastuskertoimista

Fitting	Types	K
45° Elbow	Standard (R/D = 1)	0.35
	Long Radius (R/D = 1.5)	0.2
90° Elbow Curved	Standard (R/D = 1)	0.75
	Long Radius (R/D = 1.5)	0.45
90° Elbow Square or Mitred		1.3
180° Bend	Close Return	1.5
Tee, Run Through	Branch Blanked	0.4
Tee, as Elbow	Entering in run	1
Tee, as Elbow	Entering in branch	1
Tee, Branching Flow		1
Coupling		0.04
Union		0.04
Gate valve	Fully Open	0.17
	3/4 Open	0.9
	1/2 Open	4.5
	1/4 Open	24
Diaphragm valve	Fully Open	2.3
	3/4 Open	2.6
	1/2 Open	4.3
	1/4 Open	21
Globe valve, Bevel Seat	Fully Open	6
	1/2 Open	9.5
Globe Valve, Composition seat	Fully Open	6
	1/2 Open	8.5
Plug disk	Fully Open	9
	3/4 Open	13
	1/2 Open	36
	1/4 Open	112
Angle valve	Fully Open	2
Y valve or blowoff valve	Fully Open	3

Plug cock	$\theta = 5^\circ$	0.05
	$\theta = 10^\circ$	0.29
	$\theta = 20^\circ$	1.56
	$\theta = 40^\circ$	17.3
	$\theta = 60^\circ$	206
Butterfly valve	$\theta = 5^\circ$	0.24
	$\theta = 10^\circ$	0.52
	$\theta = 20^\circ$	1.54
	$\theta = 40^\circ$	10.8
	$\theta = 60^\circ$	118
Check valve	Swing	2
	Disk	10
	Ball	70
Foot valve		15
Water meter	Disk	7
	Piston	15
	Rotary (star-shaped disk)	10
	Turbine-wheel	6

Taulukko standardin PSK 4201 mukaisista materiaalitunnuksista

MATERIAALI Pipe material	TUNNUS Symbol	MATERIAALI Pipe material	TUNNUS Symbol
VALURAUDAT Cast irons	A	EI-RAUTAMETALLIT Non-ferrous metals	K
Suomugrafiittivalurauta Grey cast iron	A1	Nikkelpohjainen metalli Nickel alloy	K1
Pallografiittivalurauta Spheroidal graphite cast iron	A2	Titaani Titanium	K2
SEOSTAMATTOMAT TERÄKSET Non alloy steels	B	Alumiini ja alumiiniseos Aluminium and aluminium alloy	K3
Seostamaton teräs Non alloy steel	B1	Kupari ja kupariseos Copper and copper alloy	K4
KUUMALUJAT TERÄKSET Steel for elevated temperatures	C	Zirkonium Zirconium	K5
Kuumaluja seostamaton teräs Non alloy steels for elevated temperatures	C1	KESTOMUOVIT Thermoplastics	L
Mo-seosteinen teräs Mo-alloyed steel	C2	Kova polyeteeni (PEH) Hard polyethylene (PEH)	L1
13CrMo-seosteinen teräs 13CrMo-alloyed steel	C3	Pehmeä polyeteeni (PEL) Soft polyethylene (PEL)	L2
10CrMo-seosteinen teräs 10CrMo-alloyed steel	C4	Polypropeeni (PP) Polypropylene (PP)	L3
TULENKESTÄVÄT TERÄKSET Heat resistant steels	D	Polyvinyylikloridi (PVC) Polyvinyl chloride (PVC)	L4
VEDYN KESTÄVÄT TERÄKSET Hydrogen resistant steels	E	Polyvinylideenikloridi (PVDC) Polyvinylidene chloride (PVDC)	L5
KYLMÄSITKEÄT TERÄKSET Steels for low temperatures	F	Polyvinylideenifluoridi (PVDF) Polyvinylidene fluoride (PVDF)	L6
Kylmäsitkeä seostamaton teräs Non alloy steel for low temperatures	F1	Polytetrafluoreteeni (PTFE) Polytetrafluoroethylene (PTFE)	L7
ULKOPINNALTA PINNOITETUT TERÄKSET Externally coated steels	G	BETONIT Concretes	M
RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET Stainless steels	H	KERAAMIT Ceramics	R
Austeniittinen ruostumaton CrNi-teräs Austenitic stainless CrNi-steel	H1	LUJITEMUOVIT Reinforced plastics	S
Austeniittinen ruostumaton CrNiMo-teräs Austenitic stainless CrNiMo-steel	H2	Bisfenoli-A-polyesteri Bisphenol A-based polyester	S1
Austeniittis-ferritiittinen ruostumaton teräs Austenitic-ferritic stainless steel	H3	Vinyylesteri Vinylester	S1
Austeniittinen ruostumaton CrNiMoCu-teräs Austenitic stainless CrNiMoCu-steel	H4	Isoftaalipolyesteri Isophthalic polyester	S1
		MUUT Others	Z

