

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

## Prosessihöyrylinjoissa tapahtuva painehäviö

Työn tarkastaja: Aki Grönman

Työn ohjaaja: Aki Grönman

Lappeenranta 18.8.2020

Andrei Zaitsev

# TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Andrei Zaitsev

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aki Grönman

Kandidaatintyö 2020

36 sivua, 17 kuvaa, 10 taulukkoa

Hakusanat: prosessihöyry, painehäviö, selvitys

Adven Oy:n Joutsenon energialaitoksilla tuotetaan prosessihöyryä ja osa sähkön tarpeista Kemira Chemicals Oy:n tehtaita varten. Tehtailla valmistetaan natriumkloraattia, lipeää, suolahappoa ja natriumhypokloriittia. Kyseisten tuotteiden valmistuksessa syntyy sivutuotteena vetykaasua. Osa vetykaasusta toimitetaan energialaitoksille, jossa sitä polttamalla tuotetaan tuorehöyryä ja prosessihöyryä.

Työn tarkoituksena oli tarkastella painehäviöt prosessihöyrylinjoissa energialaitoksilta tehtaisiin saakka. Tavoitteena oli selvittää, missä kohtaa tapahtuu suurimmat painehäviöt putkistolinjoissa, sekä tarkastella kuinka putkilinjojen geometria ja komponentit vaikuttavat painehäviöihin. Selvitystä varten prosessihöyrylinjoista luotiin malli fluidflow ohjelmalla, jolla suoritettiin laskutoimitukset höyryn painehäviöille putkistolinjoissa. Ohjelmasta ulos saatiin Excel-pohjainen tiedosto tuloksien kanssa, mistä nähdään kuinka kukin komponentti ja putkistolinja vaikuttaa painehäviöihin prosessissa.

Fluidflow-mallin tuloksien perusteella pystyttiin tutkimaan kuinka höyryn paine muuttuu kulkiessaan putkistolinjojen läpi, sekä selvitettiin missä kohtaa prosessihöyrylinjoissa tapahtuu suurimmat painehäviöt. Analysoimalla saatuja tuloksia myös tarkasteltiin mahdollisuuksia vähentää putkistolinjoissa tapahtuvia painehäviöitä.

# SISÄLLYSLUETTELO

## Tiivistelmä

## Sisällysluettelo

<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Laitosten rakenne</b>	<b>7</b>
2.1 Höyrykattila .....	10
2.1.1 Lieriö .....	11
2.1.2 Tulistin.....	12
2.1.3 Syöttöveden esilämmitys .....	12
2.2 Syöttövesisäiliö .....	12
2.3 Lämmönsiirtimet.....	13
2.4 Höyryturbiini .....	13
2.5 Lauhdutin .....	14
<b>3 Painehäviö putkivirtauksessa</b>	<b>14</b>
3.1 Kitkapainehäviö .....	15
3.2 Paikallishäviö.....	18
3.3 Kokonaispainehäviö putkivirtauksessa .....	20
<b>4 Prosessihöyrylinjojen tarkastelu</b>	<b>21</b>
<b>5 Prosessihöyrylinjojen painehäviöt</b>	<b>29</b>
<b>6 Johtopäätökset</b>	<b>34</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>36</b>

## SYMBOLILUETTELO

$\Delta p$	Paine-ero, Pa
$f$	Kitkakerroin, [-]
$L$	Pituus, [m]
$D_h$	Hydraulinen sisähalkaisija, [m]
$\rho$	Aineen tiheys, $[\text{kg}/\text{m}^3]$
$V_{avg}$	Keskimääräinen nopeus, $[\text{m}/\text{s}]$
$A$	Pinta-ala, $[\text{m}^2]$
$p$	Märkäpiiri, [m]
$Re$	Reynoldsin luku, [-]
$\mu$	Dynaaminen viskositeetti, $[\text{Ns}/\text{m}^2]$
$K_L$	Kertavastuskerroin, [-]
$g$	Putoamiskiihtyvyys, $[\text{m}/\text{s}^2]$
$\alpha$	Kulma, $[\text{°}]$
$q_m$	Massavirta, $[\text{kg}/\text{s}]$
$h$	Entalpia, $[\text{kJ}/\text{kg}]$
$Q$	Kattilan teho, [MW]

### Yläindeksit

˘	Kylläinen vesi
˝	Kylläinen höyry

**Alaindeksit**

<i>v</i>	Vesi
<i>h</i>	Höyry
<i>in</i>	Sisääntulo
<i>out</i>	Ulostulo
<i>i</i>	Viittaa kaikkiin putkiin
<i>j</i>	Viittaa putkilinjan komponentteihin
<i>k</i>	Viittaa pystysuunnassa oleviin putkiin

**Lyhenteet**

abs	Absoluuttinen paine
-----	---------------------

# 1 JOHDANTO

Adven Oy:n Joutsenon energialaitoksilla tuotetaan prosessihöyryä ja osan sähkön tarpeista Kemira Chemicals Oy:n tehtaita varten. Tehdasalueella on lipeätehdas, jossa valmistetaan lipeää, suolahappoa ja natriumhypokloriitti, sekä kaksi klooraattitehdasta, joissa valmistetaan natriumklooraattia. Kyseisten aineiden valmistuksessa sivutuotteena syntyy vetykaasua, jonka osa siirretään tehdasalueella sijaitsevalla voimalaitokselle, jossa sitä polttamalla tuotetaan tuore -ja prosessihöyryä.

Työn päämäärä on tarkastella painehäviöt prosessihöyrylinjoissa voimalaitokselta tehtaisiin saakaan. Tavoitteena on selvittää, missä kohtaan tapahtuu suurimmat painehäviöt putkistolinjoissa, sekä tarkastella kuinka putkilinjojen geometria ja komponentit vaikuttavat painehäviöihin. Selvitystä varten prosessihöyrylinjoista luodaan malli fluidflow ohjelmalla, jolla suoritettujen laskutoimituksien tuloksien perusteella saadaan selville höyryyn painehäviöt putkistolinjoissa.

Työssä tarkastellaan myös laitojen rakennetta ja putki virtauksen painehäviön laskentamallin teoriaa. Käydään prosessihöyry linjoja yksityiskohtaisemmin läpi, sekä lopuksi analysoidaan saatuja tuloksia, joiden pohjalta tarkastellaan mahdollisuuksia vähentää putkistolinjoissa tapahtuvia painehäviöitä.

Energialaitosten höyryyn tuotantoon vaikuttaa olennaisesti vedyn saatavuus, mikä riippuu tehtaiden tuotannosta. Tehtaiden tuotannossa tapahtuu välillä vaihtelua, minkä seurauksena myös energialaitosten ajotapa muuttuu. Tässä työssä tarkastellaan energialaitosten yleisintä ajotapaa, joka saadaan selville analysoimalla vuoden edestä kerättyä dataa prosessihöyryyn massavirroista putkistolinjoissa.

Energialaitoksien kokonaisuus voidaan jakaa voimalaitokseen ja apukattilalaitokseen. Molemmat laitokset käyttävät primääri polttoaineena tehtailta tulevaa vetyä. Voimalaitos korvaa lipeätehtaan höyryyn tarpeet kokonaan ja osan klooraattitehtaan N3:en tarpeista. klooraattitehtaat voidaan jakaa kulutuskohteisiin, joiden koodi nimet ovat N1, N2 ja N3. Apukattilalaitos korvaa klooraattitehtaan N1 ja N2 höyryyn tarpeet, sekä tukee pääkattilalaitokselta tulevaa prosessihöyry linjaa, joka menee N3:lle.



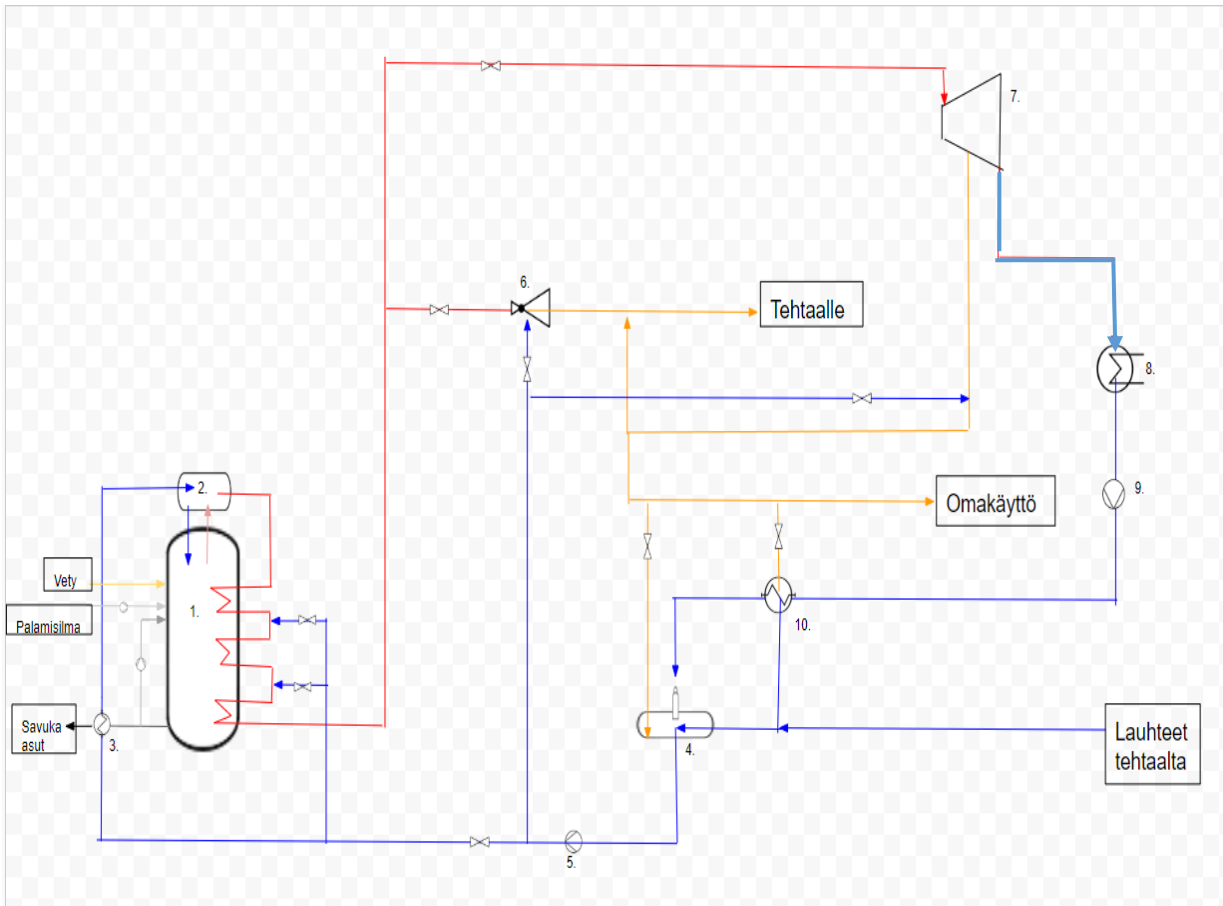
**Kuva 1:** Energialaitokset ja tehtaat.(Google maps)

## 2 LAITOSTEN RAKENNE

Höyryvoimalaitokset voidaan jakaa lauhde- ja vastapainevoimalaitoksiin. Lauhdevoimalaitokset tuottavat vain sähköä, koska turbiinin jälkeinen höyrynpaine ja lauhtumislämpötilat ovat niin alhaiset, että sitä ei voida hyödyntää lämmityksessä. Vastapainevoimalaitoksissa taas höyryn paine ja lauhtumislämpötila ulos tullessaan turbiinista on hyvin korkea, minkä seurauksena höyry voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämmön, teollisuuden prosessihöyryn ja sähkön tuottoon. (Huhtinen et al 2013, 12)

Tarkastellaan laitosten yksinkertaistetut prosessi mallit, joissa käydään läpi vain laitosten pääkomponentit. Prosesseissa siniset linjat kuvaavat veden virtausta, oranssi linjat prosessihöyryä ja punaiset linjat korkeapaineista höyryä, sekä vaalean sininen linja turbiinin jälkeen kuvaa alipaineessa olevaa höyryä. Voimalaitoksen prosessi kuvasta nähdään, että tarvittava prosessihöyry saadaan joko

turbiinin väliotosta tai suoraan reduktioventtiilin kautta. Tehtaalle menevä linja tarkoittaa lipeätehdasta ja kloraatti tehtaita.



**Kuva 2:** Voimalaitoksen prosessi (Process Flow Diagram Template, The Engineering ToolBox)

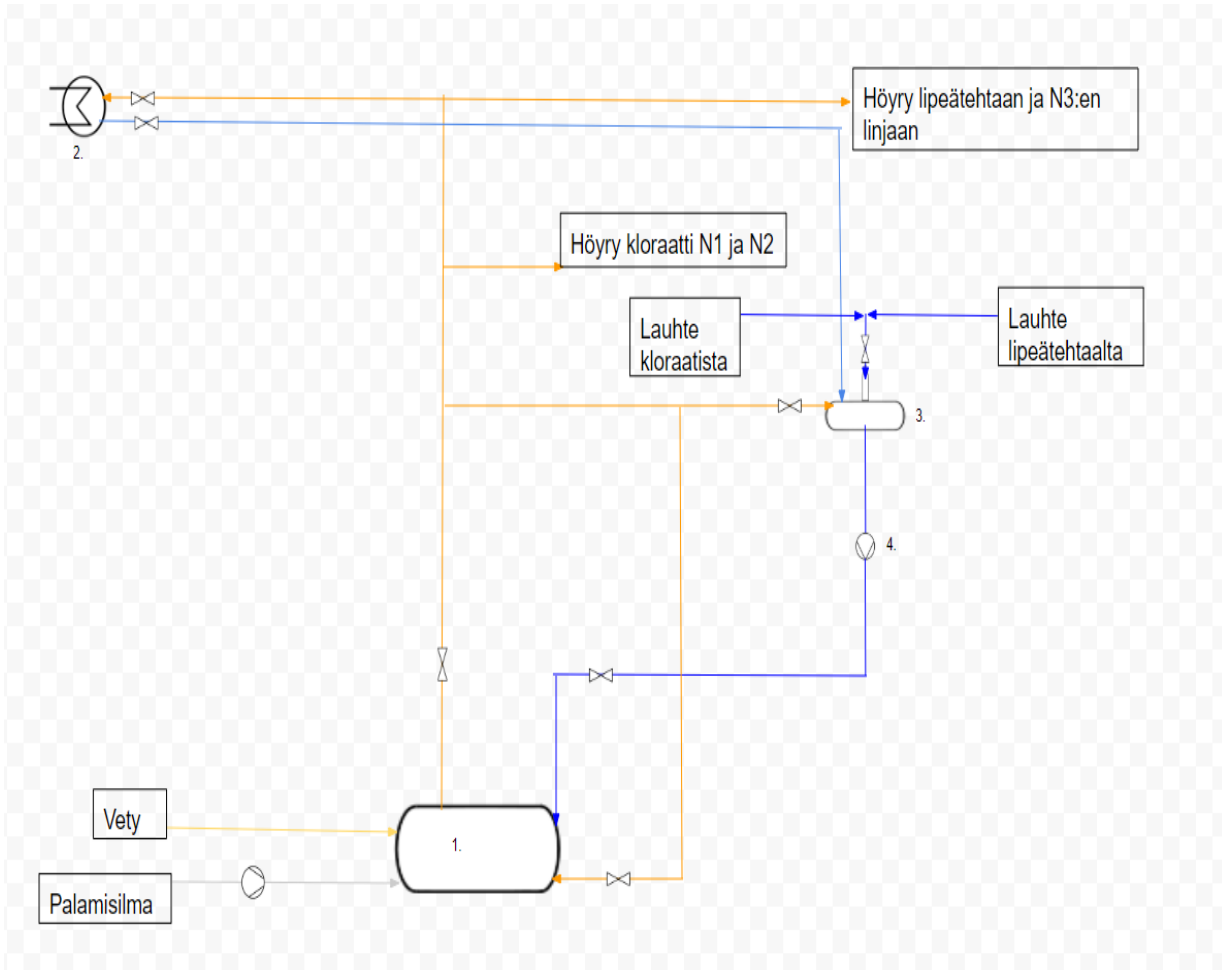
- |                     |                               |                     |                |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|
| 1. Höyrykattila     | 6. Reduktioventtiili          | 2. Lieriö           | 7. Turbiini    |
| 3. Ekonomaiseri     | 8. Lauhdutin                  | 4. Syöttövesisäiliö | 9. Lauhepumppu |
| 5. Syöttövesipumppu | 10. Matalapaine lämmönsiirrin |                     |                |

