

**Alexi Isomaa**

# **LAUHDEKERÄILYSÄILIÖN PUMPPAUKSEN MODERNISOINTI**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone –ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Tammikuu 2017**

**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Yksikkö</b> Kokkola	<b>Aika</b> Tammikuu 2017	<b>Tekijä/tekijät</b> Aleksi Isomaa
<b>Koulutusohjelma</b> Kone –ja tuotantotekniikka		
<b>Työn nimi</b> Lauhdekeräilyssäiliön pumppauksen modernisointi		
<b>Työn ohjaaja</b> Martti Härkönen		<b>Sivumäärä</b> 32
<b>Työelämäohjaaja</b> Veli Niemonen		
<p>Tämän opinnäytetyön tarjosi Kokkolan Energia Oy, joka on Kokkolassa toimiva sähköä ja kaukolämpöä tuottava energiayhtiö.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli parantaa lauhdepumppausta kuumalauhteiden keräilyssäiliöön. Työn lähtökohtana oli mitoittaa vanhan ja huonokuntoisen lauhdepumpun tilalle uusi pumppu, joka toimii optimaalisella työalueella. Työn teoriaosuudessa käsitellään höyryvoimalaitoksia, ja niihin liittyviä komponentteja. Koska työ tehdään sähköä ja kaukolämpöä tuottavaan höyryvoimalaitokseen, oli luontevaa tarkastella siihen liittyvää teoriaa. Työ liittyy läheisesti pumppaukseen, joten työssä käsitellään myös pumppaustekniikkaa.</p> <p>Teoriaosuuden jälkeen alkaa varsinainen käytännön osuus, jossa aluksi kerrotaan lauhdejärjestelmän pääkomponentit, sekä todetaan järjestelmän yleinen toimivuus ja kunto. Aluksi perehdyttiin Kokkolan Energian diagnostiikkaohjelman avulla lauhdemääriin eri ajanjaksoina, ja siihen miten lauhdemäärät vaihtelevat eri ajotilanteista riippuen. Näiden selvittyä alkoi uuden lauhdepumpun mitoitus. Työn toimeksiantajan kanssa sovittiin, että pumppu lasketaan sekä lauhteen maksimivirtauksen, että keskimääräisen virtauksen perusteella, jotta saataisiin tarkka käsitys pumpun todellisesta tehontarpeesta. Pumpulle laskettiin tarvittavat nostokorkeudet, sekä pumpun sijoituskorkeus säiliöön nähden.</p>		

<b>Asiasanat</b> Lauhdekeräilyssäiliö, Lauhdepumppu, Höyryvoimalaitos
--

**ABSTRACT**

<b>CENTRIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES</b> Kokkola	<b>Date</b> January 2017	<b>Author</b> Aleksi Isomaa
<b>Degree programme</b> Mechanical Engineering and Production Technology		
<b>Name of thesis</b> Modernisation of the pumping of the condensation tank		
<b>Instructor</b> Martti Härkönen		<b>Pages</b> 32
<b>Supervisor</b> Veli Niemonen		
<p>The principal of this thesis is Kokkola Energy Ltd which is an energy company which produces electricity and district heating.</p> <p>The purpose of this thesis was to improve condensation pumping from the condensation tank to the feed water tank. The starting point for the work was to design a new condensation pump to replace the old one, which operates in an optimal working space. The theory part of the thesis considered power plant technology and pumping technology.</p> <p>In a practical share of the thesis it was concentrated on the condensation system which includes condensation tank and pumps. The condensate container is old but in good condition. First it was begun to investigate the mass currents of condensates which were found out with the help of the diagnostics tool. The size of the condensate flow will vary during different time periods which are caused by the changes in the process.</p> <p>When the size of the condensate flow was known it was possible to dimension the new condensation pump. With the mandatory it was agreed that the new condensation pump is dimensioned both to the maximum current and to the average condensation current which case it is possible to know the right efficiency of the pump.</p>		

<b>Key words</b> Condensation tank, condensation pump, Power plant
---

## KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

CHP = Sähköenergian ja lämmön yhteistuotanto. Tulee Englannin kielen sanoista Combined Heat and Power.

LKS 2= Lauhteiden keräilyssäiliö 2

1 bar = 100kPa

KL = Kaukolämpö

Kavitaatio = Ilmiö, jossa vesi höyrystyy riittävän suuressa paineessa salamannopeasti pumpun siiven pintaan aiheuttaen voimakkaan paineiskun.

Entalpia = Termodynamiikassa energiaa ilmaiseva suure. Kutsutaan myös lämpösisällöksi.

Q = Tilavuusvirta

H = Pumpun nostokorkeus

MW = 1000 000W

NPSH = Net positive suction head. Kertoo suoraan pumpun imukorkeuden metreissä, m

**TIIVISTELMÄ  
ABSTRACT  
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY  
SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY .....</b>	<b>2</b>
2.1 Energiantuotannon kehittyminen Kokkolassa .....	2
2.2 Organisaatio .....	3
<b>3 HÖYRYVOIMALAITOKSET .....</b>	<b>4</b>
3.1 Höyrykattilat .....	4
3.1.1 Luonnonkiertokattilat .....	4
3.1.2 Pakkokierto kattilat .....	5
3.2 Höyryturbiini.....	6
3.3 Lauhdutusvoimalaitokset .....	7
3.3.1 Polttoaineet.....	8
3.3.2 Hyötysuhteen parantaminen lauhdutusvoimalaitoksissa .....	8
3.4 Vastapainevoimalaitokset.....	9
<b>4 PUMPPAUSTEKNIikka.....</b>	<b>10</b>
4.1 Syrjäytyspumput .....	11
4.2 Dynaamiset pumput .....	11
4.2.1 Keskipakopumput.....	11
4.2.2 Aksiaalipumput.....	12
4.3 Kavitaatio.....	12
4.4 Pumpun ominaiskäyrä .....	13
<b>5 LKS 2 -LAUHDEJÄRJESTELMÄ .....</b>	<b>15</b>
5.1 Lauhdekeräilysäiliö 2.....	15
5.2 LKS 2:n lauhdepumput .....	16
5.2.1 Päälauhdepumppu.....	16
5.2.2 Minimikiertopumppu .....	17
5.3 Lauhdesuodatin.....	18
<b>6 UUDEN PUMPUN MITOITUS MAKSIMIVIRTAUKSELLE .....</b>	<b>20</b>
6.1 Pumpun toiminta-alue maksimivirtauksella .....	20
6.1.1 Staattisen nostokorkeuden määrittäminen maksimivirtauksella .....	20
6.1.2 Dynaamisen nostokorkeuden määrittäminen maksimivirtauksella .....	21
6.1.3 Todellinen nostokorkeus.....	24
6.1.4 NPSH.....	24
6.2 Pumpun tehon tarve maksimivirtauksella.....	25
<b>7 PUMPUN MITOITUS KESKIMÄÄRÄISELLE VIRTAUKSELLE .....</b>	<b>26</b>
7.1 Dynaaminen ja todellinen nostokorkeus keskimääräisellä virtauksella.....	26
7.2 NPSH keskimääräisellä lauhdevirralla.....	28
7.3 Pumpun tehon määrittäminen keskimääräiselle lauhdevirralla.....	28

<b>8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....</b>	<b>29</b>
<b>8.1 Työni lähtökohdat .....</b>	<b>29</b>
<b>8.2 Kirjoitusprosessin vaiheet .....</b>	<b>29</b>
<b>8.2.1 LKS 2:een perehtyminen .....</b>	<b>30</b>
<b>8.2.2 Pumpun mitoitus.....</b>	<b>30</b>
<b>8.2.3 Työn tuloksen pohdinta .....</b>	<b>31</b>
<b>8.3 Loppusanat .....</b>	<b>31</b>
 <b>LÄHTEET .....</b>	 <b>32</b>

## KUVIOT

KUVIO 1. Kokkolan Energian organisaatio	3
KUVIO 2. Luonnonkiertokattila	5
KUVIO 3. Pakkokiertokattila	6
KUVIO 4. Lauhdutusvoimalaitoksen toiminta	7
KUVIO 5. Lauhdutusvoimalaitoksen sankey-diagrammi	8
KUVIO 6. Vastapainevoimalaitoksen toiminta	9
KUVIO 7. Pumppujen toiminta-alueet	10
KUVIO 8. Keksipakopumpun kavitointi	13
KUVIO 9. Pumpun ominaiskäyrä	14
KUVIO 10. LKS 2:en kaaviokuva	15
KUVIO 11. Lauhdekeräilysäiliö 2	16
KUVIO 12. LKS 2 päälahdepumppu	17
KUVIO 13. Minimikiertopumppu	18
KUVIO 14. Lauhdesuodatin	19
KUVIO 15. Moodyn käyrästä 1	22
KUVIO 16. Pumpun sijoitus	24
KUVIO 17. Moodyn käyrästä 2	26

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytteen tarjosi Kokkolan Energia Oy, joka on Kokkolan kaupungin omistama energiayhtiö. Kokkolan Energia tuottaa kaukolämpöä ja sähköä kahdella voimalaitoksella, joista toinen on täysin Kokkolan Energian omistama. Toisen ja uudemman voimalaitoksen omistaa Pohjolan Voima Oy, jossa Kokkolan Energia on osakkaana. Tätä kautta Kokkolan Energia saa osan tuotetusta energiasta omaan käyttöön.

Opinnäytetyö koskee lauhdeiden keräilysäiliön pumppauksen modernisoimista. Työn lähtökohtana oli lauhdepumpun huono kunto, sekä panospumppauksesta aiheutuvat haitat prosessissa varsinkin kesäajossa. Olen itsekin kesätoissa aiempina vuosina huomannut ongelman, ja nyt sen korjaamiseksi tarjoutui tilaisuus opinnäytetyön kautta. Työtä aloitettaessa oli selvää, että vanhan pumpun tilalle tarvitaan uusi, sillä vanha pumppu ei ole suunniteltu LKS 2:ee, vaan se on siirretty aikoinaan käytettynä toisesta paikasta. Pumppu on LKS lauhdevirtoihin nähden liian suuritehoinen, ja ei myöskään ole taajuusmuuttajaohjattu. Tästä syystä pumppu joutuu toimiessaan pyöriä täydellä teholla, mikä on huono asia kahdella tavalla. Ensinnäkin pumppu ei toimi optimaalisella työalueellaan, ja kuluttaa paljon sähköä. Toisaalta pumppu aiheuttaa prosessiin suurta heiluntaa, kun syöttövesisäiliössä olevaa vettä kylmempää lauhdetta pumpataan syöttövesisäiliöön. Työtä olisi voinut laajentaa myös LKS 2:n ulkopuolella vaikuttaviin prosessin osiin, mutta päätin rajata työn koskemaan ainoastaan LKS 2 pumppaukseen liittyviä asioita.

Työn teoreettisessa osiossa käyn läpi voimalaitostekniikkaa sekä pumppaustekniikkaa. Näiden pohjana olen käyttänyt luotettavaa lähdekirjallisuutta, sekä luotettavia internetlähteitä. Keskeisimpänä kirjallistenä käytin Huhtisen ”Voimalaitostekniikka”- kirjaa, johon kuuluu keskeisenä osana höyrykattilat, höyryturbiinit, sekä voimalaitostyypit. Pumppaustekniikan osiossa kirjoitan lähinnä eri pumpputyypeistä, millaisia ne ovat ja miten ne eroavat toisistaan.

Työn tutkimuksellisessa osassa käydään läpi LKS 2:en pääkomponentit, jotka ovat itse kuumalauhdesäiliö, pumput ja lauhdesuodatin. Lisäksi tässä osiossa osoitetaan laskennallisesti uuden lauhdepumpun kriittisimmät arvot. Työn lopussa pohditaan työn tuloksia työn eri prosessien aikana.