Quick user guide -työarkki

QUICK USER GUIDE			
-The colors used on this spreadsheet are shown in the picture below:			
Fill up	Calculated	Constant	Final results
On the "Fill up & Results" sheet:			
-Enter values in the orange cells.			
-Select the adiabatic gas constants and roughness from the drop down lists.			
-The blue cells should not be modified.			
-Choose from the drop down list the length of the pipe segment, and add the total length of the pipe.			
-Add pipe length in which diameter changes and the new value of the diameter.			
-Add pipe length in which the elevation difference is and the value of the elevation.			
-In the orange column H (Local friction factors) , each cell takes the value from cell M85 which is zero. In order to change the value, choose which local friction factors (ξ) you would like to sum from Table 1. In cells that contain a function, add the chosen values inside the red part (Look at the example below):			
$IFS(\text{Calculations!B16}<\$B\$15;\text{SUM}(M53+M77);\text{Calculations!B16}=\$B\$15;"";\text{Calculations!B16}>\$B\$15;"")$			
 <p>Choose the values you would like to Sum from column M (Table 1.) of the "Fill up & results" sheet.</p>			
-All The final results will appear on the "Fill up & results" sheet.			
-Depending on the results, excel will inform if the flow is turbulent/laminar and compressible/incompressible.			
Pipe diameters are calculated/listed on the "Pipe diameters" sheet.			
Equations used on this spreadsheet are shown in the "Equations" sheet.			
On the "Example calculation for oxygen" sheet:			
An calculation example has been made in order to show how the spreadsheet works.			
-The calculations have been carried out for oxygen, assuming the inlet pressure is 17 bar, temperature is 20 celsius, pipe's total length is 200 m, and the mass flow is 500 mg/h.			
-The pipe segment length is 5 meters, and its material is stainless steel.			
-The starting internal diameter of the pipe is 26,9 mm, and it changes to 33,7 mm when pipe length is 101 meters.			
-The elevation difference is 5 meters when pipe length is 15 m, 10 meters in 90 m, and 15 meters in 180 m.			
-Lastly, local friction factors are selected when pipe length is 20 m, 60 m, 130 m and 195 m.			

Example calculation for oxygen –työarkki

Fill up	Enter values here	Units	Select material [mm]			
Inlet pressure	17	bar	stainless_steel	0,015		
Gas temperature	20	°C				
Gas viscosity	20,561	μPa*s	Select gas type			
Molar Mass	32	g/mol	Diatomic gases (N2, O2, H2, Air)			
Mass flow	500	kg/h	Adiabatic gas constant [γ]			
Compressibility factor	1		1,4			
			Constant values			
			Gas constant [R]	8,31446 J/K mol		
			Gravitational acceleration [g]	9,81 m/s^2		
Choose pipe segment length [m]			5			
Total pipe length [m]			200			
Add start length of diameter change [m]			0	100		
Enter pipe diameter [m]			0,0269	0,0337		
Add start length for elevation [m]			0	15		
Elevation difference [m]			0	10		
Determination of the type of flow (compressible/incompressible)						
Speed of sound [m/s]	Mach number					
326,550988	0,033531046	The flow is incompressible.				
Friction factor depending on the type of flow						
The flow is Turbulent.						
Pipe segment lengths [m]	Density [kg/m^3]	Volume Flow [m^3/s]	Velocity [m/s]	Outlet pressure [kPa]	Total pressure drop [kPa]	Local friction factors (dimensionless)
5	22,3	0,0062	10,9	1695	4,6	0
10	22,3	0,0062	11,0	1691	4,6	0
15	22,2	0,0063	11,0	1686	5,7	0
20	22,1	0,0063	11,0	1680	4,9	0,17
25	22,1	0,0063	11,1	1676	4,7	0
30	22,0	0,0063	11,1	1671	4,7	0
35	21,9	0,0063	11,1	1666	4,7	0
40	21,9	0,0063	11,2	1662	4,7	0
45	21,8	0,0064	11,2	1657	4,7	0
50	21,8	0,0064	11,2	1652	4,7	0
55	21,7	0,0064	11,3	1647	4,7	0
60	21,6	0,0064	11,3	1643	10,7	4,3
65	21,5	0,0065	11,4	1632	4,8	0
70	21,4	0,0065	11,4	1627	4,8	0
75	21,4	0,0065	11,4	1622	4,8	0
80	21,3	0,0065	11,5	1617	4,8	0
85	21,2	0,0065	11,5	1613	4,8	0
90	21,2	0,0066	11,5	1608	6,9	0
95	21,1	0,0066	11,6	1601	4,9	0
100	21,0	0,0066	11,6	1596	4,9	0
105	21,0	0,0066	7,4	1594	1,6	0
110	20,9	0,0066	7,4	1593	1,6	0
115	20,9	0,0066	7,4	1591	1,6	0
120	20,9	0,0066	7,5	1590	1,6	0
125	20,9	0,0067	7,5	1588	1,6	0
130	20,9	0,0067	7,5	1587	2,8	2,05
135	20,8	0,0067	7,5	1584	1,6	0
140	20,8	0,0067	7,5	1582	1,6	0
145	20,8	0,0067	7,5	1581	1,6	0
150	20,8	0,0067	7,5	1579	1,6	0
155	20,7	0,0067	7,5	1578	1,6	0
160	20,7	0,0067	7,5	1576	1,6	0
165	20,7	0,0067	7,5	1574	1,6	0
170	20,7	0,0067	7,5	1573	1,6	0
175	20,6	0,0067	7,5	1571	1,6	0
180	20,6	0,0067	7,5	1570	4,6	0
185	20,6	0,0068	7,6	1565	1,6	0
190	20,5	0,0068	7,6	1563	1,6	0
195	20,5	0,0068	7,6	1562	7,5	10,04
200	20,4	0,0068	7,6	1554	1,6	0