Omakäyttö linjalla tarkoitetaan omakäyttö höyryä, joka käytetään esimerkiksi turbiinin akselin tiivistykseen, lauhduttimien tyhjiöejektoreissa , lisäveden/lauhteiden lämmitykseen ja rakennuksen lämmitykseen. (Kärkkäinen, 30-31)

Apukattilalaitoksen prosessi kuvasta nähdään, että tarvittava prosessihöyry tuotetaan suoraan höyrykattilalla. Kattilalta lähtevät linjat yhdistyvät kaikkien tehtaiden kanssa. Tarvittaessa voimalaitos voi tuottaa prosessihöyryä kaikkia tehtaita varten riippuen tilanteesta. Apukattilalaitos



prosessissa nähdään myös kaukolämpö vaihdin, jossa höyry lauhtuessa luovuttaa lämpöä verkostossa virtaavaan veteen. Kaukolämpöä tuotetaan Joutsenon keskustaajaman alueelle.



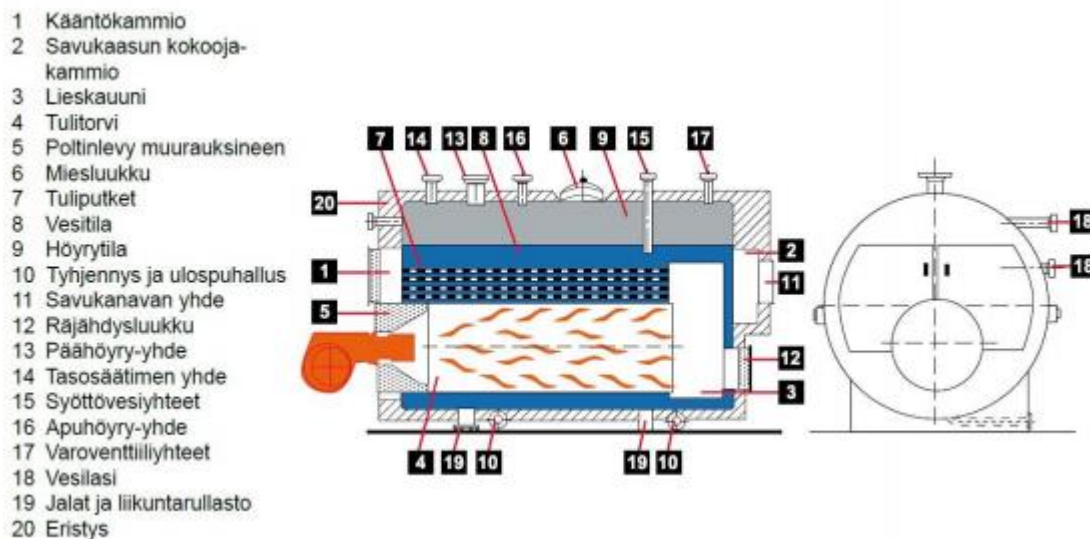
**Kuva 3:** Apukattilalaitoksen prosessi (Process Flow Diagram Template, The Engineering ToolBox)

- |                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| 1. Höyrykattila     | 2. Kaukolämpö vaihdin |
| 3. Syöttövesisäiliö | 4. Syöttövesipumppu   |

Laitosten ajotapa muuttuu riippuen tehtaiden tuotannon vaihteluista. Tässä työssä tarkastellaan laitosten yleisintä ajotapaa, joka saadaan selville analysoimalla vuoden edestä kerättyä dataa höyryn massavirroista putkistolinjoissa.

## 2.1 Höyrykattila

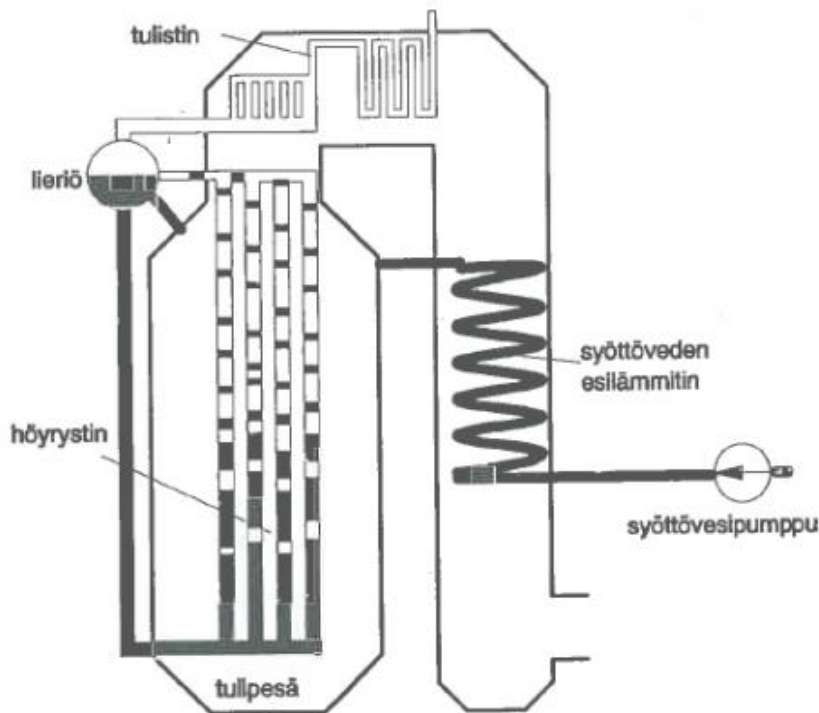
Höyrykattilat ovat joko suurvesikattilat tai vesiputkikattilat. Apukattilalaitoksen höyrykattila kuuluu suurvesikattiloihin, joka on tulitorvi-tuliputkikattila. Se soveltuu hyvin matalapaineisen höyryn tuottamiseen, missä paine on yleensä alle 20 bar:a. Tämän tyyppisissä kattiloissa polttoaine palaa tulitorvessa ja sen jälkeen savukaasut siirtyvät kääntökammioista veden ympäröimiin tuliputkiin, joissa savukaasut luovuttavat lämpöä vedelle lämmittäen tai höyrystäen sitä. Tulitorvi-tuliputkikattila käyttää polttoaineena tavallisesti joko kaasua tai öljyä. (Latvala, 10-11)



**kuva 4:** Tulitorvi-tuliputkikattila(Nyman 2016, 12)

Apukattilalaitoksen tulitorvi-tuliputkikattilaa ajetaan tavallisesti 3-5 MW:n teholla tuottaen noin 7,5 bar:n paineessa olevaa kylläistä höyryä. Primääri polttoaineena käytetään tehtailta tulevaa vetyä ja vara polttoaineena on kevyt polttoöljy.

Vesiputkikattilat voidaan jakaa kolmeen osaan luonnonkiertokattilat, pakkokiertokattilat ja läpivirtauskattilat (Huhtinen et al 2000, 111). Luonnonkiertokattilan toiminta perustuu veden ja höyryn tiheyseroihin. Kattilassa tuorehöyryn lämpötila on suuremmillaan 500-600 °C ja käyttöpaine pitää olla alle 170 bar:a, koska suuremmilla paineilla veden ja höyryn tiheydet lähestyvät toisiaan, minkä seurauksena luonnonkierron toiminta hankaloituu. Kattilan yläpuolella sijaitsee lieriö, josta vesi siirtyy kattilan ulkopuolella olevia laskuputkia pitkin höyrystimen alaosaan. Osa vedestä alkaa höyrystymään ja tiheyseron vuoksi kevyempänä vesi/höyry seos virtaa nousuputkia pitkin ylös takaisin lieriöön, jossa tapahtuu veden ja höyryn erotus. Vesi palautetaan laskuputkiin ja höyry siirtyy tulistimiin. (Latvala 2015, 11-12)



**kuva 5:** Luonnonkiertokattila (Huhtinen et al 2000, s.113)

Voimalaitoksella on käytössä luonnonkiertokattila, joka tuottaa tulistuksen jälkeen noin 500 °C:sta höyryä 60 bar:n paineessa. Primääri polttoaineena käytetään tehtaalta tulevaa vetyä ja vara polttoaineena on maakaasua. Kattilaa ajetaan tavallisesti noin 15 MW:n teholla.

Pakkokiertokattilan rakenne on melkein samanlainen kuin luonnonkiertokattilan. Korkeamman käyttöpaineen vuoksi luonnonkierto vaikeutuu, minkä seurauksena vesi siirretään lieriöstä höyrystimeen pakkokiertopumpun avulla. Tuorehöyryn käyttöpainne on oltava suuremmillaan 190 bar:a.(Latvala 2015, 13)

Läpivirtauskattila ei tarvitse lieriötä, eikä siellä tapahdu kattilan sisäistä kiertoa. Kattilaan syötetty vesi kulkee esilämmittimen läpi suoraan höyrystimeen ja sieltä tulistimeen. Kattila voi toimia ylikriittisellä paineella ja nykypäivänä käyttöpainneet voivat olla 250 - 300 bar:a. (Teir et al 2003, 65)

### 2.1.1 Lieriö

Lieriö on yksi tärkeimmistä komponenteista luonnonkierto -ja pakkokiertokattiloissa. Lieriöön syötetty vesi ensiksi sekoitetaan kattilassa kiertävän veden kanssa, minkä seurauksena vähennetään lämpörasituksia. Lieriöstä vesi siirtyy laskuputkia pitkin höyrystimen alaosaan, missä se muuttuu vesi/höyry seokseksi ja tiheyseron vuoksi siirtyy nousuputkia pitkin ylös lieriöön. Lieriössä höyry

erotetaan vedestä syklonien ja yksi -tai kaksivaiheisilla pisaranerottimilla. Vesi palautetaan laskuputkiin ja höyry siirtyy kylläisenä tulistimille. Höyryn höyrypitoisuus on pidettävä maksimaalisena, koska vesipisarat höyryssä aiheuttaisivat eroosiota tulistimien putkissa. Myös lieriön vedessä olevat epäpuhtaudet puhalletaan jatkuvasti pois, minkä vuoksi ehkäistään niiden pääsyä höyryn mukaan. Voimalaitoksella lieriössä vallitseva paine on noin 60 bar:a. (Teir et al 2003, 73-75).

### 2.1.2 Tulistin

Lieriöstä lähtevä kylläinen höyry siirtyy tulistinputkiin, jossa sen lämpötila nostetaan pitämällä paine vakiona. Tällaista höyryä kutsutaan tulistetuksi höyryksi ja se ei sisällä kosteutta. Höyryn tulistus on hyödyllistä höyrylinjoissa olevan lauhteen poistamiseksi, sekä turbiinista ulos tulevan höyryn kosteuden vähentämiseksi. Yleisempiä tulistimia ovat säteilytulistin, yhdistelmätulistin, verhotulistin ja konvektiotulistin. Voimalaitoksella tulistinputkiin menevä kylläinen höyry on 60 bar:n paineessa noin 275 °C:en lämpötilassa ja tulistuksen jälkeen lämpötila nousee noin 500 °C:en. (Teir et al 2003, 107-109)

### 2.1.3 Syöttöveden esilämmitys (Ekonomaiseri)

Syöttöveden esilämmitin, joka kuuluu savukaasuesilämmittimiin kutsutaan nimellä EKO tai ekonomaiseri. Kattilassa ekonomiseri sijaitsee tavallisesti tulistimen ja palamisilmanesilämmittimen välissä. Kuumilla savukaasuilla lämmitetään lieriöön menevää syöttövedettä, minkä seurauksena kattilan hyötysuhde nousee, sillä energiaa ei mene hukkaan lieriössä tulevan veden lämmitykseen. Lieriöön menevän syöttöveden lämpötila pidetään noin 10 °C kyllästys lämpötilaa alhaisempana, minkä seurauksena estetään veden kiehuminen ennen kuin se on saavuttanut höyrytintä. Esilämmittimestä lähtevän savukaasun lämpötila yleensä ei saa laskea alle 150 °C, koska siinä tapauksessa savukaasu saavuttaa niin sanotusti kastepistettä, minkä seurauksena aiheuttaa korroosiota esilämmittimessä. Voimalaitoksella esilämmittimeen menevän savukaasun lämpötila on noin 350 °C ja siitä lähtevän syöttöveden lämpötila noin 265 °C. (Teir et al 2003, 107)

## 2.2 Syöttövesisäiliö

Tavallisesti syöttövesisäiliöön syötetään lauhde vettä lauhduttimesta, matalapaineista höyryä ja puhdistettua lisävedettä. Syöttövesisäiliön tehtäviin kuuluu poistaa kaasut (happi ja hiilidioksidi) vedestä, sekä toimia avoimena lämmönvaihtimena. Kaasu poistetaan kemikaalien avulla tai termisesti lämmittäen vettä. Matalapaineisen höyryn avulla saadaan nostettua lämpötila, minkä myöten veden

happipitoisuus laskee. Käyttäen termistä vaihtoehtoa voidaan säästää kemikaaleja. Kaikki syöttövesisäiliöön sisään tulevat virtaukset joutuvat ensin säiliön yläosassa olevaan kaasunpoistimeen, jossa tapahtuu kaasun poistaminen syöttövedestä. Tämän jälkeen höyry siirtyy kaasunpoistimesta suuttimiin, jotka ovat tavallisesti veden alla, lämmittäen säiliössä olevaa vettä tasaisesti. Vesi poistuu syöttövesisäiliöstä kylläisessä tilassa kohti syöttövesipumppua, joka nostaa syöttöveden paineen riittävän suureksi päästääkseen lieriöön. Voimalaitoksen syöttövesisäiliöön tulee lauhdevettä lauhduttimesta, lauhteet tehtaalta ja omakäyttöhöyrylinjasta otettua lämmityshöyry. Lisävesi linja yhdistyy lauhdevesi linjan kanssa. Syöttövesisäiliössä vallitsee noin 1,4 bar:n paine. Apukattilalaitoksen syöttövesisäiliössä on noin 0.40 bar:n paine. (Teir et al 2003, 78).