## 2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY

Kokkolan Energia on monipuolinen sähkön ja lämmön tuotantoon erikoistunut konserni, jonka toimipiste sijaitsee Kokkolassa. Konserniin kuuluu 120 työntekijää ja liikevaihto on noin 50 miljoonaa euroa. Kokkolan Energia omistaa myös sähkönsiirtoyhtiö KENET Oy:n, joka huolehtii sähkön siirrosta. Kokkolan Energialla on energiantuotantoa sekä omilla tuotantolaitoksilla, sekä lisäksi Pohjolan Voiman omistajuuden kautta osakkuusenergiaa. Kokkolan Energia tuottaa kaukolämpöä noin 3250 asiakkaalle (2015) Kokkolan alueella, mikä vastaa vuodessa noin 500 GWh/a (2015) kaukolämpöenergiaa. Sähkön siirtoasiakkaita on KENET Oy:n kautta noin 22 300 (2015). Kokkolan Energia tuottaa myös sähköä kahdella tuotantolaitoksella, joiden yhteenlaskettu tuotanto vuodessa on noin 125 GWh/a (2015). (Kokkolan Energian mediatiedote 2016)

KENET Oy on Kokkolan Energian 100% omistama sähköverkkoyhtiö, jonka tehtävänä on huolehtia sähkön jakelusta kanta-Kokkolan alueella. Yhtiö vastaa myös verkon käytöstä, suunnittelusta ja kehittämisestä.

### 2.1 Energiantuotannon kehittyminen Kokkolassa

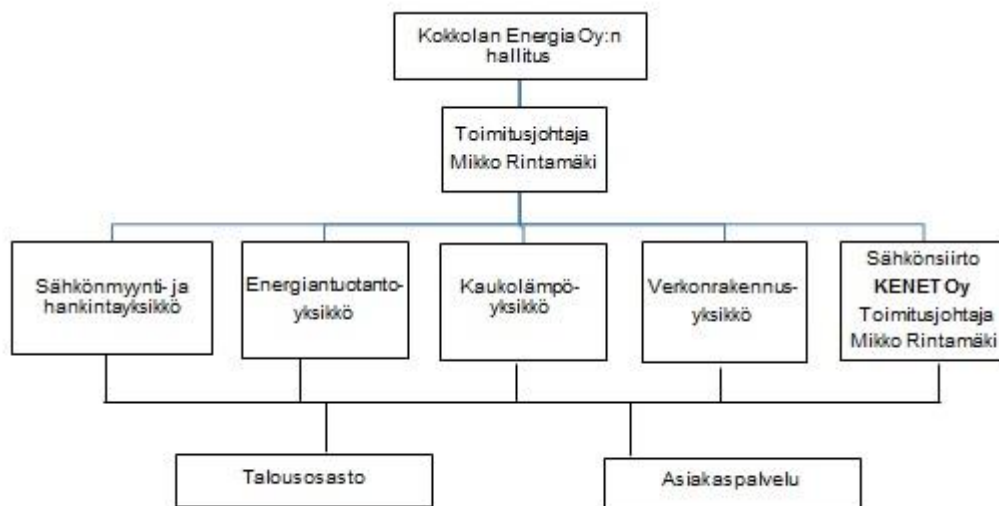
Kokkolan energiantuotannolla on pitkä historia, joka juontaa juurensa aina 1904 luvulle asti. Vuonna 1904 Kokkolan kaupunginhallitus päätti, että Kokkolaan perustetaan oma sauna- ja sähkölaitos, jossa tulisi olemaan pieni sähköä tuottava höyryturbiini ja kaupungin yleinen sauna. Sauna- ja sähkölaitoksen tarkoituksena oli myös mahdollistaa sähköisen katuvalaistuksen toteuttaminen. Sauna- ja sähkölaitos saatiin valmiiksi vuonna 1905 ja ensimmäinen katulamppu sytytettiin Isonkadun ja Torikadun kulmaan jo samana vuonna. (Kokkolan Energian yritysesitys 2015.)

Outokummun voimalaitos rakennettiin 1960-luvulla, jonka pääosat ovat edelleen käytössä. Turbiinilaitos on kolme turbiinia, joilla on tuotettu sähköä samanaikaisesti. Nykyään käytössä on näistä kolmesta vain uusin, Unkarissa 1977 valmistettu Lang-turbiini. Voimalaitokselle on hankittu vuosien varrella useita kattiloita, joista osa on tarkoitettu ainoastaan prosessihöyryn tuotantoon. Fortumin omistuskaudella vuonna 1994 valmistui polttoaineteholtaan 108 MW kiertoleijupetikattila C5, joka käyttää polttoaineenaan turvetta ja biopolttoaineita. Kattilan höyryllä tuotetaan vastapaineturbiinissa sähköä- ja kaukolämpöä. Tämä yksikkö on nykyään yhtiön pääasiallisessa käytössä. (Kokkolan Energian yritysesitys 2015)



## 2.2 Organisaatio

Kokkolan Energia Oy:n organisaatio työllistää 120 henkilöä monenlaisissa työtehtävissä. Organisaation ylin päättävä elin on Kokkolan Energia Oy:n hallitus. Toimitusjohtajana toimii Mikko Rintamäki. Toimitusjohtajan alapuolella toimivat eri yksiköt, jotka vastaavat omasta toiminta-alueestaan. Sähkönmyynti- ja hankintayksikkö vastaa sähkön myynnistä ja uusista asiakkuuksista. Energiantuotantoyksikkö vastaa kaukolämmön ja sähkön tuotannosta eri voimalaitosyksiköissä. Kaukolämpöyksikkö vastaa verkon rakennuksesta ja sen kunnossapidosta. Verkonrakennusyksikkö vastaa esimerkiksi sähköverkosta, katuvalaistuksista ja liikennevaloista (Kokkolan Energian yritysesitys 2016.)



KUVIO 1. Kokkolan Energian organisaatio (Kokkolan Energian yritysesitys 2016)

### 3 HÖYRYVOIMALAITOKSET

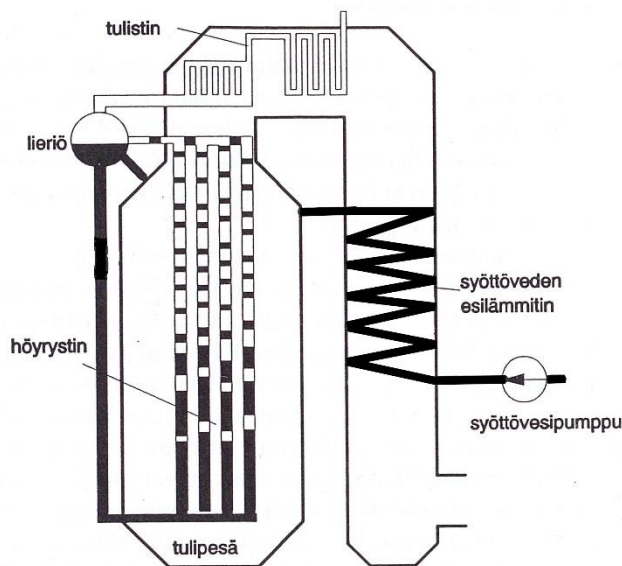
Höyryvoimalaitokset ovat sähkön ja lämmöntuotantoon tarkoitettuja tuotantolaitoksia, jotka jaetaan turbiinista ulostulevan höyrynpaineen perusteella lauhdutusvoimalaitoksiin ja vastapainevoimalaitoksiin. Lauhdutusvoimalaitoksissa höyrynpaine ja lauhtumislämpötila ovat matalampia kuin vastapainevoimalaitoksissa, joten lauhtumislämpöä ei voida hyödyntää kaukolämmön tuotantoon. Vastapainevoimalaitoksissa höyrynpaine ja sitä kautta lauhtumislämpötila ovat hyvin korkeita, joten höyryä voidaan hyödyntää myös kaukolämmön tuotantoon. Tästä eroavaisuudesta johtuen lauhdutusvoimalaitokset tuottavat pelkästään sähköä. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpilainen 2013, 12.)

#### 3.1 Höyrykattilat

Höyrykattilat voidaan jakaa vesihöyrypiirin rakenteen mukaan suurvesikattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Suurvesikattiloissa savukaasut kulkevat tulitorvessa, ja vesi höyrystyy putkien ulkopuolella. Vesiputkikattiloissa vesi höyrystyy putkien sisällä. Nykyaikaiset voimalaitokset käyttävät nimenomaan vesiputkikattiloita, koska rakenne kestää paremmin korkeita paineita. Suurvesikattiloita käytetään lähinnä silloin, kun tarvitaan matalapaineista prosessihöyryä, eikä sähköntuotannolle ole tarvetta. Voimalaitoksissa käytetyt vesiputkikattilat voidaan jakaa vielä luonnonkiertokattiloihin, läpivirtauskattiloihin ja pakokiertokattiloihin. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2004, 111.)

##### 3.1.1 Luonnonkiertokattilat

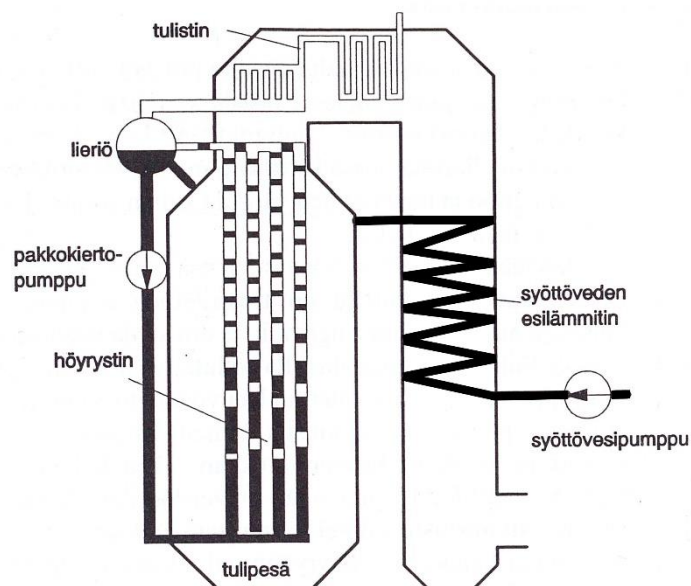
Luonnonkiertokattila on tyypiltään vesiputkikattila, jossa höyrystyvä vesi virtaa putkien sisällä. Vesihöyrypiiri on piiri, jossa vesi höyrystyy. Vesi-höyrypiiriin kuuluu keskeisinä komponentteina vedenesilämmitin, lieriö, höyrystin ja tulistin. Vesi tuodaan kattilaan syöttövesisäiliöstä syöttövesipumpun avulla. Hyötysuhteen parantamiseksi syöttövesi esilämmitetään lähelle veden kyllästyslämpötilaa. Veden esilämmitys tehdään savukaasujen avulla, jotka samalla jäähtyvät. Lämmitetty syöttövesi johdetaan lieriöön, josta se kulkeutuu laskuputkia pitkin kattilan alaosaan. Höyrystinputkissa vesi höyrystyy osittain, ja veden ja höyryn seos johdetaan uudestaan lieriölle, jossa vesi ja höyry erotetaan toisistaan. Lieriöstä höyry jatkaa matkaansa tulistinputkiin, jossa se tulistuu. (Huhtinen ym 2004, 113.)



KUVIO 2. Luonnonkiertokattila (mukaillen Huhtinen 2004.)