Fitting	Types	ζ
45° Elbow	Standard (R/D=1)	0,35
	Long Radius (R/D=1,5)	0,2
90° Elbow Curved	Standard (R/D=1)	0,75
	Long Radius (R/D=1,5)	0,45
90° Elbow Square or Mitred		1,3
180° Bend		1,5
Tee, Run through	Branch Blanked	0,4
Tee, as Elbow	Entering in run	1
Tee, as Elbow	Entering in branch	1
Tee, Branching Flow		1
Coupling		0,04
Union		0,04
Gate valve	Fully Open	0,17
	3/4 Open	0,9
	1/2 Open	4,5
Diaphragm valve	1/4 Open	24
	Fully Open	2,3
	3/4 Open	2,6
	1/2 Open	4,3
	1/4 Open	21
Globe valve, Bevel Seat	Fully Open	6
	1/2 Open	9,5
Globe valve, Composition seat	Fully Open	6
	1/2 Open	8,5
Plug disk	Fully Open	9
	3/4 Open	13
	1/2 Open	36
	1/4 Open	112
Angle valve	Fully Open	2
Y valve or blowoff valve	Fully Open	3
Plug cock	θ= 5°	0,05
	θ= 10°	0,29
	θ= 20°	1,56
	θ= 40°	17,3
	θ= 60°	206
Butterfly valve	θ= 5°	0,24
	θ= 10°	0,52
	θ= 20°	1,54
	θ= 40°	10,8
	θ= 60°	118
Check valve	Swing	2
	Disk	10
	Ball	70
Foot valve		15
Water meter	Disk	7
	Piston	15
	Rotary (star-shaped)	10
	Turbine-wheel	6
		0