### **2.3 Lämmönsiirtimet**

Voimalaitosprosesseissa on kahden tyyppisiä höyryesilämmittimiä, jotka ovat matalapaine-esilämmittimet ja korkeapaine-esilämmittimet. Korkeapaine-esilämmittimet sijaitsevat yleensä syöttövesipumpun ja ekonomaiserin välisessä linjassa. Matalapaine-esilämmitin sijaitsee lauhdepumpun ja syöttövesisäiliön välisessä linjassa. KP-esilämmittimen tehtävä on nostaa syöttövesipumpun jälkeen korkeapaineisen veden lämpötilaa ennen ekonomaiseria ja MP-esilämmittimen nostaa lauhde veden lämpötilaa ennen syöttövesisäiliötä. Nostamalla syöttöveden lämpötilaa parannetaan laitoksen hyötysuhdetta. Tavallisesti tällaiset veden esilämmittimet ovat vaippa-putki U-putkilämmönsiirtimet. Voimalaitoksella on yksi MP-esilämmitin lauhdepumpun ja syöttövesisäiliön välissä.(Teir et al 2003, 79-80).

### **2.4 Höyryturbiini**

Höyryturbiinissa korkeapaineinen tulistettu höyry paisuu luovuttaen energiaa, joka muutetaan turbiinin mekaaniseksi energiaksi. Turbiini voidaan jakaa useisiin peräkkäisiin vyöhykkeisiin, joissa ensin tulee paikallaan pysyvä staattori ja sen jälkeen pyörivä roottori. Tällaista roottori -ja staattoriivivistöä kutsutaan yhdeksi vyöhykkeeksi. Kun höyry tulee staattorin siivistöön paine-eron vuoksi höyryn nopeus kasvaa, minkä jälkeen suurella nopeudella roottoriin tuleva höyry pyörittää roottorin siivistöä. Tässä prosessissa höyryn liike-energia muutetaan turbiinin mekaaniseksi energiaksi, joka pyörittää turbiinia. Turbiinin kanssa samalla akselilla sijaitsee generaattori, joka muuttaa turbiinin mekaanisen energian sähkö energiaksi. Voimalaitoksella turbiinin terminen teho on noin 4 MW ja generaattorin tuottama sähköteho noin 2,1 MW. Turbiini tarvitsee revisiota, jonka jälkeen sitä voisi hyödyntää paremmin sähkön tuotannossa. (Kaikko&Saari 2018, 16-22).

## 2.5 Lauhdutin

Lauhduttimessa turbiinilta tuleva höyry lauhtuu takaisin nesteeksi. Turbiinin hyötysuhteen kannalta yksi tärkeimmistä lauhduttimen tehtävistä on pitää turbiinin loppupäässä riittävä alipaine. Yleensä käytetään pintalauhdutinta, joka koostuu vaakasuorista metalliputkista. Jäähdytysvesi virtaa metalliputkissa, joiden ulkopinnalle höyry lauhtuu. Lauhduttimeen kertyy lauhtumattomia kaasuja, joista suurin osa on peräisin ilmapuodoista ja osa tulee höyryn mukana. Kaasut heikentävät lauhduttimen hyötysuhdetta, koska kertyvät jäähdytysputkien läheisyyteen ja heikentävät näin lämmönsiirtoa höyrystä jäähdytysveteen, sekä nostavat lauhduttimessa olevaa painetta. Lauhtumattomia kaasuja poistetaan lauhduttimesta tyhjiöpumpulla tai höyryejektorilla, minkä vuoksi voidaan ylläpitää jatkuvasti alipainetta lauhduttimessa. Voimalaitoksen lauhduttimessa vallitsee noin 0,1 bar:n paine. Sieltä lauhde vesi siirtyy kylläisessä tilassa kohti lauhdepumppua, joka nostaa veden paineen riittävän suureksi päästääkseen syöttövesisäiliöön. (Kaikko&Saari 2018, 27-35)

## 3 PAINEHÄVIÖ PUTKIVIRTAUKSESSA

Teollisissa prosesseissa energiaa siirtävät fluidit siirtyvät yleensä putkistojen kautta laitoksen eri kohteiden välillä. Virtaus putkilinjassa saadaan aikaiseksi paine-erolla, minkä vuoksi fluidi virtaa suuremmasta paineesta kohti pienempää. Putkistolinjan virtauksessa tapahtuu painehäviöitä, jotka riippuvat putken sisäpinnan karheudesta, putkilinjojen geometriasta ja laitteista kuten erilaisista venttiileistä. Putken sisäpinnan karheudesta aiheutuvaa painehäviötä kutsutaan kitkapainehäviöksi. Putkilinjojen käyrät, T-haarat, venttiilit, laajennukset, supistukset, virtauksen sisääntulo tai ulostulo putkesta aiheuttavat painehäviöitä, joita kutsutaan paikallishäviöiksi. Virtauksessa on otettava myös huomioon korkeuden muutokset verraten tiettyyn referenssipintaan, mitkä myös aiheuttavat painehäviöitä. Yllä mainituista painehäviöistä muodostuu putkistolinjan kokonaispainehäviö, joka on otettava huomioon kun suunnitellaan laitoksen putkistoja. Suuret painehäviöt putkistolinjoissa johtavat laitoksien erilaisten kohteiden käyttöpaineiden kasvuun, mikä heikentää hyötysuhdetta kokonaisuudessa. Esimerkiksi pumppujen tarvittava teho kasvaa, jos putkistolinjoissa painehäviöt kasvavat.

### 3.1 Kitkapainehäviö

Täysin kehittyneelle virtaukselle virtauskitkasta aiheutuvaa painehäviötä voidaan kuvata Darcy-Weisbach-yhtälöllä (1). (Çengel&Cimbala 2006, 329)

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{avg}^2 \quad (1)$$

jossa,  $f$  on putken kitkakerroin [-]

$L$  on putken pituus [m]

$D_h$  on hydraulinen halkaisija [m]

$\rho$  on virtaavan aineen tiheys  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$V_{avg}$  on virtauksen keskimääräinen nopeus [m/s]

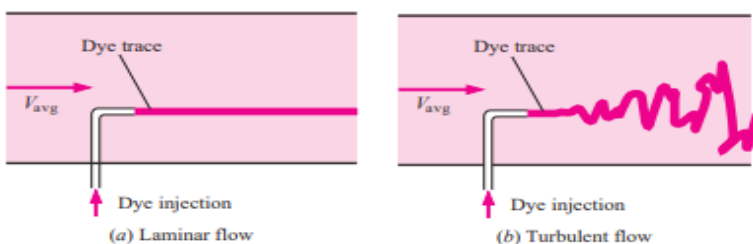
Darcy-Weisbach-yhtälöllä voidaan kuvata kitkapainehäviöitä laminaarisissa ja turbulenttisissa virtauksissa hydraulisesti sileissä ja karheissa putkissa. Se sopii myös ei-pyöreille poikkileikkauksille, sekä vaakasuorille ja kalteville putkille. Pyöreissä putkissa hydraulinen halkaisija vastaa putken sisähalkaisijaa (Çengel&Cimbala 2006, s.329). Ei-pyöreille poikkileikkauksille hydraulinen halkaisija saadaan yhtälöstä (2) (Çengel&Cimbala 2006, 324).

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{p} \quad (2)$$

jossa,  $A$  on putken poikkipinnan ala [m<sup>2</sup>]

$p$  on putken märkäpiiri [m]

Kitkapainehäviön selvittämiseksi on ratkaistava Darcyn kitkakerroin  $f$ , joka riippuu virtauksen tyypistä ja putken muodosta, sekä putken pinnankarheudesta. Virtauksen tyypit voidaan jakaa laminaariseen ja turbulenttiseen virtaukseen. Laminaariselle virtaukselle on tyypillistä virtauksen tasaisuus ja virtausviivojen tasaisuus. Turbulenttinen virtaus on taas epätasaista ja sekoittuvaa.



**Kuva 6:** (a) Laminaarinen, (b) Turbulenttinen (Çengel&Cimbala 2006, s.323)

Virtauksen tyyppi voidaan määrittää käyttämällä dimensiotonta Reynoldsin lukua, joka riippuu inertiaalivoimien suhteesta virtauksen viskoosisiin voimiin. Reynoldsin luku pyöreälle putkelle saadaan yhtälöstä (3). (Çengel&Cimbala 2006, 324)

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{avg} \cdot D}{\mu} \quad (3)$$

jossa,  $\rho$  on virtaavan aineen tiheys  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$V_{avg}$  on virtauksen keskimääräinen nopeus  $[\text{m}/\text{s}]$

$D$  on putken sisähalkaisija  $[\text{m}]$

$\mu$  on dynaaminen viskositeetti  $[\text{Ns}/\text{m}^2]$

Reynoldsin lukuarvoa, jossa virtaus alkaa muuttumaan turbulenttiseksi kutsutaan kriittiseksi Reynoldsin luvuksi  $Re_{cr}$ . Kriittinen Reynoldsin luku on erilainen riippuen virtauskanavan geometriasta ja virtauksen olosuhteista. Pyöreässä putkessa se vastaa arvoa  $Re_{cr} = 2300$ . Siirtyminen laminaarisesta virtauksesta turbulenttiseen riippuu virtauskanavan geometriasta, pinnankarheudesta, virtauksen nopeudesta, putken pinnan lämpötilasta, virtaavasta aineesta, putken tärinästä ja monista muista tekijöistä. Yleensä virtaus pyöreässä putkessa voidaan käsitellä laminaarisena, jos  $Re \leq 2300$  ja turbulenttisena, kun  $Re \geq 4000$ . Siirtymäalueeksi kutsutaan kohtaa, jossa  $2300 \leq Re \leq 4000$  ja siinä virtauksen tyyppi vaihtuu satunnaisesti laminaarisen ja turbulenttisen välillä. (Çengel&Cimbala 2006, 324-325)

Laminaarisessa virtauksessa kitkakerroin on Reynolds luvun funktiona ja on riippumaton putken pinnankarheudesta. Käytännössä laminaarisessa virtauksessa kitkakerroin riippuu ainoastaan Reynoldsin luvusta. Darcyn kitkakerroin täysin kehittyneessä laminaarisessa virtauksessa pyöreässä putkessa saadaan yhtälöstä (4). (Çengel&Cimbala 2006, 330).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

Täysin kehittyneessä turbulenttisessa virtauksessa kitkakerroin on riippuvainen Reynoldsin luvusta ja putken suhteellisesta pinnankarheudesta  $\varepsilon/D$ . Suhteellinen pinnankarheus on putken ekvivalenttikarheuden  $\varepsilon$  suhde putken sisähalkaisijaan  $D$ . Ekvivalenttikarheus on putken sisäpinnan keskimääräistä karheutta kuvaava suure, joka on pituusmittana ilmaistettu. Ekvivalenttikarheus erilaisista materiaaleista valmistetuille putkille voidaan lukea monenlaisista taulukoista. (Çengel&Cimbala 2006, 340-341).



**Taulukko 1:** Ekvivalenttikarheus uusille putkille(Çengel&Cimbala 2006, s.341)

<b>Materiaali</b>	<b><math>\epsilon</math> [mm]</b>
Valurauta	0.26
Galvanoitu rauta	0.15
Takorauta	0.046
Ruostumaton teräs	0.002
Teräs	0.045

Taulukossa 1 on koottu esimerkiksi ekvivalenttikarheudet erilaisille materiaaleille. On otettava huomioon, että yllä mainitut karheudet ovat uusille putkille ja putkien käyttöään kasvaessa myös putkien ekvivalenttikarheudet kasvavat korroosion ansiosta. Esitettyjen ekvivalenttikarheuksien mittausepätaarkkuus on noin  $\pm 60 \%$ , minkä seurauksena taulukossa 1 olevat arvot ovat lähinnä suuntaa antavia. (Çengel&Cimbala 2006, 341).

Turbulenttiselle ja siirtymäalue virtaukselle hydraulisesti sileässä ja karheassa putkessa kitkakertoimen selvittämiseksi voidaan käyttää Colebrook-yhtälöä (5). (Çengel&Cimbala 2006, 341).