### 3.1.2 Pakkokiertokattilat

Pakkokiertokattila eroaa luonnonkiertokattilasta siten, että siinä on pumppu höyrystimen ja lieriön välissä. Syöttövesi esilämmitetään samalla tavalla kuin luonnonkiertokattilassa ja johdetaan lieriöön syöttövesipumpun avulla. Lieriöstä vesi pumpataan höyrystimelle, jossa se höyrystyy osittain ja palaa takaisin lieriön yläosaan. Lieriöstä kylläinen höyry johdetaan tulistimiin. Veden höyrystymisen estämiseksi pakkokiertopumppu täytyy sijoittaa useita metrejä lieriön alapuolelle. Tätä veden höyrystymistä pumpun sisällä kutsutaan myös kavitoinniksi. Pakkokiertokattilat soveltuvat pakkokierron ansiosta korkeammille paineille kuin luonnonkiertokattilat. Paine ei voi kuitenkaan olla ylikriittinen ( $p > 221$  bar) koska silloin vesi ja höyry eivät erotu lieriössä liian pienestä tiheyserosta johtuen. Pakkokiertokattilan tuorehöyrin paine voi käytännössä olla maksimissaan 190 bar, joka on hiukan alle ylikriittisyyden rajan. Pakkokierto mahdollistaa myös höyryputkiston erittäin vapaan asettelun kattilan sisälle. Myös painehäviöt voidaan mitoittaa suuremmiksi, kuin luonnonkiertokattiloissa. (Huhtinen ym 2004, 118.)



KUVIO 3. Pakkokierto-kattila (mukaillen Huhtinen 2004.)

### 3.2 Höyryturbiini

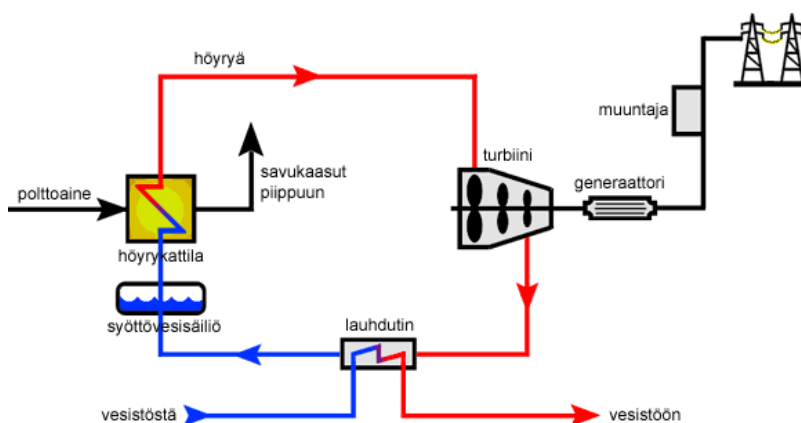
Höyryturbiinit ovat lämpövoimakoneita, jotka muuttavat höyryn paine- ja lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi. Turbiinissa höyryn energiasisältö eli entalpia muutetaan virtausenergiaksi, jonka jälkeen se muuttuu mekaaniseksi energiaksi, joka lopulta pyörittää turbiinin akselia. Höyryturbiineja käytetään pääasiallisesti höyryvoimalaitoksissa ja ydinvoimalaitoksissa, joissa ne tuottavat sähköenergiaa. Turbiineja on monen tehoisia ja monen tyyppisiä. Turbiinien teho vaihtelee aivan pienistä 0,5 kW koneista aina 600 000 kW asti. Turbiineja on rakenteellisesti erilaisia, ja ne voidaan luokitella tasapaineturbiineihin, ylipaineturbiineihin, aksiaaliturbiineihin, lauhdeturbiineihin ja vastapaineturbiineihin (Huhtinen ym 2013, 109.)

Kokkolan Energian molemmissa voimalaitoksissa on käytössä vastapaineturbiinit. Vastapaineturbiinia käytetään silloin, kun on tarvetta sähkö- ja lämpöenergian yhteistuotannolle. Vastapaineturbiinista höyry poistuu paineisena, josta se johdetaan edelleen prosessihöyryksi tai sillä tuotetaan KL-vaihtimen kautta kaukolämpöä. Vastapaineturbiinilla varustetussa voimalaitoksessa pidetään lämmöntuotantoa yleensä määräävänä tekijänä ja sähköntuotantoa toissijaisena (Hoisko 2013, 3.)

### 3.3 Lauhdutusvoimalaitokset

Lauhdutusvoimalaitokset suunnitellaan tuottamaan sähköä mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella, mutta parhaimmillaankin päästään ainoastaan noin 44% hyötysuhteeseen. Lauhdutusvoimalaitokset ovat yleensä suuria, kokoluokaltaan yli 100 MW peruskuorma- tai puskurilaitoksia, joiden häviöt ovat suuret huonon hyötysuhteen takia. Hyötysuhde on verrannollinen tarjolla olevan jäähdytysveden lämpötilaan, joten talvisin hyötysuhde kasvaa veden ollessa kylmempää. (Lintunen T, 2006.)

Kuviosta 4 selviää lauhdutusvoimalaitoksen toimintaperiaate, joka perustuu veden ja vesihöyryn kiero- prosessiin, jossa syöttövesipumpulla paineistettu vesi syötetään höyrykattilaan. Kattilassa korkeapaineinen vesi höyrystyy korkeapaineiseksi höyryksi, joka vielä tulistetaan. Tulistettu höyry johdetaan turbiinille, jolloin osa höyryn lämpöenergiasta saadaan muutettua mekaaniseksi energiaksi, joka pyörittää turbiinia. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2004, 14.) Jotta höyryturbiinin paisunnasta saataisiin mahdollisimman suuri, pyritään lauhduttimen paine saamaan mahdollisimman pieneksi. Lauhduttimen paineen suuruus riippuu käytettävissä olevasta ympäristön matalimmasta lämpötilasta. Lauhdutin toimii lämmönsiirtimenä, jonka sisällä putkistoissa virtaa jäähdytysvesi. Turbiinista tuleva höyry lauhdetaan lauhduttimen putkiston pinnalla vedeksi, jolloin prosessi palannut alkupisteeseen. (Perttula M 2000, 183.)



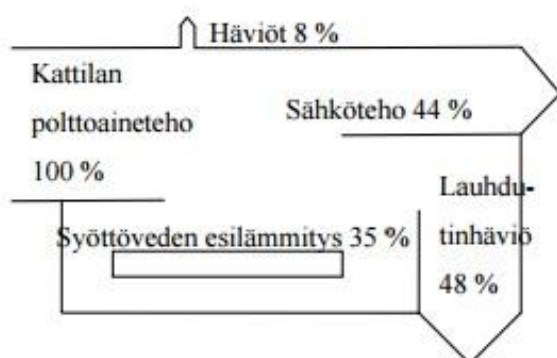
KUVIO 4. Lauhdutusvoimalaitoksen toiminta (mukaillen Pohjois-Karjalan AMK 2003.)

### 3.3.1 Polttoaineet

Lauhdutusvoimalaitokset käyttävät polttoaineinaan pääasiallisesti kivihiiltä ja öljyä. Ydinvoimalaitokset ovat periaatteellisesti myös lauhdutusvoimalaitoksia, mutta niiden lämpöenergia kehitetään ydinreaktorissa. Haapavedelle rakennettiin vuonna 1989 suuri kattilateholtaan 390 MW lauhdutusvoimalaitos, joka on ainut turvetta polttoaineenaan käyttävä lauhdutusvoimalaitos Suomessa. Nykyaikaiset kivihiilivoimalat pystyvät polttamaan jonkin verran myös biopolttoaineita, kuten puuhaketta. Kivihiilen matala hinta suhteessa puupolttoaineisiin on kuitenkin pitänyt puupolttoaineen hyödyntämisen lauhdesähkön tuotannossa hyvin vähäisenä. Päästökauppa rajoittaa kivihiilen polttamista, koska kivihiilen polttamisessa syntyy runsaasti hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>)

### 3.3.2 Hyötysuhteen parantaminen lauhdutusvoimalaitoksissa

Hyötysuhdetta voidaan parantaa monella eri tavalla muuttamalla ja kehittämällä tuotantoprosessia. Lauhdutusvoimalaitoksissa jäähdytysveden lämpötila on suurin vaikuttava tekijä hyötysuhteeseen. Valitettavasti jäähdytysveden lämpötilaan ei juurikaan voida vaikuttaa. Muita tuotantoprosessin parannuskeinoja ovat esimerkiksi tuorehöyryn paineen nostaminen, lauhdutinpaineen laskeminen, välitulistuksen käyttöön ottaminen, syöttöveden ja palamisilman esilämmittäminen. Myös yksittäisten komponenttien, kuten pumppujen ja esilämmittimien uusiminen voi parantaa hyötysuhdetta. Kuvioista 5 näkee selvästi, miten häviöt jakaantuvat lauhdevoimalaitoksessa. Syöttöveden esilämmitys tuo merkittävän parannuksen hyötysuhteeseen.

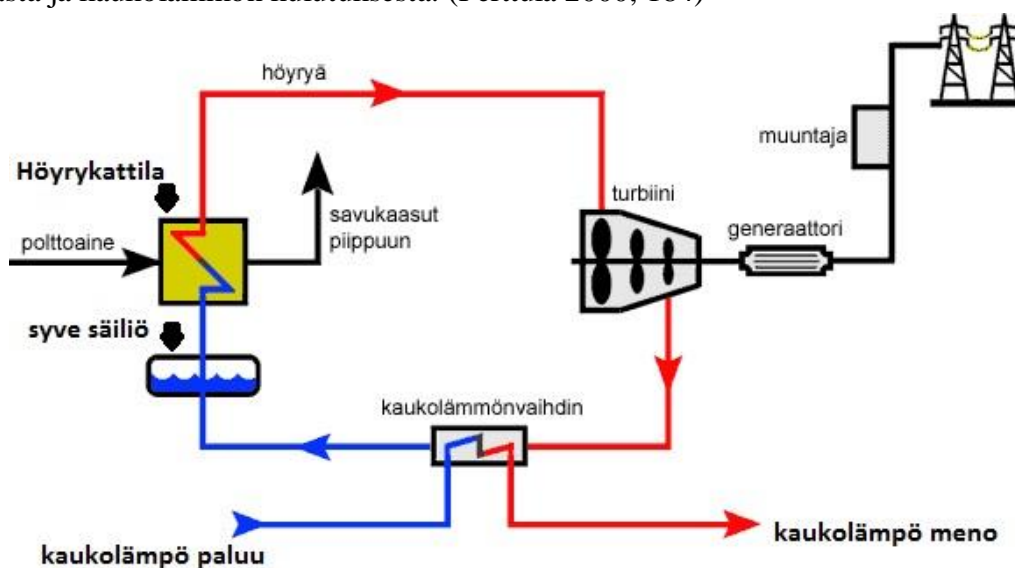


KUVIO 5. Lauhdutusvoimalaitoksen Sankey-diagrammi (mukailten Huhtinen 2004, 15)

### 3.4 Vastapainevoimalaitokset

Puhuttaessa vastapainevoimalaitoksista tai CHP-voimalaitoksista, tarkoitetaan yleensä samaa asiaa. CHP (*Combined Heat and Power*) lyhenne tulee englannin kielestä ja tarkoittaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Arkikielessä käytetään myöskin nimityksiä lämpövoimala tai lämmitysvoimalaitos. Lämpöenergiaa voidaan ottaa prosessista kahdella tavalla. Yleisin tapa on ottaa turbiinin väliotosta höyryä, josta tehdään lämmönvaihtimella kaukolämpöä. Väliottohöyryä otetaan usein myös prosessihöyryksi joko omiin, tai asiakkaiden tarpeisiin. Kaukolämmön menolämpötila on talvisaikaan jopa 120°C, jolloin kaukolämmön vaihtimen höyrypuolen paine on noin 2-3 bar. Kesäisin kaukolämmön tarve on huomattavasti pienempi, joten menolämpötila on alle 100°C. (Perttula 2000, 183)