Calculations –työarkki

p1 [Pa]	Pipe length [m]	Density of gas [kg/m³]	Volume flow [m³/s]	Velocity [m/s]	Diameter [m]	Friction factor	Re	Outlet pressure [Pa]	Pressure drop due to friction [Pa]	Pressure drop due to pipe fittings [Pa]	Elevation difference [m]	Pressure drop due to elevation	Total pressure drop [Pa]
1700000	5	22.31901134	0.006222896	10.94959635	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1695402.013	4597.986843	0	0	0	4597.9868
1695402.013	10	22.25864515	0.006239773	10.97929202	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1690791.522	4610.490693	0	0	0	4610.4907
1690791.522	15	22.1981148	0.006256788	11.00923061	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1686168.425	4623.097112	0	5	1088.817531	5711.9146
1685079.608	20	22.12312405	0.006277996	11.0465486	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1680440.797	4638.812111	229.4661323	0	0	4868.2773
1680211.33	25	22.05920926	0.006296186	11.07855509	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1675559.041	4652.289058	0	0	0	4652.2891
1675559.041	30	21.99813015	0.006313668	11.10931536	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1670893.799	4665.24243	0	0	0	4665.2424
1670893.799	35	21.93688097	0.006331296	11.14033328	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1666215.494	4678.304607	0	0	0	4678.3046
1666215.494	40	21.87546603	0.006349073	11.17161247	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1661524.017	4691.477121	0	0	0	4691.4771
1661524.017	45	21.8138667	0.006367	11.20315662	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1656819.256	4704.761532	0	0	0	4704.7615
1656819.256	50	21.75209868	0.00638508	11.23496949	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1652101.096	4718.159436	0	0	0	4718.1594
1652101.096	55	21.69015477	0.006403315	11.26705492	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1647369.424	4731.672457	0	0	0	4731.6725
1647369.424	60	21.62803344	0.006421707	11.29941683	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1642624.122	4745.302553	5937.006875	0	0	10682.3091
1642624.122	65	21.56577722	0.006440362	11.33316572	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1637910.751	4776.364186	0	0	0	4776.3642
1637910.751	70	21.50329915	0.00645938	11.36745331	0.0269	0.01846380	3.20E+05	1633210.366	4790.385003	0	0	0	4790.3850
1633210.366	75	21.44061899	0.006478623	11.4023491	0.0269	0.01846380	3.20E+05	16285215.835	4804.530022	0	0	0	4804.5300
16285215.835	80	21.37910914	0.006498078	11.43791487	0.0269	0.01846380	3.20E+05	16238497.034	4818.801088	0	0	0	4818.8011
16238497.034	85	21.3184391	0.006518305	11.47439763	0.0269	0.01846380	3.20E+05	16191910.834	4833.200084	0	0	0	4833.2001
16191910.834	90	21.25859965	0.006539306	11.51258773	0.0269	0.01846380	3.20E+05	16145481.105	4847.728933	0	10	2077.011425	6924.7404
16145481.105	95	21.19947991	0.006561096	11.55236507	0.0269	0.01846380	3.20E+05	16099160.396	4862.898179	0	0	0	4862.8982
16099160.396	100	21.14175556	0.006583623	11.59276207	0.0269	0.01846380	3.20E+05	16052958.845	4883.550501	0	0	0	4883.5505
16052958.845	105	20.95344029	0.006606943	11.63376043	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1594428.081	1558.764725	0	0	0	1558.7647
1594428.081	110	20.93297554	0.006631933	11.675325473	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1592867.79	1560.290117	0	0	0	1560.2901
1592867.79	115	20.91249075	0.006658432	11.718481864	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1591305.97	1561.819995	0	0	0	1561.8200
1591305.97	120	20.89198588	0.006685511	11.76319709	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1589742.616	1563.354382	0	0	0	1563.3544
1589742.616	125	20.87146087	0.006713196	11.80949114	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1588177.723	1564.8933	0	0	0	1564.8933
1588177.723	130	20.85091565	0.006741485	11.85730185	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1586611.286	1566.436772	1191.885057	0	0	2758.3218
1586611.286	135	20.83034211	0.006770394	11.90663207	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1585053.236	1567.984765	0	0	0	1567.9848
1585053.236	140	20.79410081	0.006799845	11.95749137	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1582279.515	1570.720923	0	0	0	1570.7209
1582279.515	145	20.77347909	0.006829857	11.99986764	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1580707.234	1573.281172	0	0	0	1573.2812
1580707.234	150	20.75283687	0.006860425	12.04379324	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1579133.386	1575.841719	0	0	0	1575.8417
1579133.386	155	20.73217409	0.006891596	12.089291301	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1577557.969	1578.41323	0	0	0	1578.4133
1577557.969	160	20.71149071	0.006923386	12.13646181	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1575980.977	1576.992176	0	0	0	1576.9922
1575980.977	165	20.69078664	0.006955796	12.185299576	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1574402.405	1578.571762	0	0	0	1578.5718
1574402.405	170	20.67006184	0.006988826	12.23571401	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1572822.249	1580.156103	0	0	0	1580.1561
1572822.249	175	20.64931624	0.007022477	12.287708366	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1571240.504	1581.745225	0	0	0	1581.7452
1571240.504	180	20.62854978	0.007056748	12.341294489	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1569657.165	1583.339115	0	15	3035.4911	4618.8303
1569657.165	185	20.56790994	0.007091648	12.396483945	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1568073.662	1584.939198	0	0	0	1584.9392
1568073.662	190	20.5470612	0.007127195	12.45329653	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1566484.037	1586.544693	0	0	0	1586.5447
1566484.037	195	20.52619128	0.007163423	12.51174091	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1564889.794	1588.156292	5929.676304	0	0	7520.8192
1564889.794	200	20.42745041	0.007199313	12.62609214	0.0337	0.01815006	2.55E+05	1554324.175	1598.942392	0	0	0	1598.9424