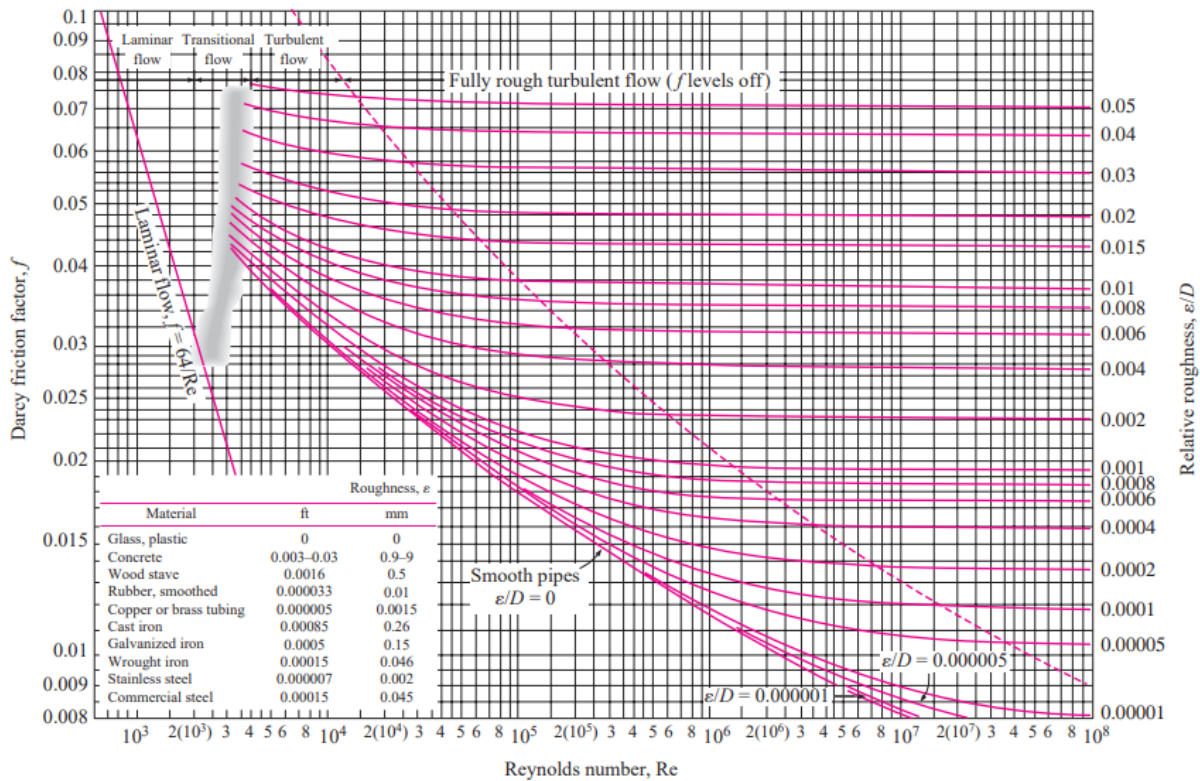
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log_{10} \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Colebrookin yhtälö on implisiittinen kitkakertoimen suhteen, minkä vuoksi sen selvittämiseksi täytyy iteroida. Kitkakertoimen määrittämisessä voidaan myös välttyä iteroinnista käyttämällä Haalandin-yhtälöä (6), joka on eksplisiittinen approksimaatio kitkakertoimesta. (Çengel&Cimbala 2006, 341).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10} \left( \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right) \quad (6)$$

Haalandin-yhtälöllä saadut tulokset eroavat Colebrookin-yhtälöllä saaduista noin 2:lla prosentilla. Jos tarkoituksena on saada mahdollisimman tarkka arvo kitkakertoimelle, niin Haalandin-yhtälöllä saatu tulos voidaan käyttää ensimmäisenä arvauksena, kun aloittaa iteroinnin Colebrookin-yhtälöllä. (Çengel&Cimbala 2006, 341).

Colebrook-yhtälön avulla on myös luotu kuvaaja nimeltään Moodyn käyrästä, joka esittää Darcyn kitkakertoimen pyöreälle putkelle suhteellisen pinnankarheuden ja Reynoldsin luvun funktiona. Moodyn käyrästä voidaan lukea suoraan arvo kitkakertoimelle käyttämättä lasku yhtälöitä, kun tiedossa on Reynoldsin luku ja putken suhteellinen pinnankarheus. (Çengel&Cimbala 2006, 341).



**Kuva 7:** Moodyn käyrästä (Çengel&Cimbala 2006, 898)

Moodyn käyrästä on todennäköisesti yksi käytetyimmistä kuvaajista tekniikan alalla ja se on lähtökohtaisesti kehitetty pyöreille putkille, mutta sopii myös ei-pyöreille poikkileikkauksille korvaamalla halkaisija hydraulisella halkaisijalla. On olemassa monenlaisia yhtälöitä kitkakertoimen selvittämiseksi riippuen erilaisista Reynoldsin luvuista johtuen, mutta yleensä Colebrook-yhtälöllä ja Haalandin yhtälöllä päästään hyvin tarkkoihin arvoihin. (Çengel&Cimbala 2006, 341).

### 3.2 Paikallishäviö

Putkistojärjestelmässä kulkeva virtaus kohtaa putkistolinjan erilaisia komponentteja, kuten putkikäyrät, T-haarat, putkikoon muutokset, virtauksen sisääntulo ja ulostulo putkesta, sekä putkilinjassa olevia venttiilejä. Mainitut putkistolinjan komponentit aiheuttavat virtauksessa painehäviöitä, joita kutsutaan paikallishäviöiksi ja niistä johtuva painehäviö voidaan kuvata yhtälöllä (7). (Çengel&Cimbala 2006, 347-348).

$$\Delta p = K_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (7)$$

jossa,  $K_L$  on kertavastuskerroin [-]

$\rho$  on virtaavan aineen tiheys  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$V$  on virtaavan aineen nopeus  $[\text{m/s}]$

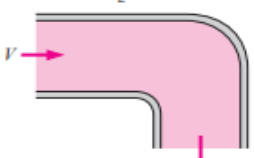
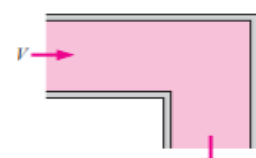
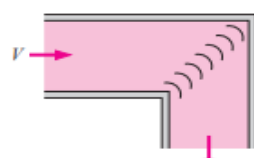
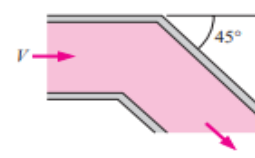

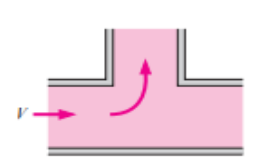
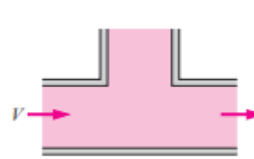
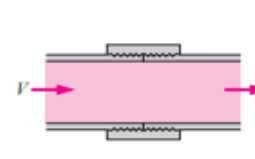
Virtaus venttiilien ja erilaisten liitososien, kuten putkikäyrien ja T-haarojen läpi on hyvin monimutkaista, minkä vuoksi teoreettinen analyysi on lähinnä mahdotonta. Paikallishäviön aiheuttama painehäviö on selvitetty monille komponentille kokeellisesti. Yleensä toimittajat ilmoittavat kertavastuskertoimen ja mahdollisesti paikallishäviön komponenteille tietyn virtauksen olosuhteissa. Analyytisesti voidaan ratkaista kertavastuskerroin putken laajenemisen kohdalle yhtälöllä (8). (Çengel&Cimbala 2006, 347-348).

$$K_L = \left(1 - \frac{d}{D}\right)^2 \quad (8)$$

jossa,  $d$  on pienemmän putken sisähalkaisija [m]

$D$  on suuremman putken sisähalkaisija [m]

Yhtälöä, jolla voisi määrittää kertavastuskertoimen putken supistus kohdassa ei ole. Kun tarkastellaan putken supistus, niin kertavastuskerroin on luettava tietystä kuvaajasta tai taulukosta. Tarkastellaan esimerkiksi putkistolinjan erilaisille komponenteille kokeellisesti määrättyjä arvoja kertavastuskertoimelle turbulentsisessa virtauksessa. (Çengel&Cimbala 2006, 351-352)

<p><b>Bends and Branches</b>  <b>90° smooth bend:</b>            Flanged: <math>K_L = 0.3</math>            Threaded: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p><b>90° miter bend</b>            (without vanes): <math>K_L = 1.1</math></p> 	<p><b>90° miter bend</b>            (with vanes): <math>K_L = 0.2</math></p> 	<p><b>45° threaded elbow:</b>  <math>K_L = 0.4</math></p> 								
<p><b>180° return bend:</b>            Flanged: <math>K_L = 0.2</math>            Threaded: <math>K_L = 1.5</math></p> 	<p><b>Tee (branch flow):</b>            Flanged: <math>K_L = 1.0</math>            Threaded: <math>K_L = 2.0</math></p> 	<p><b>Tee (line flow):</b>            Flanged: <math>K_L = 0.2</math>            Threaded: <math>K_L = 0.9</math></p> 	<p><b>Threaded union:</b>  <math>K_L = 0.08</math></p> 								
<p><b>Valves</b></p> <table> <tbody> <tr> <td>Globe valve, fully open: <math>K_L = 10</math></td> <td>Gate valve, fully open: <math>K_L = 0.2</math></td> </tr> <tr> <td>Angle valve, fully open: <math>K_L = 5</math></td> <td>Gate valve, closed: <math>K_L = 0.3</math></td> </tr> <tr> <td>Ball valve, fully open: <math>K_L = 0.05</math></td> <td>Gate valve, closed: <math>K_L = 2.1</math></td> </tr> <tr> <td>Swing check valve: <math>K_L = 2</math></td> <td>Gate valve, closed: <math>K_L = 17</math></td> </tr> </tbody> </table>				Globe valve, fully open: $K_L = 10$	Gate valve, fully open: $K_L = 0.2$	Angle valve, fully open: $K_L = 5$	Gate valve, closed: $K_L = 0.3$	Ball valve, fully open: $K_L = 0.05$	Gate valve, closed: $K_L = 2.1$	Swing check valve: $K_L = 2$	Gate valve, closed: $K_L = 17$
Globe valve, fully open: $K_L = 10$	Gate valve, fully open: $K_L = 0.2$										
Angle valve, fully open: $K_L = 5$	Gate valve, closed: $K_L = 0.3$										
Ball valve, fully open: $K_L = 0.05$	Gate valve, closed: $K_L = 2.1$										
Swing check valve: $K_L = 2$	Gate valve, closed: $K_L = 17$										

**Kuva 8:** Kertavastuskertoimet putkistolinjan komponenteille turbulentsisessa virtauksessa (Çengel&Cimbala 2006, 351)

Kuvassa 8 esitetyissä arvoissa on huomattava mittausepävarmuus, sillä kertavastuskerroin riippuu monista tekijöistä, kuten putken halkaisijasta, pinnankarheudesta, Reynoldsin luvusta ja komponentin suunnittelun yksityiskohdista. Esimerkiksi kahden saamanlaisen venttiilin kertavastuskerroin voi erota

merkittävästi riippuen venttiilin valmistajasta. Tämän vuoksi Putkistolinjan suunnittelussa kannattaa ottaa yhteyttä tiettyihin putkistolinjan komponenttien toimittajiin saadakseen tarkat tiedot kertavastuskertoimista, kuin että, luottaa kirjallisuudesta löytyviin taulukoista luettuihin arvoihin. Kirjallisuudesta löytyvät kertavastuskertoimet ovat lähinnä suuntaa antavia arvoja. (Çengel&Cimbala 2006, 351).

### 3.3 Kokonaispainehäviö putkivirtauksessa

Kokonaispainehäviön putkivirtauksessa saadaan selville yhdistämällä kitkapainehäviötä ja paikallishäviötä kuvaavia yhtälöitä, sekä ottamalla huomioon putkistolinjassa tapahtuvia korkeuden muutoksia verraten tiettyyn referenssipintaan. Kokonaispainehäviön yhtälöksi saadaan (9).

$$\Delta p = \sum_i f_i \cdot \frac{L_i}{D_i} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_i \cdot V_i^2 + \sum_j K_{L,j} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_j \cdot V_j^2 + \sum_k \rho_k \cdot g \cdot l_k \cdot \sin(\alpha)_k \quad (9)$$

jossa,  $f$  on putken kitkakerroin [-]

$L$  on putken pituus [m]

$D$  on putken sisähalkaisija [m]

$V$  on virtaavan aineen nopeus [m/s]

$K_L$  on kertavastuskerroin [-]

$\rho$  on virtaavan aineen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  on putoamiskiihtyvyys [m/s<sup>2</sup>]

$l$  on pystysuuntaan lähtevän putken pituus [m]

$\alpha$  on pystysuuntaan lähtevän putken kaltevuus kulma vaakasuoraan pintaan nähden [°]

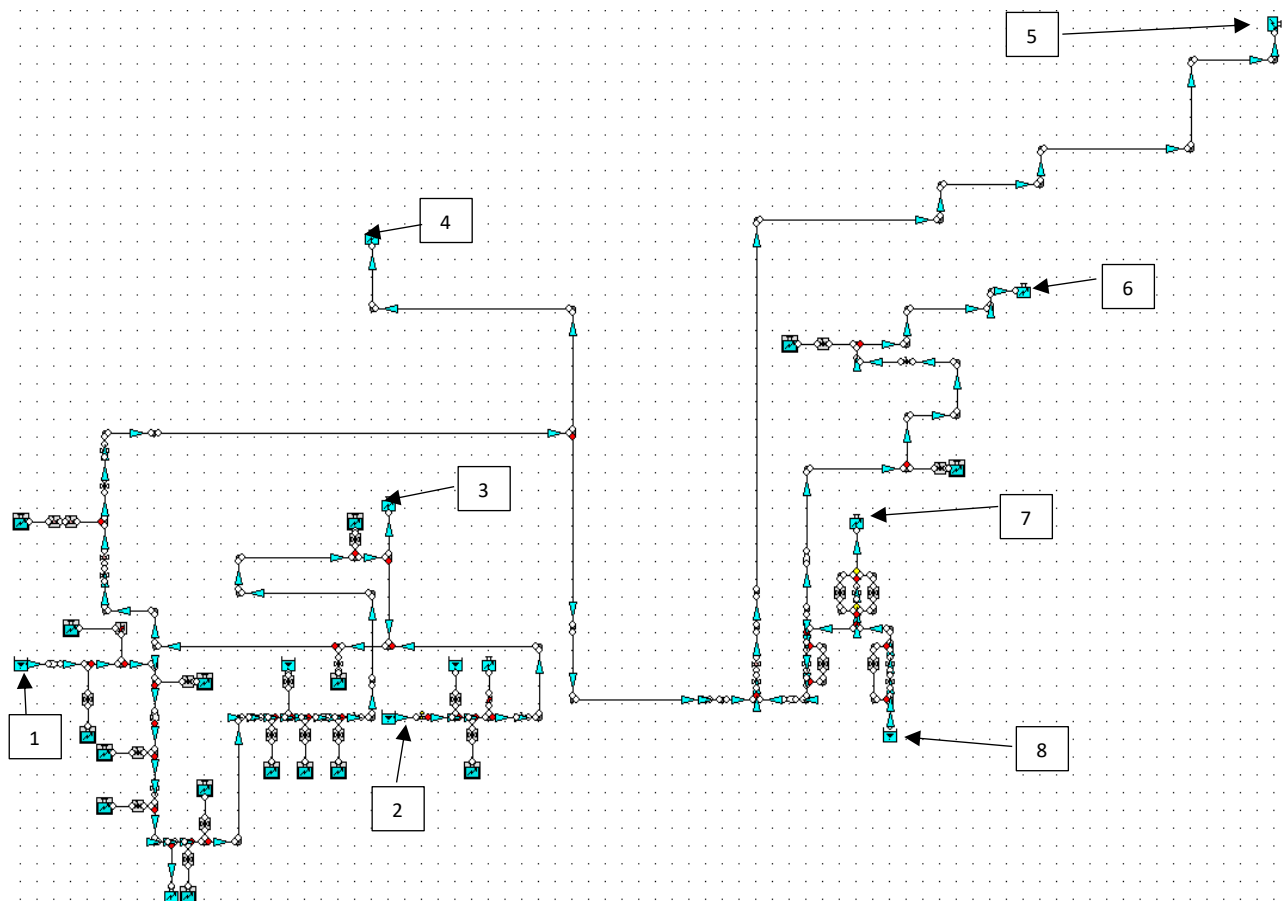
Alaindeksi  $i$  viittaa kaikkiin putkiin, joilla on vakio sisähalkaisija ja alaindeksi  $j$  kaikkiin komponentteihin, jotka aiheuttavat paikallishäviöitä. Alaindeksi  $k$  viittaa kaikkiin pystysuunnassa oleviin putkiin, joiden kaltevuuskulma vaakatasoon nähden on vakio. Jos koko tarkastelu alueella putken sisähalkaisija pysyy vakiona ja pystysuunnassa olevien putkien kaltevuuskulmat vaakatasoon nähden myös vakiona, sekä virtauksen ominaisuudet pysyvät vakiona, niin saadaan yhtälö (10).

$$\Delta p = \left( f \cdot \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 + \rho \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot \sum l \quad (10)$$

Tärkeä huomautus on putken pystysuuntaisesta pituudesta yhtälössä (9) ja (10), jos kyseessä on ylöspäin menevä virtaus pystysuuntaisessa putkessa, niin putken pituus ilmaistaan positiivisena arvona. Jos kyseessä on virtaus alaspäin pystysuuntaisessa putkessa tietystä vaakataso pinnasta alemmalle tasolle, niin pystysuuntaisen putken pituus ilmaistaan negatiivisena, minkä vuoksi korkeammasta tasosta alemmalle tasolle virtauksissa painehäviöt vähentyvät. Käyttämällä yhtälöitä (9) ja (10) voidaan saada hyvin tarkkoja arvoja painehäviöistä putkistolinjoissa, jos on tarkat tiedot virtauksen ominaisuuksista, putken geometriasta, ekvivalenttikarheudesta ja putkiston komponenttien ominaisuuksista.