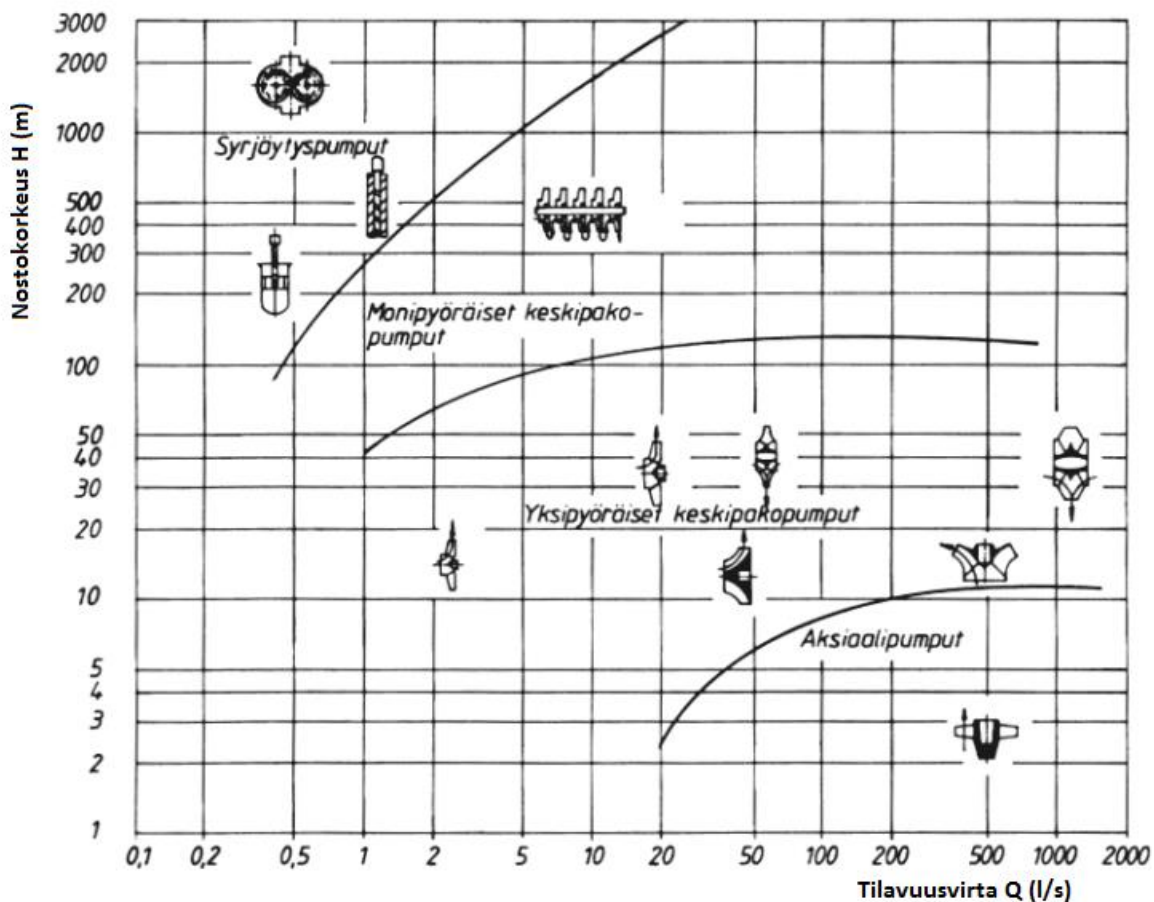
Vastapainevoimalaitosten toteuttamistapoja on useita. Turbiinista tuleva paisunut höyry voidaan lauhduttaa joko kaukolämmönvaihtimella tai merivesilauhduttimella. Väliottohöyryä voidaan myös jakaa jonkun prosessin lämmitystarpeisiin laitoksen ulkopuolelle. Vastapainevoimalaitosten ongelmana voidaan pitää sähkön ja lämmöntuotannon eriaikaista tarvetta. Kesällä lämpöenergian kulutus on pientä, mutta sähkön kulutus voi olla silti suurta. Tämä voi ajaa tilanteeseen, jolloin höyryä lauhdutetaan merivedellä tai vaihtoehtoisesti makealla vedellä, jolloin kokonaishyötysuhde huononee. Talvella tilanne voi olla päinvastainen, jolloin lämpöä joudutaan ehkä tuottamaan raskasta polttoöljyä käyttävissä kuumavesikattiloissa. Yleisesti kaukolämpölaitosten tuotantomallit vaihtelevat jatkuvasti riippuen sähkön hinnasta ja kaukolämmön kulutuksesta. (Perttula 2000, 184)



KUVIO 6. Vastapainevoimalaitoksen toiminta (mukaillen Pohjois-Karjalan AMK ja Motiva 2003.)

## 4 PUMPPAUSTEKNIikka

Pumppuja tarkasteltaessa on otettava aina huomioon kaksi tärkeää tunnuslukua, jotka ovat tuotto  $Q$  ja nostokorkeus  $H$ . Pumppaustekniikka on mekaanisen tehon muuttamista hydrauliseksi tehoksi. Pumpausteho voidaan tuottaa sähkömoottorilla, polttomoottorilla tai höyryturbiinipumpulla, joista yleisimmät ovat sähkö- ja polttomoottoripumput. Moottorin tuottama teho siirretään akselin välityksellä hydraulipumpulle. Nesteiden siirtoon tarkoitettut pumput voidaan jakaa kahteen pääryhmään: syrjäytyspumppuihin ja dynaamisiin pumppuihin. Dynaamiset pumput ovat joko keskipakopumppuja tai aksiaalipumppuja. Syrjäytyspumppuja on järkevää käyttää silloin, kun tarvitaan pieni tilavuusvirta, mutta suuri nostokorkeus. Syrjäytyspumput ovat myös parempia määräsäädössä, joten niitä on hyvä käyttää kemikaalien annosteluun. Aksiaalipumput kykenevät tuottamaan suuren tilavuusvirran, mutta nostokorkeus on pienempi. Keskipakopumput ovat näiden kahden tyypin välimaastosta niin nostokorkeuden, kuin tilavuusvirrankin suhteen. Keskipakopumpun nostokorkeutta pystytään kuitenkin parantamaan lisäämällä juoksupyöriä. Useammalla juoksupyörällä saadaan aikaan suurempi paine, ja sitä kautta parempi nostokorkeus. (Huhtinen ym 2013, 134.)



KUVIO 7. Pumppujen toiminta-alueet (mukaillen Motiva 2011)



## 4.1 Syrjäytyspumput

Syrjäytyspumpuissa syrjäytyselin syrjäyttää pumpun pesässä olevan nesteen poistoputkeen. Syrjäytyspumput ovat määränsäädöiltään hyviä, ja niiden tilavuusvirta  $Q$  pysyy lähes vakiona. Tilavuusvirran suuruus ei riipu paineesta, eikä sitä kautta nostokorkeudesta  $H$  (Huhtinen ym 2013, 135.) Syrjäytyspumpuja ovat seuraavat:

- mäntäpumput
- kalvopumput
- siipipumput
- ruuvipumput
- letkupumput
- hammaspyöräpumput

Syrjäytyspumpun tilavuusvirta ei pienene vastapaineen muuttuessa, mikä tuo suuren edun sellaisiin sovellutuksiin, joissa tilavuusvirran halutaan pysyvän mahdollisimman vakiona. Syrjäytyspumput eivät saisi käydä suljettua venttiiliä vasten, koska tiivistykset rikkoontuvat. Tämä ongelma pystytään ratkaisemaan ylivirtausventtiilillä, joka päästää nestettä imupuolelta painepuolelle. (Huhtinen ym 2013, 135)

## 4.2 Dynaamiset pumput

Dynaamisissa pumpuissa moottorin tuottama energia muutetaan pumpattavan nesteen liike-energiaksi ja paine-energiaksi. Dynaamiset pumput eroavat syrjäytyspumpuista etenkin siten, että tilavuusvirran  $Q$  kasvaessa pumpun nostokorkeus  $H$  pienenee.

### 4.2.1 Keskipakopumput

Keskipakopumput ovat eniten käytetty pumpputyyppejä teollisuudessa. Ne ovat monipuolisia, ja niitä voidaan muokata monenlaisiin sovellutuksiin. Moottori tuottama teho välitetään akselin ja kytkimen kautta yhdelle tai usealle juoksupyörälle, jotka antavat nesteelle kehän tangentin suuntaisen nopeuskomponentin. Keskipakovoiman vaikutuksesta nesteen paine nousee voittaen korkeuseron ja putkistossa olevan

vastapaineen. Nesteen poistuessa kehältä pumpun keskustaan virtaa uutta nestettä, joten virtaus on jatkuva. Juoksupyörästä neste virtaa kierukkapesään, joka ohjaa nesteen paineyhteen kautta putkistoon.

Keskipakopumpun etuja ovat halpa hankintahinta, suuret toiminta-alueet ja kyky tuottaa suuria tilavuusvirtoja ja korkeaa painetta. Kun tarvitaan korkeaa painetta ja suurta tilavuusvirtaa, joudutaan usein käyttämään kahta tai useampaa juoksupyörää, jotta saadaan tuotettua riittävän suuri paine. Varsinkin voimalaitosten syöttövesipumpuissa käytetään useampia juoksupyöriä paineiden ollessa korkeita. (Huhtinen ym 2013, 136)

#### **4.2.2 Aksiaalipumput**

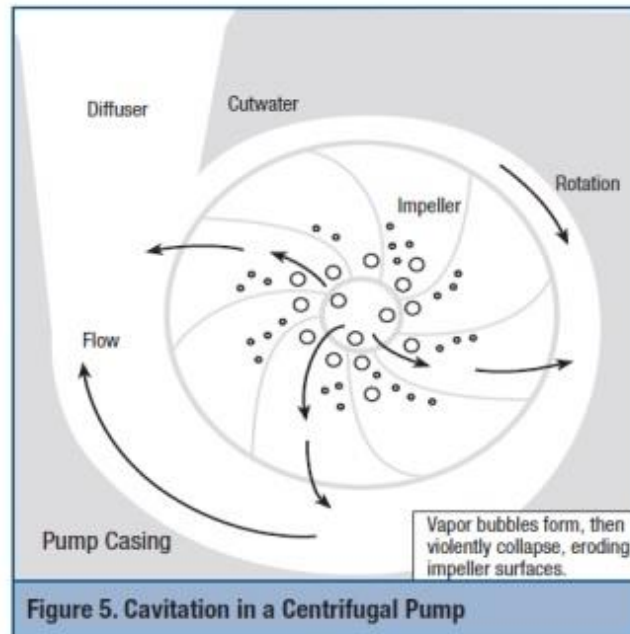
Aksiaalipumpuille on tunnusomaista, että ne ovat pystysuorassa ja neste kulkee akselin suuntaisesti juoksupyörän läpi. Niitä käytetään yleensä samankaltaisille nesteille kuin keskipakopumppua. Aksiaalipumpulla saadaan aikaan keskipakopumppua suurempi tilavuusvirta, mutta nostokorkeus on pienempi. Aksiaalipumppuja käytetään tyypillisesti esimerkiksi ydinvoimalaitoksissa, joissa jäähdytysveden tilavuusvirrat ovat huomattavan suuria.

#### **4.3 Kavitaatio**

Pumppausjärjestelmää suunniteltaessa on aina tehtävä laskelmia, jotta kavitointia ei syntyisi. Pumppu putkistoiheen tulisi suunnitella niin, että imupuolen paineolosuhteet osuvat QH-käyrälle laajalla alueella. Kavitointi on ilmiö, jossa neste alkaa höyrystyä pumpun sisällä aiheuttaen höyrykuplia, jotka rikkoutuessaan antavat kovia paineiskuja pumpun juoksupyörän siiville. Esimerkiksi keskipakopumpuissa juoksupyörän imureunalla tapahtuva kavitaatio on yleensä hankala ja kallis korjata. Paras vaihtoehto kavitoinnin ehkäisemiseksi on alentaa pumpun imukorkeutta, mutta joissakin tapauksissa voidaan suurentaa imujohdon halkaisijaa. (Bergius, Blomsten, Hedenfalk, Jonsson, Kempe, Nilsson, Pegert, Ullgren & Wennström 1978, 21.)

Lievä kavitaatio ei ole välttämättä vaarallista, mutta aiheuttaa pitkällä aikavälillä eroosiota ja pumpun kulumista. Kuitenkin jos höyrykuplien muodostuminen on suurta, alkavat niiden negatiiviset vaikutukset nousta esiin nopeammin. Kavitaatio tekee suurinta tuhoa pumpun seinämien läheisyydessä, jolloin höyrykuplan purkautumisesta johtuva isku kohdistuu suoraan seinämiin aiheuttaen suurta tuhoa. Paineiskun

voimakkuuden on arvioitu olevan jopa 7-8 MPa suuruinen, mikä aiheuttaa selviä vaurioita kaikille metalleille. (Bergius ym 1978, 21-22.)



KUVIO 8. Keksipakopumpun kavitointi (mukailten Motiva 2009.)

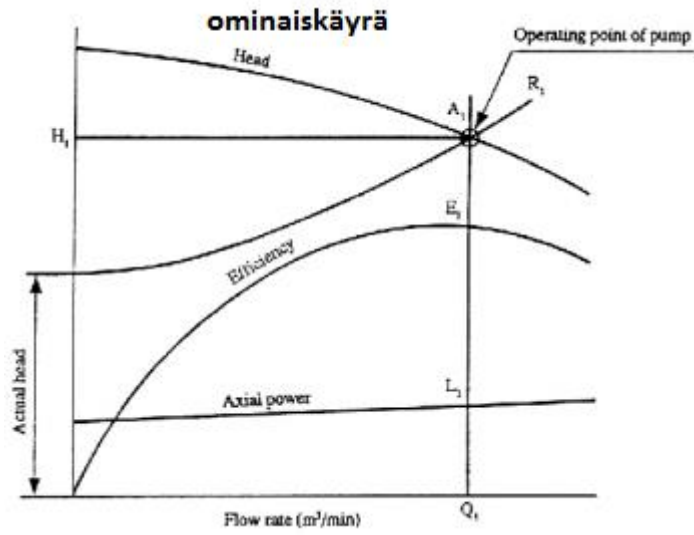
#### 4.4 Pumpun ominaiskäyrä

Pumpun ominaiskäyrästä selviää pumppaukseen liittyvien tärkeimpien suureiden riippuvuus toisistaan.

Nämä suureet ovat

- tilavuusvirta  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- nostokorkeus  $H$  (m)
- tehon tarve  $P$  (W)
- hyötysuhde  $\eta$

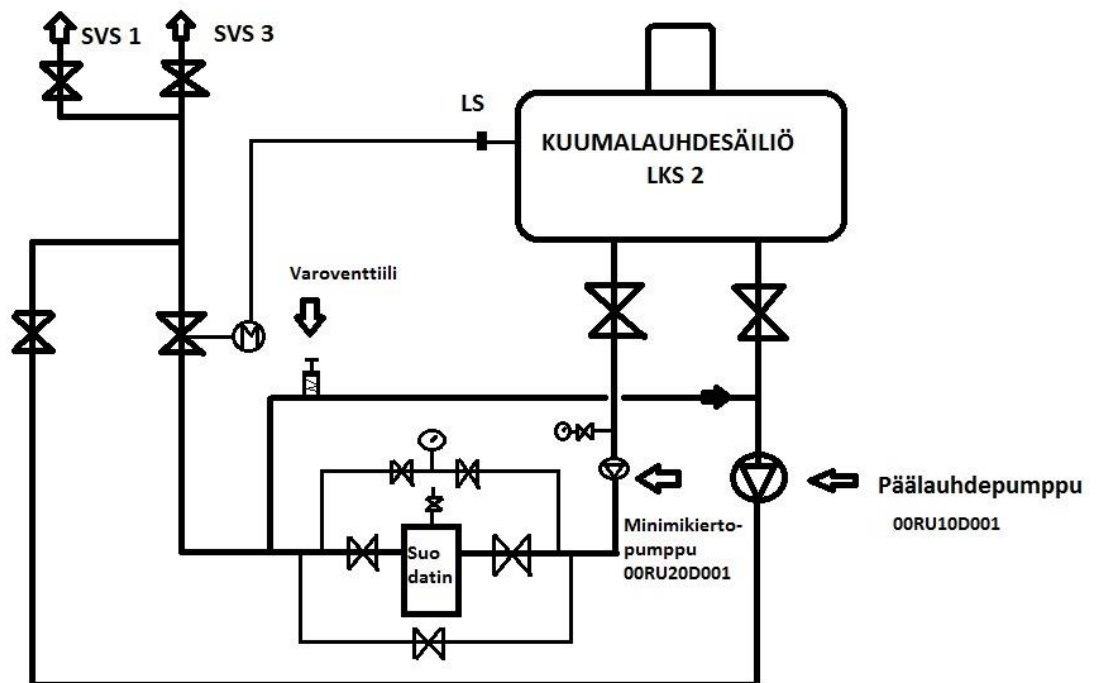
Tilavuusvirta  $Q$  on se nestemäärä, jonka pumppu kykenee siirtämään tietyssä ajassa. Tämän riippuvuudesta nostokorkeuteen  $H$  voidaan piirtää ominaiskäyrä, josta selviää esimerkiksi pumpun tuoton laskeminen nostokorkeuden kasvaessa. Nostokorkeutta voidaan kuvata myös pumpun aiheuttamana paineenlisäyksenä (Rouvinen 2009.) Kuviossa 6 on esitetty keskipakopumpun ominaiskäyrä, josta selviää pumpun toimintapiste.



KUVIO 9. Pumpun periaatteellinen ominaiskäyrä (mukaillen Motiva 2009.)

## 5 LKS 2 LAUHDEJÄRJESTELMÄ

Höyryvoimalaitoksissa syntyy runsaasti lauhdevirtoja, jotka pitää varastoida erilaisiin säiliöihin. Useimmissa tapauksissa lauhde pumpataan suoraan syöttövesisäiliöön, mutta jotkin pienemmät lauhdevirrat voidaan pumpata ensin lauhdesäiliöön. Lauhdesäiliöt ovat syöttövesisäiliöiden ohella energiaa varastovia lämpöakkuja, jotka ovat hyvin eristettyjä. Lauhdevesisäiliöön virtaa lauhdeita yleensä monista paikoista. Esimerkiksi höyrylinjojen vesityksiä on runsaasti. Vesitykset johdetaan yleensä joko suoraan lauhdesäiliöön tai sen kokoojatukkiin (Motiva 2011, 28.) Suuria lauhdeentuottajia ovat myös erilaiset lämmönvaihtimet, joilla tuotetaan esimerkiksi kaukolämpöä. Kaukolämmönvaihtimessa höyry luovuttaa energiansa kaukolämpöveden, ja syntynyt lauhde virtaa lauhteen keräilyssäiliöön.

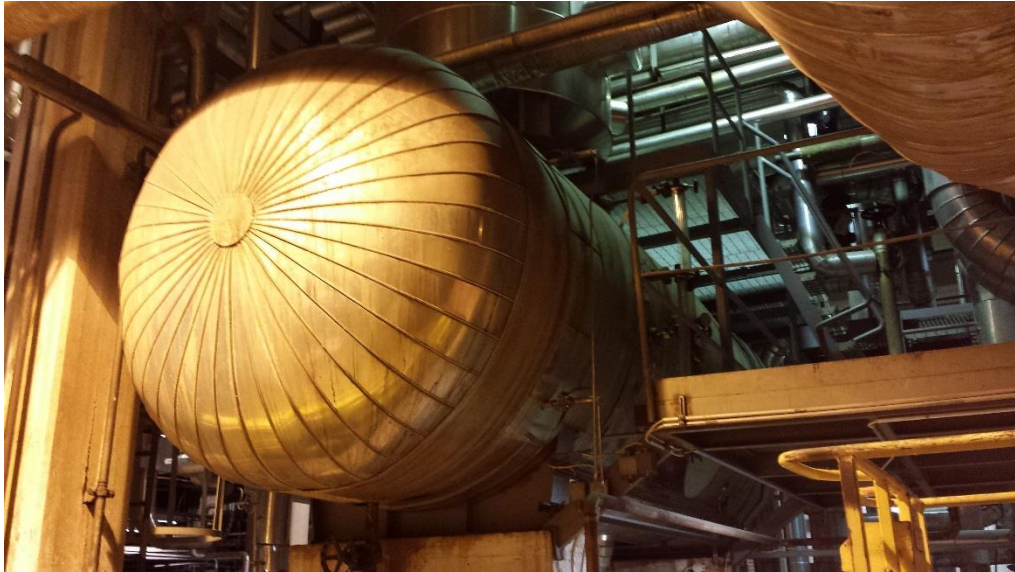


KUVIO 10. LKS 2:en kaaviokuva (Isomaa 2016)

### 5.1 Lauhdekeräilyssäiliö 2

Kokkolan Energian voimalaitos on rakennettu jo 1960-luvun loppupuolella, joten suurin osa voimalaitoksen säiliöistä on niiltä ajoilta. Opinnäytetyön kohteena oleva lauhdekeräilyssäiliö 2 (LKS 2) on tilattu osakeyhtiö A. Ahlströmiltä Varkaudesta vuonna 1968. Säiliö on tarkoitettu kuumien lauhteiden keräilyyn eri paikoista, jotka ovat ajan mittaan vaihtuneet, kun voimalaitosta on modernisoitu. Säiliö on pe-

rintainen tilavuudeltaan 20 m<sup>3</sup> paineastia, joka on rakennettu vaaka-asentoon. Säiliön päällä on kokoojatukit, joihin yhtyvät eri paikoista tulevat lauhheet ja vesitykset. Kokoojatukeista lauhheet ohjataan suoraan lauhdesäiliöön.



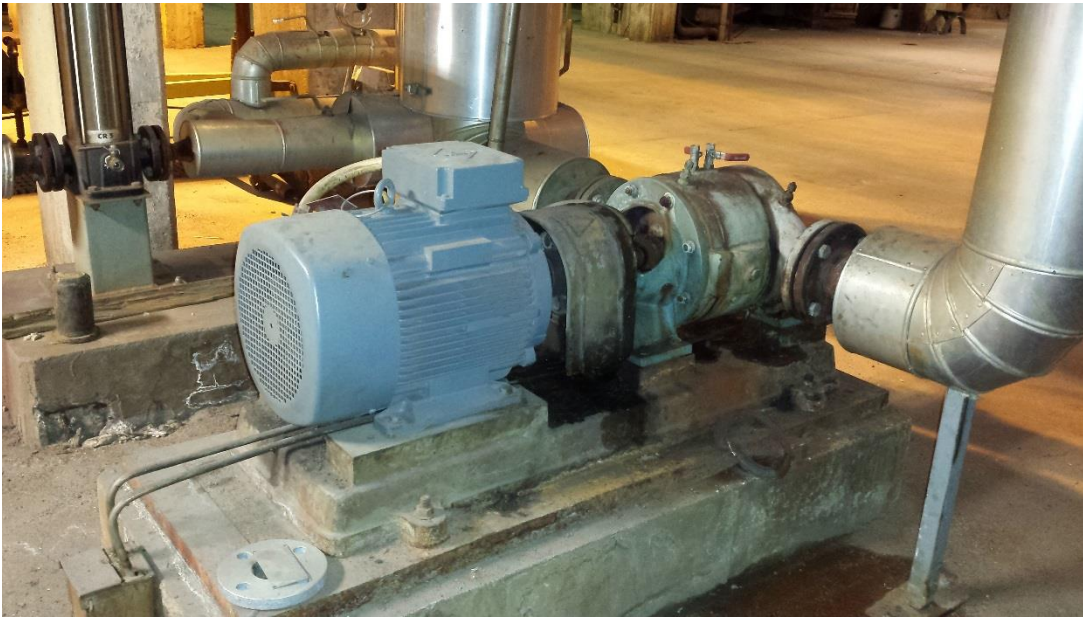
KUVIO 11. Lauhdekeräilyssäiliö 2 (Isomaa 2016)