#### 4 PROSESSIHÖYRYLINJOJEN TARKASTELU

Tässä osiossa tarkastellaan prosessihöyrylinjojen putkistoja ja niiden komponentteja.



**Kuva 9:** Prosessihöyrylinjoista luotu malli FluidFlow ohjelmalla (fluidflow demo)

- |   |                         |                        |                   |
|---|-------------------------|------------------------|-------------------|
| 1. Väliottohöyry linja                          | 3. Omakäyttöhöyry linja | 5. Klooraatti N3       | 7. KL-vaihtimelle |
| 2. Reduktioventtiili                            | 4. Lipeätehdas          | 6. Klooraatti N1 ja N2 |                   |
| 8. Tulitorvi-tuliputkikattilalta lähtevä linja. |                         |                        |                   |

Prosessissa olevien putkien koot, erilaisia venttiilejä, putkikäyriä, T-haaroja ja putkien supistus/laajennus kohtia. Koko prosessista on luotu malli FluidFlow ohjelmalla, jonka voidaan nähdä kuvasta 9. FluidFlow ohjelmalla voidaan hyvin laajasti analysoida putkistojärjestelmiä, missä pystytään selvittämään lämmönsiirtoa ja painehäviöitä putkivirtauksessa nesteille, kaasuille ja kaksi faasisille virtauksille. Tarkastellaan taulukkoa 2, josta voidaan nähdä minkä kokoisia putkia systeemissä on.

**Taulukko 2:** Putkikoko

Putkien materiaali	Putkien sisähalkaisija <i>D [mm]</i>	Putki tyyppin yhteenlaskettu pituus <i>L [m]</i>
Ruostumaton teräs	15.5	9
Ruostumaton teräs	159.3	485.1
Ruostumaton teräs	107.1	4.5
Ruostumaton teräs	26.5	2
Ruostumaton teräs	206.5	17.4
Ruostumaton teräs	28.5	3.36
Ruostumaton teräs	70.3	10.5
Ruostumaton teräs	309.7	0.5
Ruostumaton teräs	43.1	5.72
Ruostumaton teräs	207.3	0.5
Ruostumaton teräs	131.7	5

Prosessissa olevien putkien materiaalina on ruostumaton teräs. Pisin putki systeemissä on sisähalkaisijaltaan 159.3 mm ja sen yhteenlaskettu pituus prosessissa 485.1 m. Putket ovat tavallisesti jaoteltu nimelliskoon DN(nominal diameter) mukaan ja putki, jonka sisähalkaisija on 159.3 mm kuuluu 150 DN kokoon. Ilmoitin putkien sisähalkaisijat suoraan käyttämättä niiden nimelliskokoa. Taulukosta 3 voidaan nähdä prosessissa olevia komponentteja.

**Taulukko 3:** Putkilinjan komponentit

Komponentti	Komponenttien lukumäärä prosessissa
Käyrä	52
Luistiventtiili	31
T-haara	30
Palloventtiili	5
Laajennukset/supistukset	5
Risteyskohta	2
Reduktioventtiili	1
Varoventtiilit	2
Takaiskuläppäventtiili	1

Suurin osa putkien pituuksista on avioitu, koska tarkkaa tietoa kaikista putkien pituuksista ei ollut saatavissa. Väliottohöyrylinjalta lähtevä putki, joka sijaitsevat turbiinisalissa on määritelty hyvin tarkasti, sillä siitä oli saatavissa isometri piirustukset. Myös isometri piirustukset oli saatavissa reduktioventtiilin jälkeisestä linjasta. Muille prosessissa oleville putki pituuksille on tehty arvio, kun kiertelein laitoksien prosessihöyrylinjoja. Putkien paksuuksista ja halkaisijoista oli tarkat tiedot saatavissa. Tietoa venttiilityypeistä prosessissa oli saatavissa ja ne oli määritelty hyvin tarkasti.

FlidFlow ohjelmaan painehäviöiden selvittämiseksi on syötettävä systeemiin alkuarvot. On määriteltävä systeemiin tulevan virtauksen tyyppi, lämpötila ja paine, sekä määriteltävä systeemistä ulos lähtevät massavirrat. Virtauksen tyyppi on tavallisesti vesi tai höyry. Alkuarvot voidaan myös määrittää päinvastoin, jolloin systeemiin määritellään tulevat massavirrat ja sitten lähtevän virtauksen tyyppi, paine ja lämpötila.

Taulukosta 4 voidaan nähdä kuinka suuret höyryn massavirrat ovat prosessin eri kohdissa. Kyseiset massavirrat oli selvitetty analysoimalla vuoden edestä kerättyä tietoa massavirroista prosessin eri kohdissa. Tarkastelu ajanjakso, jonka pohjalta laskettiin keskiarvot massavirroille prosessissa, oli 01.06.2018-30.06.2019. Osa esitetyistä taulukossa 4 massavirroista oli selvitetty laskemalla, kuten esimerkiksi KL-vaihtimelle menevän höyryn massavirta. Tiedossa oli kaukolämpöveden tulo ja meno lämpötila, paine ja massavirta, sekä tiedossa oli, että lämmönvaihtimelle tulitorvi-tuliputkikattilalta tuleva höyry on kylläisessä tilassa ja poistuu siitä kylläisenä vetenä. Tämän perusteella pystytään tekemään yhtälö, josta voi selvittää höyryn massavirta KL-vaihtimelle.

$$q_{m,v}h_{v,in} + q_{m,h}h''_{h,in} = q_{m,v}h_{v,out} + q_{m,h}h'_{h,out} \quad (10)$$

jossa,  $q_m$  on massavirta  $[\text{kg}/\text{s}]$

$h$  on entalpia  $[\text{kJ}/\text{kg}]$

Alaindeksi  $v$  viittaa veteen,  $h$  viittaa höyryyn,  $in$  viittaa sisään tuloon,  $out$  viittaa ulos menoon, sekä merkki  $''$  viittaa kylläiseen höyryyn ja  $'$  viittaa kylläiseen veteen. Reduktioventtiilin läpi kulkeva massavirta on myös selvitetty laskemalla, sillä reduktioventtiilin kohdalla ei ole massavirta mittausta. Tiedossa on turbiinin väliottolinjasta lähtevän höyryn massavirta 2.1 kg/s, omakäyttölinjaan lähtevän höyryn massavirta 0.67 kg/s, sekä voimalaitoksesta tehtaille lähtevän höyryn massavirta 2.13 kg/s. Reduktioventtiilin läpi kulkeva massavirta saadaan selville yhtälöllä

$$2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 0.67 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + x = 2.13 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (11)$$

Ratkaisemalla x yhtälöstä 11 saadaan selville reduktioventtiilin läpi kulkevan keskimääräisen massavirran. Yhtälössä 11 väliottolinjasta tulevan höyryn massavirta on 2 kg/s, koska väliottohöyrylinjan alussa höyrystä otetaan suunnilleen 0.1 kg/s tiivistehöyryksi. Tarkasti mitattua massavirtaa tulitorvi-tuliputkikattilalta lähtevälle prosessihöyrylle ei ollut. Se selvitettiin päättelemällä, kun kaikki muut massavirrat systeemissä oli määritetty, jolloin sen arvoksi tuli 1.50 kg/s.

**Taulukko 4:** Massavirrat

Putki linja	Massavirta $[\text{kg}/\text{s}]$
Väliottohöyrylinja	2.1
Reduktioventtiilin jälkeinen linja	0.80
Omakäyttöhöyry linja	0.67
Lipeätehdas	1.64
Kloraatti N1 ja N2	1.00
Kloraatti N3	0.70
Tulitorvi-tuliputkikattilasta lähtevä linja	1.50
KL-vaihtimelle lähtevä linja	0.30

Tiedetään että, tulitorvi-tuliputkikattilaa ajetaan tavallisesti noin 3-5 MW:n teholla. Tarkastellaan, kuinka suuruinen teho saadaan kattilalle 1.50 kg/s massavirralla. Tiedetään syöttövesisäiliöstä lähtevän kylläisen veden ominaisuudet ja otetaan huomioon myös pumpun aiheuttaman entalpianousun. Tavallisesti pumppujen hyötysuhteet ovat noin 80 %, joten laskussa käytin tämän oletuksen. Kattilasta lähtevä höyry on kylläisessä tilassa ja tiedetään että, tulevan veden ja lähtevän höyryn massavirta on sama. Kattilan teho saadaan yhtälöstä (12).

$$Q = (h'' - (\Delta h_{svp} + h')) \cdot q_m \quad (12)$$

jossa,  $h''$  on lähtevän kylläisen höyryn entalpia  $[\text{kJ}/\text{kg}]$

$h'$  on syöttövesisäiliöstä lähtevän veden entalpia  $[\text{kJ}/\text{kg}]$

$\Delta h_{svp}$  on pumpun aiheuttama entalpianousu  $[\text{kJ}/\text{kg}]$

$q_m$  on massavirta  $[\text{kg}/\text{s}]$

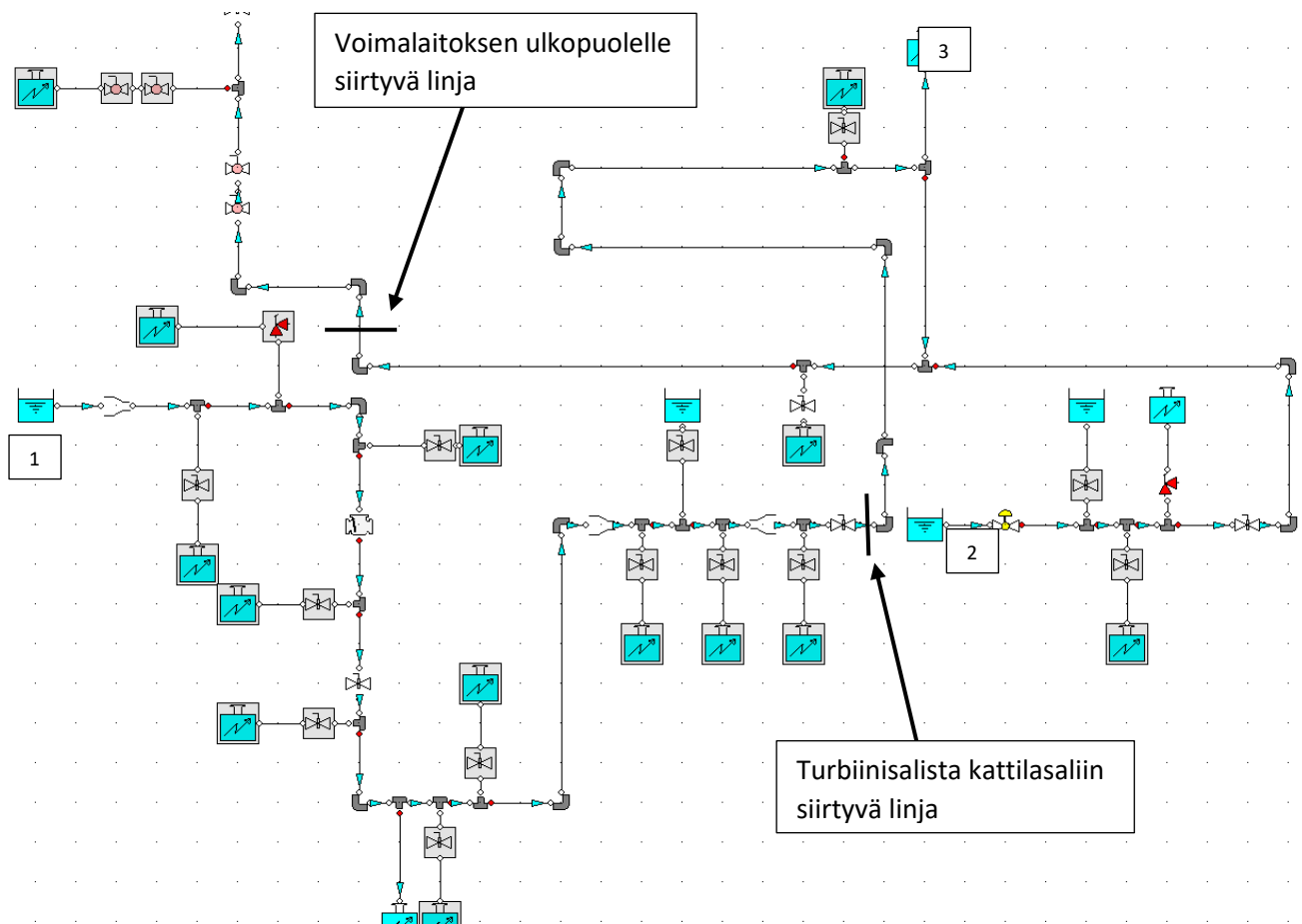


Käyttämällä yhtälöä (12) kattilan tehoksi saadaan noin 3.50 MW:a, mikä vaikuttaa hyvin todennäköiseltä. Saatu arvo on ilmoitettu ottamatta huomioon lämpöhäviöitä.