## 5.2 LKS 2:n lauhdepumput

### 5.2.1 Päälahdepumppu

LKS 2:n lauhdepumput sijaitsevat itse säiliön alapuolella. Päälahdepumppu on jo vanha keskipakopumppu, eikä sen moottori ole taajuusmuuttajaohjattu. Pumppuun ei löytynyt minkäänlaisia dokumentteja, mutta moottorin tiedot pystyi lukemaan moottorin kyljessä olevasta tyyppikilvestä. Pumppua ei ole suunniteltu kyseiseen käyttöön, vaan se on siirretty käytettynä toisesta paikasta. Näin ollen pumppu on tarkoitukseensa liian suuritehoinen, ja se ei pysty toimimaan optimaalisella työalueellaan, joten hyötysuhde huononee merkittävästi. Tällä hetkellä pumppu pumppaa lauhdetta syöttövesisäiliöön panospumppaus menetelmällä. Tämä tarkoittaa sitä, että LKS 2:n vesipinnan annetaan nousta 1 m, jolloin ylärajatieto kulkee järjestelmään, mikä antaa pumpulle käynnistyskäskyn. Säiliö pumpataan tyhjäksi, jolloin alarajatieto antaa pumpulle pysäyttämiskäskyn. Pumppu on siis ajallisesti aika vähän käytössä, riippuen ajotilanteesta.

Panospumppaus ei ole kuitenkaan järkevin vaihtoehto, jos halutaan mahdollisimman vakaa tuotantoprosessi. Kun pumpataan suuri määrä vettä pienessä ajassa syöttövesisäiliöön, niin se heilauttaa höyrytasapainoa ja sitä myöten koko tuotantoprosessia. Heiluntaa pahentaa vielä se, että LKS 2:n lauhteen lämpötila on matalampi kuin syöttövesisäiliössä olevan veden lämpötila. Kylmempi vesi aiheuttaa sen, että syöttövesisäiliön paine laskee, ja paineenlaskua joudutaan kompensoimaan höyryllä.



KUVIO 12. LKS 2 päälauhdepumppu (Isomaa 2016)

### 5.2.2 Minimikiertopumppu

Isomman pumpun vieressä on pienempi pystypumppu, joka on tarkoitettu pitämään minimikiertoa säiliön ja lauhdesuodattimen välillä, sekä pumppaamaan lauhdetta syöttövesisäiliöön. Pumppu on Grundforsin valmistama ja on nimellisteholtaan 3 kW korkeapainepumppu. Pumppu imee LKS 2 säiliöstä ja pumppaa sivuvirtasuodattimen läpi takaisin lauhdesäiliöön. Minimikierto suodattimen ja säiliön välillä on tärkeää, sillä lauhdevesiä tulee monesta paikasta ja vedessä esiintyy epäpuhtauksia, jotka suodatin suotaa vedestä pois.



KUVIO 13. Minimikiertopumppu (Isomaa 2016)

### 5.3 Lauhdesuodatin

Lauhteiden puhdistus on tärkeää etenkin kaukolämpöä tuottavissa voimalaitoksissa. Putkistoista, venttiileistä ja lämmönvaihtimista irtoaa runsaasti korroosiotuotteita, jotka on tärkeä saada pois lauhdesta. Myös vuodot lämmönvaihtimissa ja lauhduttimissa lisäävät lauhdeveden epäpuhtautta.

LKS 2:en lauhdesuodatin on sivuvirtasuodatin, joka suodattaa kiinteitä partikkeleita viiden patruunan avulla. Patruunoita on kahdentyyppisiä, joista ensimmäinen on puuvillasta valmistettu. Puuvilla pystyy erottamaan 1  $\mu\text{m}$  kokoiset partikkelit 80-85% varmuudella käyttölämpötilan ollessa 100°C. Toinen patruunamateriaali on fenolihartsikuitu, joka pystyy erottamaan 5  $\mu\text{m}$  kokoiset partikkelit 70-85% varmuudella käyttölämpötilan ollessa 120°C. Suodatin aiheuttaa puhtailla suodattimilla 0,2 bar painehäviön, mutta likaisilla suodattimilla painehäviö voi nousta maksimissaan 1,7 bar. Tällöin suodatustulos on jo huomattavasti heikompi verrattuna uusiin patruunoihin. Voimalaitoksen käyttöohjeissa on kehoitettu vaihtamaan patruunat uusiin, kun painehäviö on 1,5 bar. (Kokkolan Energian lauhdesuodatuksen ohjeistus 1995)



Suodattimen toimintakapasiteetti on aina rajallinen. Tämä opinnäytetyöni kohteen suodatin pystyy suodattamaan 1,38 kg/s lauhdetta, jonka ylittyttyä suodatustulos alkaa heiketä. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että niissä ajotilanteissa, joissa lauhdetta syntyy enemmän, ei suodatin pysty suodattamaan koko lauhdevirtaa.



KUVIO 14. Lauhdesuodatin (Isomaa 2016)

## 6 UUDEN PUMPUN MITOITUS MAKSIMIVIRTAUKSELLE

Pumppua valittaessa on lähtökohtaisesti tärkeintä tiedostaa pumpattava vesimäärä ja nostokorkeus eli paine-ero, jonka pumppu joutuu tuottamaan virtauksen aikaansaamiseksi (Huhtinen ym 2013.) Energia- tehokkuuden kannalta olisi tärkeää valita sopivan kokoinen pumppu, jonka ominaiskäyrä vastaa tarvittavaa tilavuusvirtaa ja nostokorkeutta. Pumpun valinnan jälkeen voidaan valita vielä sopiva juoksupyörä, jolla päästään haluttuun toimintapisteeseen.

### 6.1 Pumpun toiminta-alue maksimivirtauksella

Kuten aikaisemmin on tullut ilmi, LKS 2:n nykyinen lauhdepumppu on liian suuritehoinen. Lisäksi pumppu on niin vanha, että siihen liittyviä spesifikaatioita ei löytynyt. Pumpun moottorin tyyppikilvestä selvisi moottorin tiedot, jotka eivät kuitenkaan ole kovin oleellisia. Uusi pumppu tulee kuitenkin olemaan nykyistä pienempi ja käyttötarkoitukseensa sopivampi. Pumpun mitoituslaskelmat suoritetaan ensin maksimivirtauksella, joka on 10 kg/s, ja sen jälkeen keskimääräisellä virtauksella 5 kg/s. Tämä siksi, että saadaan selville kannattaako pumppua mitoittaa maksimivirtauksen mukaan, vai onko taloudellisempaa valita pumppu keskimääräisen ja maksimivirtauksen välistä.

#### 6.1.1 Staattisen nostokorkeuden määrittäminen maksimivirtauksella

Staattisen nostokorkeuden laskemiseksi täytyy tietää fyysinen nostokorkeus, jonka pystyi tarkistamaan voimalaitoksen pohjapiirustuksista. Piirustuksista selvisi, että syöttövesisäiliö 3:n korkeus merenpinnasta on 26,7 m, josta vähennetään lauhdepumpun korkeus 2,7 m merenpinnasta. Fyysiseksi nostokorkeudeksi tulee näin ollen 24 m.

Staattinen nostokorkeus:

$$H_{st} = H_{geod} + \frac{P_d - P_s}{\rho g} \quad (1)$$

missä  $H_{geod}$  on geodeettinen nostokorkeus,  $P_d$  pumpun painepuolen paine,  $P_s$  pumpun imupuolen paine,  $\rho$  nesteen tiheys ja  $g$  maan vetovoiman kiihtyvyys.

$$H_{st} = 23m + \frac{4,3 \cdot 10^5 Pa - 1,5 \cdot 10^5 Pa}{\frac{968 kg}{m^3} \cdot 9,81 m/s^2} = 52,5m \quad (1)$$

### 6.1.2 Dynaamisen nostokorkeuden määrittäminen maksimivirtauksella

Ennen todellisen nostokorkeuden määrittämistä täytyy vielä ratkaista dynaaminen nostokorkeus, sillä todellinen nostokorkeus muodostuu staattisen ja dynaamisen nostokorkeuden summasta. Dynaaminen nostokorkeus muodostuu putkistohäviöiden summasta, jotka ratkaistaan kaavalla (3).

Putkivastukset:

$$\Delta p_{kitka} = \lambda \frac{L}{D} * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (2)$$

missä  $\lambda$  on putkiston kitkavastuskerroin,  $L$  putkiston pituus,  $D$  putken halkaisija,  $v$  nesteen virtausnopeus ja  $\rho$  nesteen tiheys.

Putkivastuksen laskentaan tarvittava kitkavastuskerroin  $\lambda$  johdetaan Reynoldsin luvusta, joka puolestaan kertoo sen, onko virtaus laminaarista vai turbulენტista. Reynoldsin luku lasketaan kaavalla (4). Kitkavastuskertoimen määrittämiseen tarvitaan myös putkiston karheudelle suhdeluku. Voimalaitoksen teräsputkien karheus on 0,1 mm. Karheuden ja halkaisijan suhde on näin ollen 0,001 putken halkaisijan ollessa 100 mm.

Reynoldsin luku:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\eta} \quad (3)$$

missä  $\rho$  on nesteen tiheys,  $v$  nesteen keskimääräinen nopeus,  $d$  putken halkaisija ja  $\eta$  nesteen dynaaminen viskositeetti.

Nesteen nopeus:

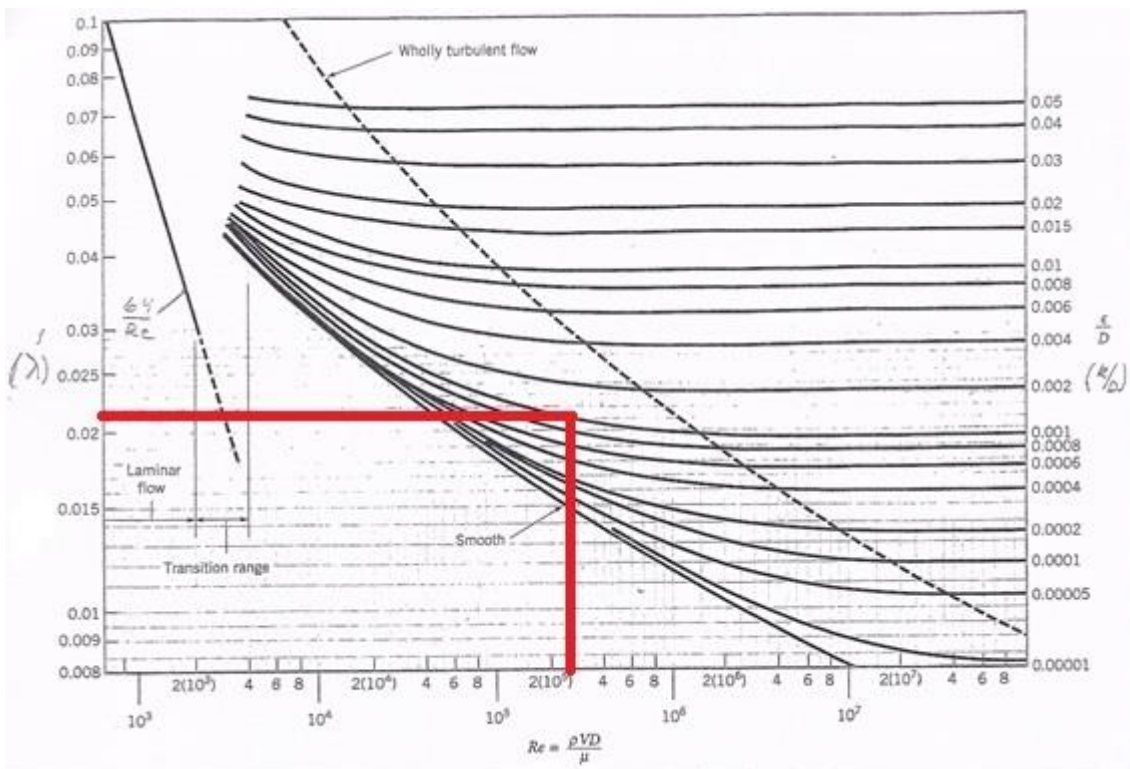
$$v = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \quad (4)$$

missä  $Q$  on tilavuusvirta ja  $D$  putken halkaisija. miksi välillä iso  $D$  ja välillä pieni  $d$

$$v = \frac{4 \cdot 0,01 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 0,1^2 \text{ m}^2} = 1,27324 \text{ m/s} \quad (4)$$

$$Re = \frac{968 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,27324 \text{ m/s} \cdot 0,1 \text{ m}}{1,0020 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 123004 \quad (3)$$

putkivastuskerroin  $\lambda$  saadaan lukemalla Moodyn käyrästä. Putkivastuskerroin on käyrästä luettuna noin 0,022.