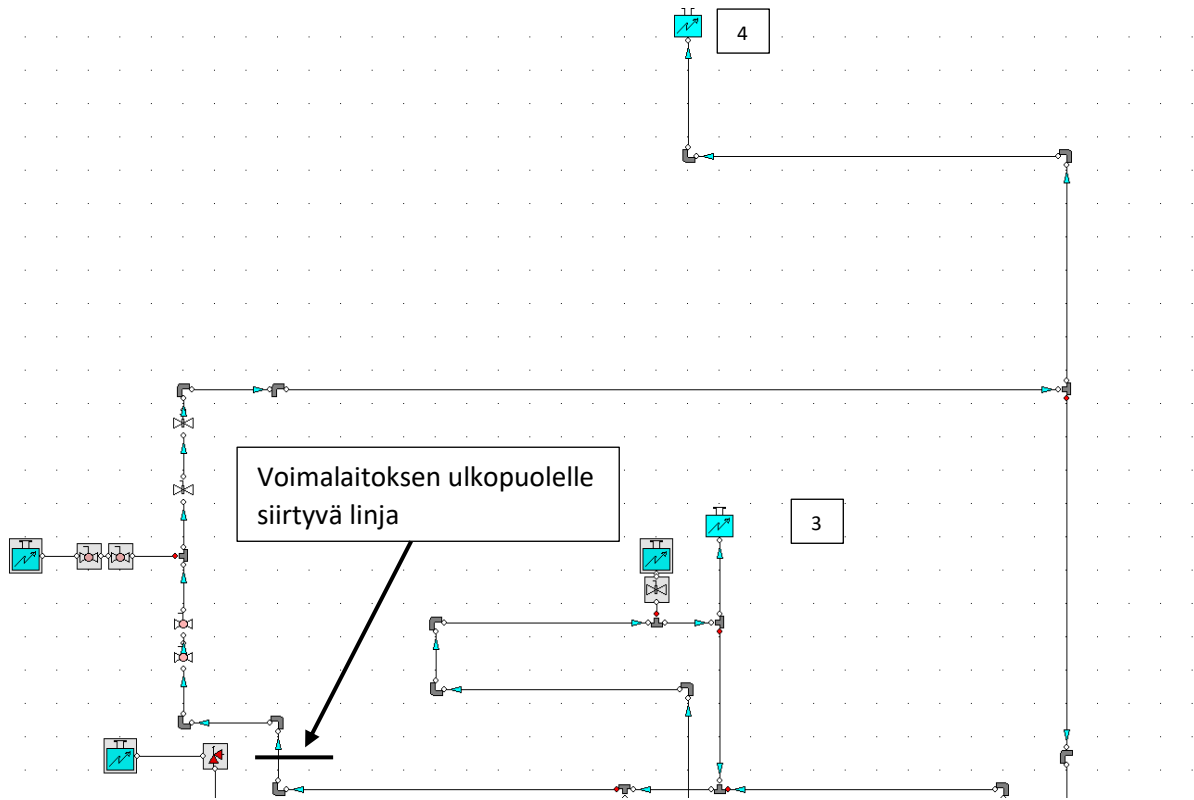
Taulukosta 5 voidaan nähdä systeemiin tulevan höyryn paine ja lämpötila. Prosessihöyryä saadaan turbiinin väliotosta, reduktioventtiilin kautta ja apukattilalaitoksen tulitorvi-tuliputkikattilalta. Tarkastellaan seuraavaksi prosessin eri kohtia yksityiskohtaisemmin. Paineet on ilmoitettu absoluuttisina (abs), mikä tarkoittaa sitä, että otetaan huomioon myös ilmanpaine.

**Taulukko 5:** Prosessihöyryn ominaisuudet

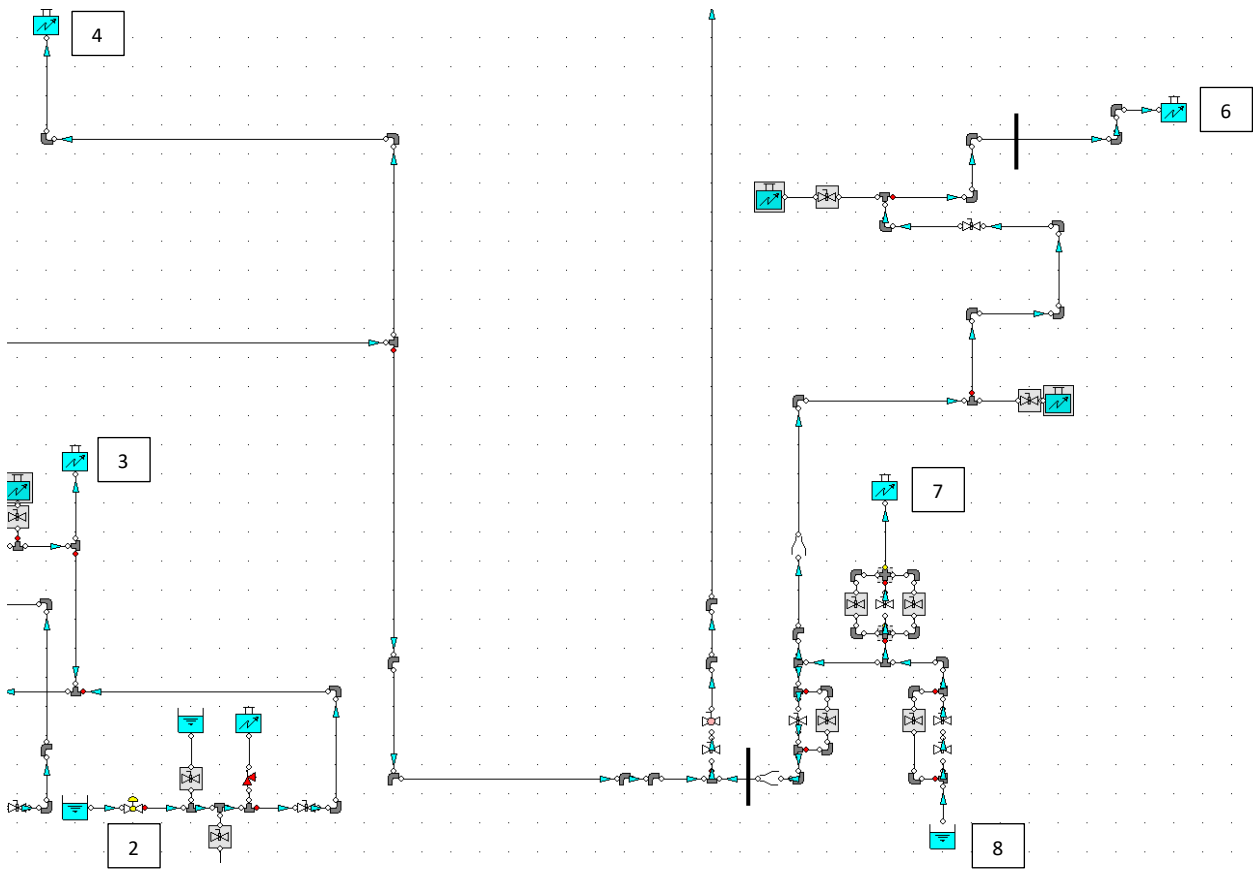
Putki linja	Lämpötila [°C]	Paine (abs) [bar]
Turbiinin väliotolta lähtevä linja	317	9.15
Reduktioventtiilin jälkeinen linja	174	8.70
Tulitorvi-tuliputkikattilalta lähtevä linja	172	8.50



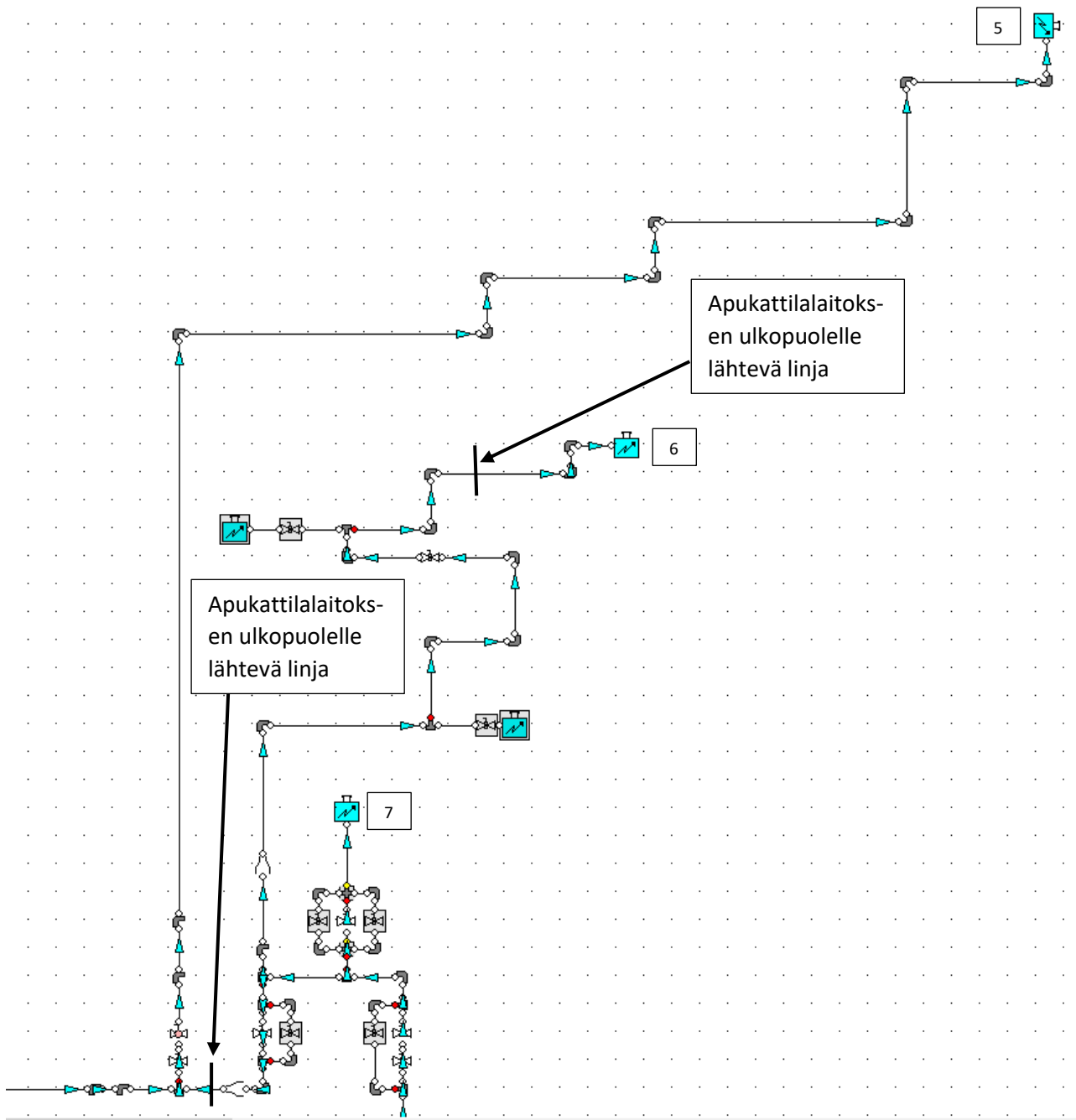
**Kuva 10:** Väliottohöyrylinja ja reduktioventtiilin jälkeinen linja (FluidFlow demo)



**Kuva 11:** Voimalaitoksesta ulos lähtevä linja lipeätehtaalle ja Klooraattitehtaille (FluidFlow demo)



**Kuva 12:** Tulitorvituliputkikattilalta lähtevä prosessihöyrylinja KL-vaihtimelle ja klooraattitehtaille (FluidFlow demo)



**Kuva 13:** Voimalaitoksen ja apukattilalaitoksen prosessihöyrylinjat yhdistyvät (FluidFlow demo)

FluidFlow ohjelman prosessissa oleville komponenteille määritellään korkeudet verrattuna tiettyyn referenssipintaan, minkä vuoksi ohjelma ymmärtää missä kohtaan virtauksessa on otettava huomioon gravitaation vaikutuksen painehäviöihin. Kuviiin on merkitty mustat viivat, jotka ovat kohtisuorassa putkien kanssa. Ne kuvaavat siniä, jotka erottavat yhden tilan toisesta.

Systemissä on monenlaisia komponentteja, kuten esimerkiksi varoventtiilit, jotka voidaan nähdä kuvasta 10. Systemissä on kaksi varoventtiiliä, joista yksi on väliottohöyrylinjassa ja toinen reduktioventtiilin linjassa. Varoventtiilin tehtävä on estää paineen nousua sallittujen arvojen yli. Jos

putkistossa höyryn paine alkaa kasvaa hillitsemättömästi, niin tietyssä kohdassa varoventtiili avautuu ja päästää höyryä ulos linjasta, minkä seurauksena linjan paine tippuu. Väliottohöyrylinjassa oleva varoventtiili avautuu kun paine ylittää 16 bar:a ja reduktioventtiili linjassa 25 bar:a. (Kauko 2016, 12)

Väliottohöyrylinjassa on myös takaiskuläppäventtiili, jonka tehtävä on ongelmatilanteessa estää virtaus suunnan vaihtoa. Virtaus tietystä suunnasta pystyy avaamaan läpän, mutta päinvastaisessa virtauksessa läppä sulkeutuu. (Harju 2016, 18)

Suurin osa prosessissa olevista venttiileistä ovat luistinventtiilit, joiden yksi merkittävimmistä eduista on suuri virtausaukko, sekä venttiilin aiheuttama painehäviö on hyvin pieni. (Kauko 2016, 16)

Kuvasta 11 voidaan nähdä putkilinja, joka siirtyy voimalaitoksen ulkopuolelle, ja siinä linjassa tulee vastaan kaksi peräkkäistä palloventtiiliä, sekä yksi palloventtiili voidaan nähdä kuvasta 13 putkilinjassa, joka lähtee klooraatti N3:lle. Palloventtiilien etuna on hyvin pieni virtausvastus, sekä laaja soveltavuus lämpö- ja painealueella. Huonoina puolina voidaan pitää korkeaa hintaa. (Kauko 2016, 16)

Yksi tärkeimmistä kohdista prosessissa on reduktioventtiili, joka vielä kutsutaan nimellä höyrymuuntoventtiili. Reduktioventtiili on tavallaan paineenalennusventtiili, jonka yhteydessä on myös jäähdytysvesiruiskutus, jonka avulla voidaan säätää höyryn lämpötilaa. Reduktioventtiilin tulevan tuorehöyryn paine on 61 bar.a(abs.) ja lämpötila 500 °C, ja lähtevän prosessihöyryn paine 8.7 bar:a(abs.) ja lämpötila 174 °C.

Prosessissa on monta T-haaraa ja putki käyrää. Osa T-haaroista on venttiili istutuksia, mihin voisi tarvittaessa liittää putki. Väliottohöyrylinjan kohdassa, missä tapahtuu linjan supistus, on monta peräkkäistä T-haaraa, jotka ovat lauhteen poistolinjat, sekä siinä samassa kohdassa on höyryn lämpötilan tiputtamista varten jäähdytysveden ruiskutus linjaan. Ruiskutus vesi otetaan syöttövesipumpun jälkeisestä linjasta. Turbiinin väliotosta tulevan höyryn lämpötila on noin 317 °C ja se tiputetaan noin 185 °C:en ruiskuttamalla jäähdytysvettä linjaan. Kemiran tarvittavan prosessihöyryn on oltava 170-180 °C:ssa lämpötilassa. Suurin osa T-haaroista sivuun lähtevät linjat päättyvät venttiileihin, jotka ovat laitoksen normaali ajossa kiinni. Suurin osa prosessissa olevista putki käyristä ovat 90° kulmassa ja vain muutama 45° kulmassa.

FluidFlow mallissa on kuvattu prosessin useimmiten tapahtuvan ajotavan tiettyinä tarkastelu ajanjaksona, joka on 01.06.2018-30.06.2019. Prosessi voi muuttua riippuen tehtaiden tuotannosta tai tarvittaessa voidaan tuottaa prosessihöyry apukattilalla ja reduktioventtiilin kautta, jos turbiinin kanssa on ongelmia. Parhaimpana vaihtoehtona olisi tuottaa mahdollisimman paljon prosessihöyryä

turbiinin välioton kautta ja käyttää reductioventtiiliä siinä tapauksessa, kun turbiinin kanssa on ongelmia, mutta monet voimalaitoksen komponentit tarkasteluajanjaksona tarvitsivat huoltoa ja turbiinille pitäisi tehdä myös revisio. Revision jälkeen turbiinia voisi hyödyntää paremmin.

FluidFlow prosessissa putkien ekvivalenttikarheudeksi asetettiin 0.15 mm, koska oletettiin että, kyseisenä tarkasteluajanjaksona putket ovat vanhoja ja hyvin käytettyjä. Prosessi on myös tarkasteltu tilanne uusille putkille, jolloin ekvivalenttikarheudeksi asetettiin 0.05 mm.

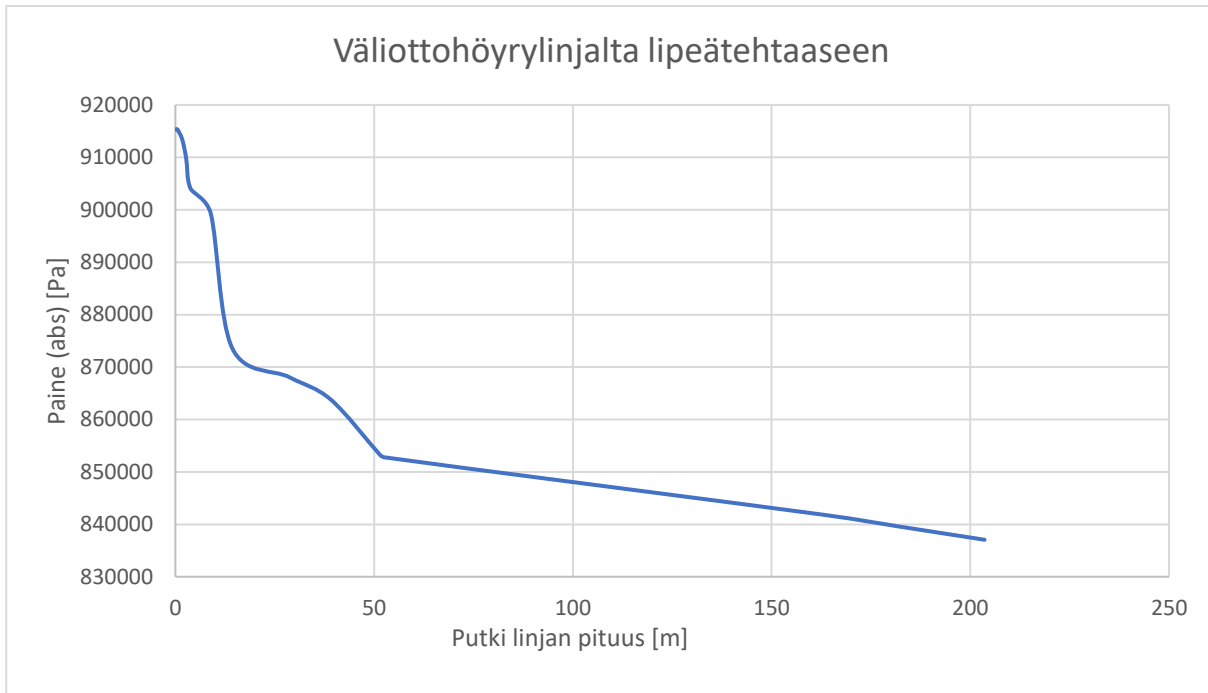
Prosessissa oleva virtaus tarkastelin yksifaasisena höyrynä, sillä ruiskutetun jäähdytysveden osuus höyrylinjoissa on niin pieni että, sen vaikutus on merkityksetön.

## 5 PROSESSIHÖYRYLINJOJEN PAINEHÄVIÖT

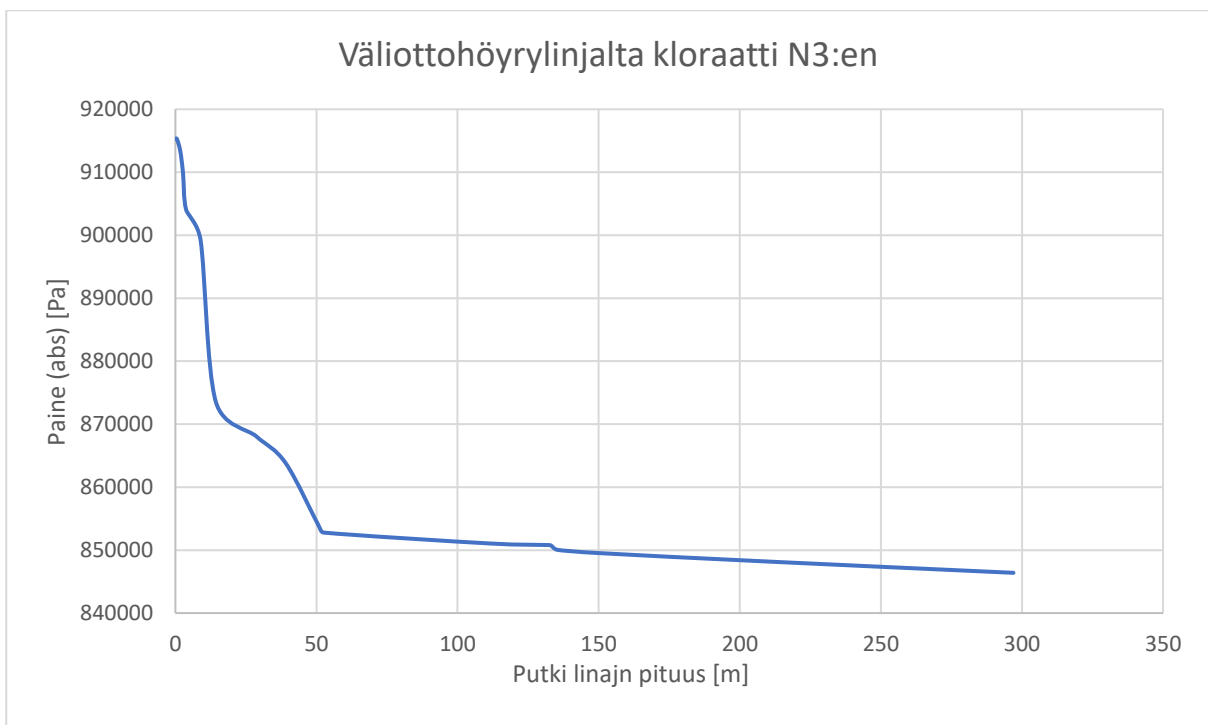
Fluidflow ohjelmasta saatujen tuloksien pohjalta luodaan taulukoita ja kuvaajia, joiden avulla pystytään analysoimaan prosessia kätevästi. Sekä tehdään yksi laskuesimerkki ja verrataan satu tulos ohjelmaan antamaan tulokseen. Kuvaajissa tarkastellaan, kuinka paine muuttuu putki linjassa turbiinin väliottolinjasta lipeätehtaaseen saakaan, väliottolinjasta kloraatti N3:en saakaan, tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N1:lle ja N2:lle saakaan, sekä väliottolinjasta ja tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N3:en saakaan.

**Taulukko 6:** Prosessihöyry systeemin eri kohdissa.

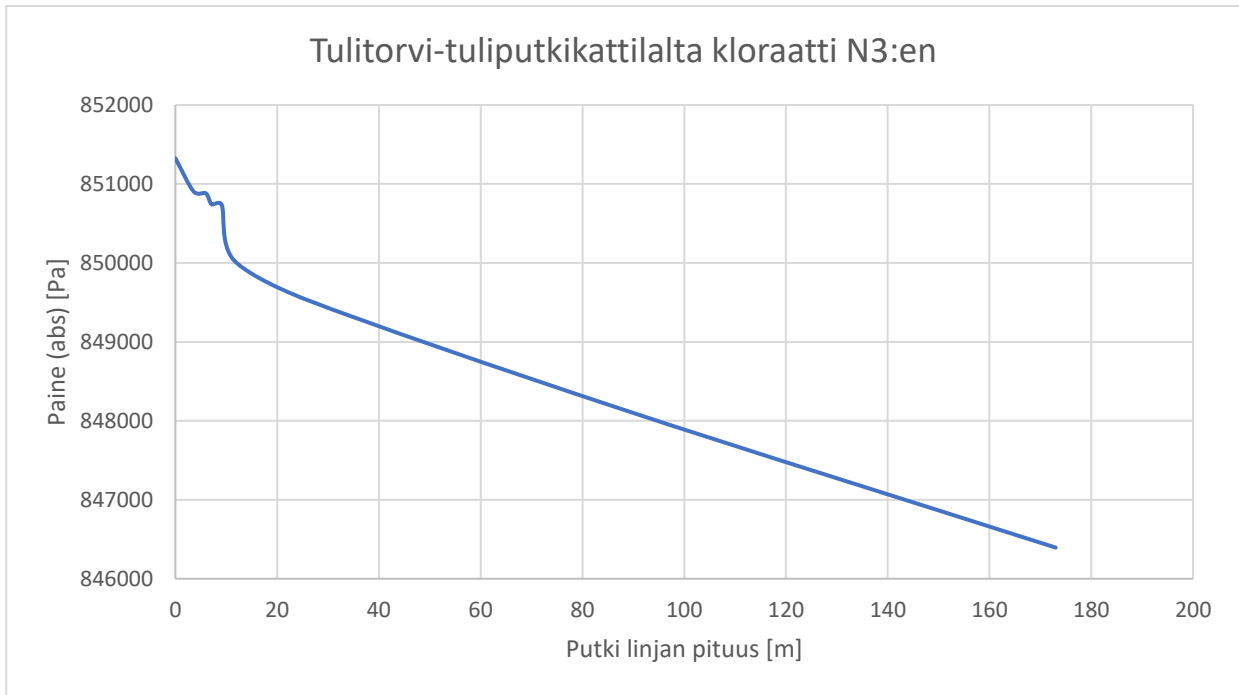
Putki linja	Massavirta [ $kg/s$ ]	Lämpötila [ $^{\circ}C$ ]	Paine(abs.) [ $bar$ ]
Väliottohöyrylinjasta lähtevä linja	2.0931	317	9.15325
Reduktioventtiilin jälkeinen linja	0.8	174	8.691967
Omakäyttöhöyry linjaan	0.6696	184.77	8.683086
Lipeätehdas	1.6426	180.5	8.370568
Kloraatti N1 ja N2	0.9901	171.97	8.475304
Kloraatti N3	0.7	177.81	8.463949
Tulitorvi-tuliputkikattilasta lähtevä linja	1.5092	172.01	8.51325
KL-vaihtimelle lähtevä linja	0.3	172.01	8.506839



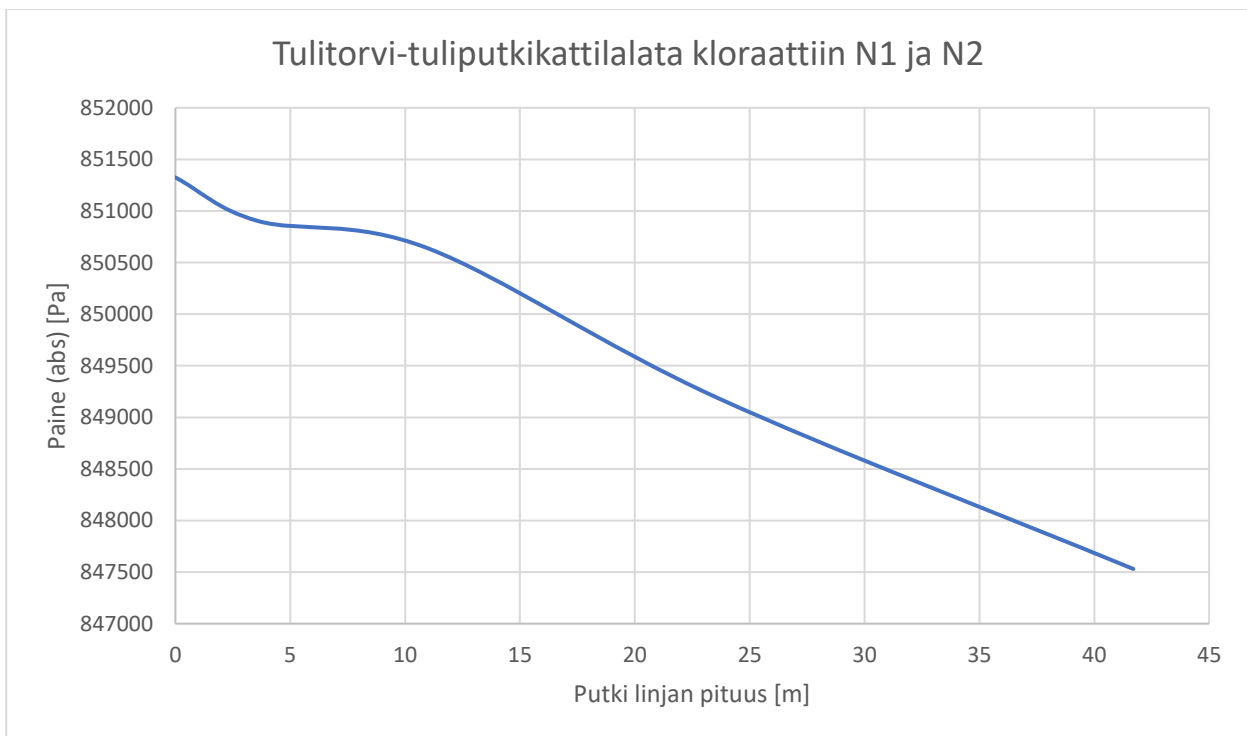
**Kuva 14:** Turbiinin väliotolta lähtevä linja lipeätehtaaseen asti (Excel)