KUVIO 15. Moodyn käyrästä 1 (mukaillen Rauli Koistinen.)

Painehäviöt 55 m:lle suoraa teräsputkea:

$$\Delta p_{\text{kitka}} = 0,022 \cdot \frac{55 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 968 \text{ kg/m}^3 \cdot \left( \frac{1,27324 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2 = 9445,79 \text{ Pa} \quad (2)$$

Putkiston kertavastukset ovat esimerkiksi käyriä, venttiileitä ja haaroja, joista muodostuu virtausvastusta. Kertavastukset lasketaan kaavalla (9).

Kertavastukset:

$$\Delta p_{kerta} = \Sigma \zeta * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (5)$$

missä  $\zeta$  on kertavastus

Kertavastusten summa:

$$\Sigma \zeta = 11 * 0,5 + 3 * 3 = 14,5 \quad (6)$$

$$\Sigma \Delta p_{kerta} = 14,5 * \frac{1}{2} * \frac{968kg}{m^3} * (1,27324m/s)^2 = 11377,2Pa \quad (5)$$

Kokonaispainehäviö muodostuu putken painehäviön ja kertavastuksista aiheutuvien painehäviöiden summasta, joka lasketaan kaavalla (12).

Kokonaispainehäviö:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{kitka} + \Delta p_{kerta} \quad (7)$$

$$\Delta p_{tot} = 9445,79Pa + 11377,2Pa = 20823Pa \quad (7)$$

Kun tiedetään putkiston ja kertavastusten aiheuttamat painehäviöt, voidaan laskea dynaaminen nostokorkeus. Putkiston pituus on havainnoitu silmämääräisesti, koska voimalaitoksen tietokannasta ei löytynyt opinnäytetyöni kohteen putkilinjan tarkkaa pituutta. Painehäviöt ovat kuitenkin niin pieniä, etteivät pienet arviointivirheet muuta tulosta merkittävästi.

Dynaaminen nostokorkeus kaavalla (14):

$$H_{dyn} = \frac{\Delta p_{tot}}{\rho * g} \quad (8)$$

$$H_{dyn} = \frac{20823N/m^2}{\frac{968kg}{m^3} * 9,81m/s^2} = 2,19m \quad (8)$$

### 6.1.3 Todellinen nostokorkeus

Todellinen nostokorkeus muodostuu staattisen ja dynaamisen nostokorkeuden summasta, joka lasketaan kaavalla 16.

$$H = H_{st} + H_{dyn} \quad (9)$$

$$H = 52,4859m + 2,19m = 54,67m \quad (9)$$

### 6.1.4 NPSH

NPSH (net positive suction head) kertoo sen, että kuinka suuri paineen täytyy olla pumpun imupuolella höyrystymispaineen lisäksi. Tämä on oleellinen tieto, koska sillä voidaan estää kavitaation syntymistä. NPSH:n yksikkö on metri, m, joten se kertoo suoraan pumpun sallitun imukorkeuden (Huhtinen ym. 2013.)

Pumpun sallittu imukorkeus:

$$NPSH_a = \frac{p_1 - p_h + \Delta p_{imu}}{g * \rho} + H_{pump} - H_1 \quad (10)$$

missä  $p_1$  on imusäiliön paine,  $p_h$  nesteen höyrynpaine,  $\Delta p_{imu}$  imuputken painehäviö ja  $H_{pump}$  pumpun korkeus merenpinnasta

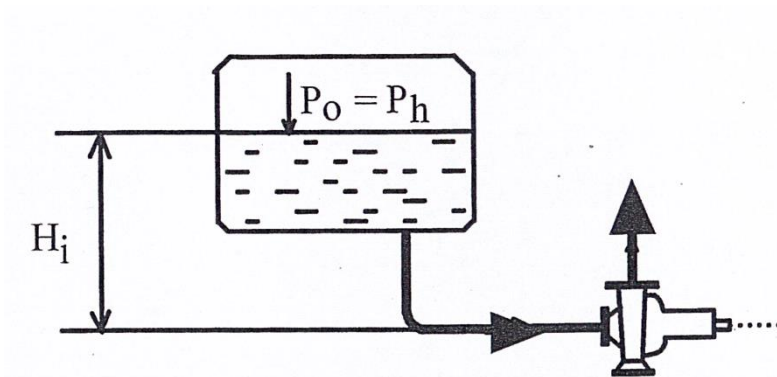
Ennen NPSH:n laskemista täytyy selvittää pumpun imujohton painehäviö. Imujohto on 2,2 m pitkä ja siinä on 3 kpl 90° mutkia, istukkaventtiili sekä 2 t-haaraa. Virtausvastuksesta aiheutuva painehäviö jää kuitenkin erittäin pieneksi.

Pumpun imujohton painehäviö:

$$\Delta p_{imu} = 7.1 * \frac{1}{2} * \frac{968kg}{m^3} * 1,27324m/s = 4375,4Pa \quad (11)$$

$$NPSH_a = \frac{35 \cdot 10^3 \text{ Pa} - 35 \cdot 10^3 \text{ Pa} + 4375,4}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 968 \text{ kg/m}^3} + 2,7 \text{ m} - 1 \text{ m} = 2,16 \text{ m} \quad (10)$$

Joten pumppu on sijoitettava kuvion 12 mukaisesti vähintään 2,16m nestepinnan alapuolelle, jotta kavitatiolta vältytään.



KUVIO 16. Pumpun sijoitus (mukaiillen Huhtinen ym. 2013.)

## 6.2 Pumpun tehon tarve maksimivirtauksella

Pumpun tarvitsema teho saadaan helposti kaavalla (21).

Pumpun tehon tarve:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (12)$$

missä  $\eta$  on pumpun ja moottorin yhteinen hyötysuhde

$$P = \frac{968 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,01 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 54,67 \text{ m}}{0,65} = 7986,93 \text{ W} \approx 8,0 \text{ kW} \quad (12)$$

Pumpun ja moottorin hyötysuhde perustuu oletukseen. Nykyaikaisissa pumpuissa ja moottoreissa voi kuitenkin olla korkeammat hyötysuhteet, jolloin tehon tarve voi olla aavistuksen pienempi.

## 7 PUMPUN MITOITUS KESKIMÄÄRÄISELLE VIRTAUKSELLE

Keskustelimme opinnäytetyön tarjoajan kanssa, että olisi hyvä mitoittaa pumppu käyttäen hyväksi myös keskimääräistä virtausta. Lauhteen keskimääräinen virtaus on katsottu voimalaitoksen TOPI järjestelmästä, joka kerää dataa esimerkiksi voimalaitoksen virtausmääristä.

### 7.1 Dynaaminen ja todellinen nostokorkeus keskimääräisellä virtauksella

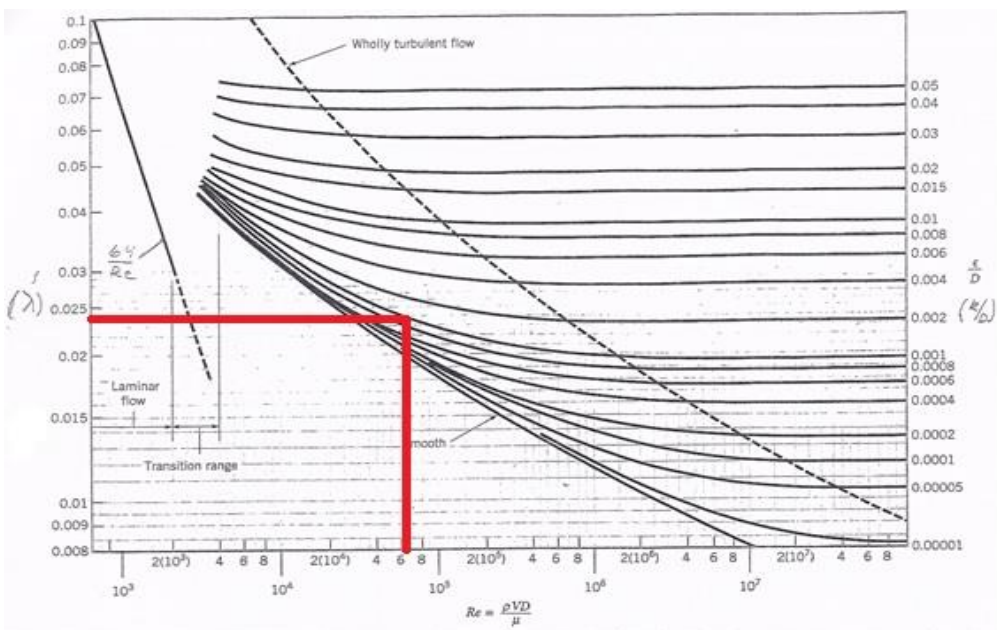
Lasketaan ensin lauhteelle uusi virtausnopeus  $v_2$

$$v_2 = \frac{4 \cdot 0,005 \text{ m}^3/\text{s}}{3,14159 \cdot 0,1^2} = 0,63662 \text{ m/s} \quad (4)$$

Lasketaan nyt uusi Reynoldsin luku

$$Re = \frac{\frac{968 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{0,63662 \text{ m}}{\text{s}} \cdot 0,1 \text{ m}}{1,0020 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 61501,8 \quad (3)$$

Tarkastetaan putkivastuskertoimen  $\lambda$  suuruus uudestaan Moodyn käyrästä uudella Reynoldsin luvulla, joka asettuu käyrästä luettuna noin 0,024 kohdalle.



KUVIO 17. Moodyn käyrästä (mukaillen Rauli Koistinen.)



Lasketaan seuraavaksi putkiston ja kertavastusten aiheuttamat painehäviöt keskimääräisellä lauhdevirralla. Painehäviö suorassa teräsputkessa, jonka pituus on 55 m lasketaan seuraavasti:

$$\Delta p_{kitka} = 0,024 * \frac{55m}{0,1m} * \frac{1}{2} * 968kg/m^3 * \left(\frac{0,63662m}{s}\right)^2 = 2589,28Pa \quad (2)$$

Kertavastusten  $\zeta$  summa on virtausmääristä riippumaton, joten sitä ei tarvitse laskea uudestaan. Lasketaan seuraavaksi kertavastusten aiheuttama painehäviö keskimääräisellä lauhdevirralla.

$$\Sigma \Delta p_{kerta} = 14,5 * \frac{1}{2} * \frac{968kg}{m^3} * (0,63662m/s)^2 = 2844,29Pa \quad (5)$$

Kokonaispainehäviö:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{kitka} + \Delta p_{kerta} \quad (7)$$

$$\Delta p_{tot} = 2589,28Pa + 2844,29Pa = 5433,57Pa \quad (7)$$

Nyt voidaan laskea dynaaminen nostokorkeus:

$$H_{dyn} = \frac{5433,57N/m^2}{\frac{968kg}{m^3} * 9,81m/s^2} = 0,572m \quad (8)$$

Lopuksi voidaan laskea pumpun todellinen nostokorkeus keskimääräisellä lauhdevirralla

$$H = 52,4859m + 0,572m = 53,0579m \quad (9)$$

## 7.2 NPSH keskimääräisellä lauhdevirralla

Myös  $NPSH_a$ :n arvo muuttuu, koska lauhteen virtausnopeus on puolet pienempi. Lasketaan ensiksi pumpun imujohtoon painehäviö.

$$\Delta p_{imu} = 7.1 * \frac{1}{2} * \frac{968 \text{ kg}}{\text{m}^3} * 0,63662 / \text{s} = 2187,68 \text{ Pa} \quad (11)$$

Kun imujohtoon aiheuttamalle painehäviölle on laskettu uusi arvo, voidaan laskea  $NPSH_a$

$$NPSH_a = \frac{35 * 10^3 \text{ Pa} - 35 * 10^3 \text{ Pa} + 2187,68 \text{ Pa}}{9,81 \text{ m/s}^2 * 968 \text{ kg/m}^3} + 2,7 \text{ m} - 1 \text{ m} = 1,93 \text{ m} \quad (10)$$

Tästä huomataan, että laudevirtauksen puolittuminen ei vaikuta kovinkaan paljon  $NPSH_a$ :n suuruuteen. Eli jos pumpulla pumpattaisiin jatkuvasti noin 5kg/s virtauksella, tulisi pumpun olla vähintään 1,93m säiliössä olevan nestepinnan alapuolella. Kuitenkin tässä tilanteessa pumppu kannattaa sijoittaa lauhteen maksimivirtauksen perusteella 2,16m nestepinnan alapuolelle, jotta vältetään kavitaatiolta.

## 7.3 Pumpun tehon määrittäminen keskimääräiselle lauhdevirralla

Kuten työssä aiemmin todettiin, määritetään pumpun teho seuraavalla kaavalla:

$$P = \frac{968 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 0,005 \text{ m}^3 / \text{s} * 53,0579 \text{ m}}{0,65} = 3875,71 \text{ W} \approx 4 \text{ kW} \quad (12)$$

Tästä huomataan, että lauhteen virtausmäärän puolittuessa myös pumppauksen tehon tarve puolittuu, mikä on merkittävää huomata pumppua hankittaessa. Tässä opinnäytetyöni kohteessa lauhteen virtausmäärät vaihtelevat ajomalleista riippuen, kuten on työssä aiemminkin jo mainittu. On kuitenkin selvästi nähtävissä, että uuden pumpun tulee olla teholtaan vähintään 4 kW, mutta korkeintaan 8 kW tehoinen. Pumpun optimaalista käyttöastetta ajatellen, kannattaisi valita tämän vaaditun tehoalueen keskiarvo, joka tarkoittaisi 6 kW pumppua.

## **8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA**

### **8.1 Työni lähtökohdat**

Opinnäytetyöni lähtötilanne oli minulle selkeä, koska olin ollut Kokkolan Energialla töissä useampana kesänä. Työn kohteena oleva pumppu oli vanha ja useampaan otteeseen korjattu ja kunnoltaan heikko. Lähdin työn aluksi selvittämään LKS 2:een johtavia lauhdevirtoja. Voimalaitos on jokseenkin vanha, ja sitä on modernisoitu vuosien varrella, joten tuotantoprosessi on myös muuttunut useaan otteeseen. LKS 2:een menevien lauhteiden tarkkaa määrää kussakin ajotilanteessa on mahdoton tietää tarkasti, koska virtausmittausta ei ole. Oli arvioitava pumpun jälkeisen virtauksen perusteella virtauksen määrä, minkä sai tulkittua TOPI diagnostiikkajärjestelmän avulla. Käyristä sai selville virtauksen maksimi -ja minimikohdat.

Suuri kiitos kuuluu Kokkolan Energian henkilökunnalle, joka auttoi suuresti eri työn vaiheissa. Voimalaitoksessa on paljon arkistoja, jossa säilytetään esimerkiksi vanhoja pohjapiirustuksia. Näitä piirustuksia ei ole sähköisessä muodossa, joten aikaa kului aluksi oikeiden dokumenttien löytämiseen. Dokumentit ja piirustukset löytyivät kuitenkin ja pystyin aloittamaan laskentatyöt.

### **8.2 Kirjoitusprosessin vaiheet**

Kirjoitusprosessi oli sinänsä minulle hankalaa, koska aikataulutusta tuotti ongelmia. Kun aloin kirjoittamaan ja syvennyin aiheen pariin pidemmäksi aikaa, niin sain myös paljon aikaan. Alkuun pääseminen ei ollut hankalaa, sillä kirjoitin alussa lähinnä opinnäytetyöhön liittyvää teoriaosuutta. Teoriaosuuteen tarvitsin luonnollisesti paljon lähdekirjallisuutta ja muita lähteitä, joita käytinkin niin paljon kuin niitä oli saatavilla. Myös muut opinnäytetyöt samankaltaisista aiheista olivat kullan arvoisia, koska niistä pystyi lukemaan myös toisten näkemyksiä samoista aiheista. Voimalaitos -ja kattilatekniikka olivat minulle melko tuttuja, koska olin saanut työskennellä voimalaitoksella.

### 8.2.1 LKS 2:een perehtyminen

Jo teoriaosuutta kirjoittaessani aloin jo miettiä itse työni kohdetta LKS 2:sta. Aluksi työ oli lähinnä selvitysluontoista työtä Kokkolan Energian henkilökunnan opastuksella. Sain tärkeitä ohjeita automaatiomestari Ahti Rantalalta, joka oli juuri jäämässä eläkkeelle. Kohtuullisen iäkkäässä voimalaitoksessa on henkilökuntakin ehtinyt vaihtua useasti. Rantala oli kerennyt työskennellä voimalaitoksella jo parin vuosikymmenen ajan ja hän tiesi LKS 2:sta paljon. Hän antoi ohjeita, miten prosessia kannattaisi lähteä yksinkertaistamaan ja parantamaan LKS 2:en osalta.

### 8.2.2 Pumpun mitoitus

Uuden lauhdepumpun mitoitus oli työni haastavin osuus. Olin opiskelujeni aikana suorittanut muutamman voimalaitostekniikkaan liittyvän opintojakson, joissa oli harjoiteltu voimalaitosten prosesseihin liittyvää laskentaa. En ollut kuitenkaan vielä koskaan mitoittanut pumppua, joten asia oli siinä mielessä minulle uutta. Taas kerran sain apua vanhoista opinnäytetöistä, joten pääsin alkuun. Laskentaa oli kohtuullisen paljon, ja sain kokea työn aikana, että huolellisuus on tärkeää. Yksi huolimattomuusvirhe laskennan alkuvaiheessa kertautui isona virheenä laskennan lopputulokseen asti.

Kesällä 2016 pidimme Kokkolan Energialla neuvottelun, jossa kävimme läpi työtäni. Silloin mietimme, että olisi järkevää laskea pumppu tuotannollisista syistä sekä maksimivirtauksen, että keskimääräisen virtauksen perusteella. Näin pystyisimme varmistamaan, ettei valita liian suurta pumppua. Mietin heti aluksi, että pumpun olisi järkevää olla taajuusmuuttajaohjattu, jotta energiaa säästyisi ja prosessia pystyttäisiin ajamaan tasaisemmin.

Laskennan aikana huomasin, että tuleva pumppu tulee olemaan melko pienikokoinen. Lauhteen virtausmäärät eivät olleet kovin suuria, ja kesäajossa jopa todella pieniä. Tästä syystä olin monta kertaa kriittinen omiin laskelmiin ja mietin voivatko ne pitää paikkaansa. Jonkinlainen itsekriittisyys lienee kuitenkin ihan hyvä asia. Laskennan aikana myös erilaisten käyrästöjen tulkinta tuotti minulle haasteita, mutta selvisin niistäkin lopulta hyvin.

### 8.2.3 Työn tuloksen pohdinta

Kirjoitusprosessin viimeisenä vaiheena on yleensä tulkita omaa työskentelyä ja aikaansaannoksia. Olen kohtuullisen tyytyväinen siihen, että sain tehtyä itselle haastavan työn loppuun. Aikataulu olisi voinut olla huomattavasti tiiviimpi, missä minulla on ollut usein parantamisen varaa. Olen kuitenkin tyytyväinen, että olen selviytynyt isoistakin haasteista oppinäytetyöprosessin aikana.

### 8.3 Loppusanat

Elämän eri vaiheissa tulee usein sellaisia tilanteita, joita on haasteellista toteuttaa, mutta ne ovat kuitenkin saavutettavissa. Minulle tämä kirjoitusprosessi oli yksi sellainen. On hienoa huomata, että suurella yrittämisellä ja paneutumisella johonkin asiaan voi saada aikaan paljon tuloksia. Motivaatio on asia, jota olisi hyvä olla aina työtä tehdessä. Ilman motivaatiota ei voi olla kovinkaan kiinnostunut työstään, ja tulokset voivat olla laihoja. Minua ovat työn aikana motivoineet insinööriksi valmistuminen sekä perheen tuki.

Haluan lopuksi kiittää työn toimeksiantajaa Kokkolan Energiaa mielenkiintoisen, mutta sopivasti haasteellisen työn tarjoamisesta. Kiitokset kuuluvat erityisesti myös vaimolleni ja ystäville suuresta tuesta työn aikana.

## LÄHTEET

- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpilainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 2., tarkistettu painos. Helsinki:Opetushallitus.
- Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. 1., painos. Helsinki:WSOY
- Kokkolan Energian ohjeistus LKS 2:en lauhdesuodatukseen
- Kokkolan Energian yritysesittely 2014
- Hoisko, N. 2013. Höyryturbiinirevision tarkastukset ja mittaukset. Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäyte. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/63882/Hoyryturbiinirevision%20tarkastukset%20ja%20mittaukset.pdf?sequence=1>. Viitattu 7.3.2016
- Lintunen, T. 2006. Hybridilämmityksen vaikutus sähkön- ja lämmöntuotantoon. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energia- ja ympäristötekniikan yksikkö. Diplomityö. Saatavissa: <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/30375/TMP.objres.440.pdf?sequence=1>. Viitattu 20.2.2016
- Höyry-Lauhde-Siirtojärjestelmä energia analyysi. 2011. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/8897/HOLA\\_kaytto-kunnossapito\\_ohjeistus\\_2011.pdf](http://www.motiva.fi/files/8897/HOLA_kaytto-kunnossapito_ohjeistus_2011.pdf). Viitattu 8.3.2016
- Västi, J. 2014. Lauhdepumpun uusinta. Savonia-ammattikorkeakoulu. Opinnäyte. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/79140/Vasti\\_Juho.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/79140/Vasti_Juho.pdf?sequence=1). Viitattu 19.2.2016
- Bergius, Blomsten, Hedenfalk, Johnsson, Kempe, Nilsson, Pegert, Ullgren & Wennström. 1978. Pumpputekniikka. Helsinki: Insinööritieto Oy.
- Rouvinen, S. 2009. Pumppujen energiatehokkuuden mittaus ja optimointi. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Opinnäyte. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4170/Rouvinen\\_Satu.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4170/Rouvinen_Satu.pdf?sequence=1). Viitattu 22.3.2016