**Kuva 15:** Turbiinin väliotolta lähtevä linja kloratti N3:en asti. (Excel)



**Kuva 16:** Apukattilalaitoksen tulitorvi-tuliputkikattilalta lähtevä linja kloraaatti N3:en asti. (Excel)



**Kuva 17:** Apukattilalaitoksen tulitorvi-tuliputkikattilalta lähtevä linja kloraaatti N1:lle ja N2:lle asti. (Excel)

Tarkastellaan vielä esimerkin vuoksi kuinka suuri osuus painehäviöistä kuuluu kitkapainehäviölle ja paikallishäviölle. Tarkastelu välinä otetaan väliottohöyrylinja lipeätehtaaseen saakaan. Tavallisesti jos käsitellään prosesseja, joissa on monen sadan metrin pituiset putkistolinjat, niin kitkapainehäviön osuus painehäviöistä kyseisissä prosesseissa on suurempi kuin paikallishäviöiden, mutta teollisissa prosesseissa on usein monenlaisia putkisto käyriä, T-haaroja ja erilaisia venttiilejä linjassa. Suuri määrä putkisto komponentteja lyhyellä kantamalla voi aiheuttaa suurempia painehäviöitä kuin kitkapainehäviö. Kitkapainehäviöiden ja paikallishäviöiden osuudet koko painehäviöstä tarkastellaan ottamatta huomioon korkeuden muutoksen aiheuttamaa painehäviön osuutta. Tarkastellaan myös taulukkoa 7, josta nähdään paine-erot prosessin pää kohteiden välillä, kuten väliottohöyrylinjalta lipeätehtaaseen, väliotosta kloraatti N3:en, tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N1:lle ja N2:lle, sekä tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N3:lle.

**Taulukko 7:** Paine-erot pää kohteiden välillä

<b>Putki linjat</b>	<b>Paine-erot <math>\Delta p</math> [Pa]</b>
Väliottohöyrylinjalta lipeätehtaaseen saakaan	78268.2
Väliottohöyrylinjalta kloraatti N3:lle saakaan	68930.1
Tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N3:lle saakaan	4930.1
Tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N1:lle ja N2:lle saakaan	3794.6

**Taulukko 8:** Väliottohöyrylinjalta lipeätehtaaseen asti, painehäviöiden osuudet

<b>Painehäviön tyyppi</b>	<b>Painehäviön osuus koko painehäviöstä <math>\Delta p</math> [%]</b>
Kitkapainehäviö	33
Paikallishäviö	67

Tarkastellaan myös tilannetta, jos putket prosessissa vaihdetaan uusiksi. Uusien putkien ekvivalenttikarheudeksi asetetaan 0.05 mm. Tavallisesti uuden ruostumattoman teräksen ekvivalenttikarheus ilmoitetaan olevan noin 0.002 mm, mutta otetaan huomioon mahdolliset epätarkkuudet mittauksissa ja putkien sisäpinnan vahingoittaminen asennustöiden aikana, minkä vuoksi oletan uusien putkien keskimääräiseksi ekvivalenttikarheudeksi 0.05 mm. Saatuja tuloksia analysoidaan johtopäätökset osiossa.



**Taulukko 9:** Prosessihöyry systeemin eri kohdissa, ekvivalenttikarheus 0.05 mm.

Putki linja	Massavirta [ $kg/s$ ]	Lämpötila [ $^{\circ}C$ ]	Paine(abs.) [ $bar$ ]
Väliottohöyrylinjasta lähtevä linja	2.0931	317	9.10825
Reduktioventtiilin jälkeinen linja	0.8	174	8.675406
Omakäyttöhöyry linjaan	0.6696	184.77	8.667104
Lipeätehdas	1.6426	180.5	8.401403
Kloraatti N1 ja N2	0.9901	171.97	8.481083
Kloraatti N3	0.7	177.81	8.471288
Tulitorvi-tuliputkikattilasta lähtevä linja	1.5092	172.01	8.51325
KL-vaihtimelle lähtevä linja	0.3	172.01	8.507227

**Taulukko 10:** Paine-erot pää kohteiden välillä, ekvivalenttikarheus 0.05 mm.

Putki linjat	Paine-erot $\Delta p$ [Pa]
Väliottohöyrylinjalta lipeätehtaaseen saakaan	70684.7
Väliottohöyrylinjalta kloraatti N3:lle saakaan	63696
Tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N3:lle saakaan	4196.2
Tulitorvi-tuliputkikattilalta kloraatti N1:lle ja N2:lle saakaan	3216.7

Tehdään yksi laskuesimerkki ja vertaillaan saatu arvo ohjelman antamaan arvoon. Tarkastellaan tulitorvi-tuliputkikattilalta lähtevän linjan ensimmäiset 6 metriä putken pituutta, missä vastaan tulee 3 T-haaraa, 2 luistiventtiiliä ja 1 yhdeksänkymmenen asteen putki käyrä. Putki koko tarkastelu kohdassa on DN 200, jonka sisähalkaisija on 206.5 mm. Putken ekvivalenttikarheus on 0.15 mm. Selvitetään ensin virtaavan höyryn nopeus, jonka jälkeen voidaan laskea Reynoldsin luku. Kyseisessä kohdassa putkivirtauksen massavirta ja lämpötila pysyy vakiona.

$$V = \frac{q_m}{\rho \cdot A} = \frac{1.5092 \frac{kg}{s}}{4.37 \frac{kg}{m^3} \left( \pi \left( \frac{206.5 \cdot 10^{-3} m}{2} \right)^2 \right)} = 10.31 \frac{m}{s} \quad (13)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{avg} \cdot D}{\mu} = \frac{4.37 \frac{kg}{m^3} \cdot 10.31 \frac{m}{s} \cdot 206.5 \cdot 10^{-3} m}{14.699 \cdot 10^{-6} Pas} = 632954 \quad (14)$$

Reynoldsin luku on hyvin turbulenttinen ja arvo kitkakertoimelle voidaan laskea käyttäen Colebrook-yhtälöä tai Haalandin-yhtälöä, sekä voidaan katsoa Moodyn käyrästä, kun tietää suhteellisen

pinnankarheuden. Arvot putkistolinjan komponenteille katsotaan Fluid mechanics kirjallisuuden taulukoista. Moodyn käyrästä.

$$f(Re, \varepsilon/D) \approx 0.018$$

Komponenttien yhteen laskettu kertavastuskerroin

$$\sum K_L = 1.3$$

On myös muistettava että, virtaus liikkuu pystysuunnassa ja nousee 3.2 metrin korkeudelle referenssipinnan yläpuolelle yhdeksänkymmenen asteen kulmassa ja kääntyy sen jälkeen vaakasuoraan virtaukseen. Nyt voidaan laskea painehäviö kyseisellä putki pituudella käyttämällä yhtälöä (9).

$$\Delta p = \left(0.018 \cdot \frac{6 \text{ m}}{206.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} + 1.3\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot 4.37 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(10.31 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 4.37 \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \sin(90^\circ) \cdot 3.2 \text{ m} \quad (15)$$

$$\Delta p = 560.6 \text{ Pa}$$

Ohjelma antaa samalle putki pätkälle painehäviöksi 444.4 Pa:a. Ero johtuu todennäköisesti siitä että määritin laskussa kitkakertoimen Moodyn käyrästä, jolloin tulee tietty epätarkkuus. Ohjelma selvittää kitkakertoimen tarkkaan iteratiivisesti. Myös komponenttien kertavastuskerrointen määrittäminen oli hyvin epätarkka, sillä kirjallisuudesta löytyy vain suuntaa antavia arvoja. Ohjelma otti huomioon T-haaroissa putkikoot ja venttiilien koot, sekä niiden vaikutus systeemiin kokonaisuudessa. Ero tuloksissa ei ole kovin oleellinen putkistolinjan analyysin kannalta.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mitä suuremmat ovat putkistolinjassa tapahtuvat painehäviöt, sitä suurempiin prosessi kustannuksiin se johtaa. Tarkastelu mallissa huomataan, että suuremmat painehäviöt prosessissa johtaa siihen että, turbiinin väliotolta lähtevän höyryn paineen on asetettava suurempiin arvoihin prosessin massavirtojen ylläpitämisen vuoksi. Mitä suuremmassa paineessa turbiinin väliotolta lähtevä höyry on, sitä vähemmän höyryä turbiinissa paisuu mahdollisimman alhaisempaan paineeseen, minkä seurauksena luovuttaen vähemmän energiaa. Prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa vähentämällä putkistolinjoissa tapahtuvaa painehäviötä.

Katsomalla yhtälöitä (9) ja (10) huomataan että, yksi keinoista vaikuttaa painehäviöihin on lyhentää putkilinjan pituutta, sillä putken pituus on verrannollinen kitkasta aiheutuvaan painehäviöön. Laitosten ja tehtaiden sijainti rajoittaa putkilinjan mahdollista lyhentämistä, sekä voimalaitoksen

sisällä monenlaisen laitoskomponentin takia tilat ovat hyvin rajoitettuja putkilinjan pituuden muuttamista varten.

Toinen vaihtoehto on kasvattaa putken sisähalkaisijaa, sillä kitkapainehäviö on kääntäen verrannollinen putken sisähalkaisijaan. Sisähalkaisijan kasvattaminen vaikuttaa myös suhteelliseen karheuteen, joka vaikuttaa kitkakertoimeen. Muuttamalla putken sisähalkaisijaa voidaan vaikuttaa kahteen tekijään Darcy-Weisbach-yhtälöön kuvaavaan kitkapainehäviötä. Kasvattamalla sisähalkaisijaa voidaan oleellisesti vähentää kitkapainehäviötä.

Putkistolinjassa on monenlaisia komponentteja, jotka vaikuttavat oleellisesti painehäviöihin. Tarkasteltavassa prosessissa on monta T-haaraa, joista sivuun lähtevät linjat ovat lauhteenpoistolinja, jäähdytysvedenlinjat ja varoventtiileille johtavat linjat, sekä osa on venttiili istutuksia, joihin voisi liittää tarvittaessa putkilinjoja. Myös on monenlaisia venttiilejä, jotka ovat prosessin ohjaamisen kannalta tärkeitä. Kyseiset komponentit ovat oleellisia laitoksen ajotavan ja turvallisuuden kannalta, sekä laitoksen sisällä on monta putkikäyrää rajoitetun tilan vuoksi. Putkistolinjan komponenttien poistaminen ei sovi ratkaisuksi.

Tarkastelemalla kuvia 14, 15, 16 ja 17 nähdään että, suurin osa painehäviöistä tapahtuu laitoksen sisällä, kun putkilinjat siirtyvät laitoksen ulkopuolelle, jossa on suoria pitkiä putkilinjoja painehäviö alkaa näyttämään lineaariselta. Väliottohöyrylinjalta tehtäisiin saakaan putkistolinjassa suurimmat painehäviöt johtuvat paikallishäviöistä. Apukattilalaitoksen prosessihöyrylinjassa ei ole niin paljon komponentteja, minkä vuoksi suurimmat painehäviöt tehtäisiin saakaan johtuvat kitkapainehäviöistä.

Vaihtamalla putket uusiksi saatujen tuloksien perusteella nähdään että, samojen massavirtojen ylläpitämiseen päästään pienemmillä lähtöpaineilla, sekä pienemmillä painehäviöillä linjassa. Tässä tapauksessa on verrattava prosessin kasvaneen hyötysuhteen uusien putkien kustannuksiin. Onko projekti taloudellisesti kannattava.

Päädytään kahteen vaihtoehtoon, joko kasvatetaan prosessissa olevien putkien sisähalkaisijat, mikä vähentää oleellisesti painehäviöitä tai vaihdetaan kyseiset putket uusiksi. Putkien sisähalkaisijoiden kasvattamisessa on monenlaisia ongelmia, sillä suurempi putki on kalliimpi, sekä joutuu vaihtamaan myös linjassa olevat komponentit, kuten esimerkiksi venttiilit isomman kokoisiksi, minkä seurauksena niiden kertavastuskerroin myös pienentyy ja paikallishäviöt laskevat.

## LÄHDELUETTELO

- Huhtinen Markku, Korhonen Risto, Pimiä Tuomo, Urpalainen Samu. 2013. Voimalaitostekniikka. Juvenes Print – Suomen Yliopistopaino Oy. Tampere. Opetushallitus. ISBN 978-952-13-5426-7.
- Kärkkäinen Henri. 2015. Vedyn käytön tarkastelu Kemira chemicals Oy:n Joutsenon tehtailla. Diplomityö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT. Kemianteekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. s.60.
- Latvala Aarto. 2015. Kattila 3:n säilöntä. Lopputyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Oulu. s.72.
- Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi, Pakkanen Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Edita 2000. Helsinki. Opetushallitus. ISBN 951-37-3360-2.
- Vakkilainen Esa, Teir Sebastian, Kulla Antto, Harja Lasse, Jokivuori Anne, Zhang Dianjun. 2003. Steam boiler technology. Picaset Oy Helsinki. ISBN 951-22-6759-4.
- Kaikko Juha, Saari Jussi. 2018. BH50A0200 Voimalaitosopin perusteet kurssi, Luento materiaali höyryvoimalaitoksen komponentit. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT.
- Ynus A. Çengel , John M. Cimbali. 2006. Fluid mechanics: fundamentals and applications. Published by McGraw-Hill companies. New York. ISBN 0-07-247236-7.
- Kauko Kimmo. 2016. Venttiilien valintaperusteet laivajärjestelmissä. Lopputyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Merenkulun koulutusohjelma. Pori. s.37.
- Harju Petteri. 2016. Voimalaitoksen lauhdejärjestelmän kartoittaminen ja kehittäminen. Tutkinto. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Helsinki. s.55
- Halonen Arttu. 2018. Prosessiteollisuuden putkilinjojen alustava painehäviölaskenta ja mitoitus. Kandidaatintyö. Tampereen teknillinen yliopisto. Energia- ja prosessitekniikka. Tampere. s.29
- Nyman Samuli. 2016. Tulitorvi-tuliputkikattilan suunnitteluprosessi. Lopputyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Energiatekniikan koulutusohjelma. Oulu. s.49