



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Tanja Laitinen

TARKASTELU LOVIISAN YDINVOIMALAN LIITTÄMISESTÄ HEL-  
SINGIN KAUKOLÄMPÖVERKKOON

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Henrik Tolvanen

## TIIVISTELMÄ

**Tanja Laitinen:** Tarkastelu Loviisan ydinvoimalan liittämistä Helsingin kaukolämpöverkkoon

Kandidaatintyö, 29 sivua

Heinäkuu 2018

Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: Henrik Tolvanen

**Avainsanat:** kaukolämpö, kaukolämpöverkko, CHP, yhteistuotanto, ydinvoima, Helsinki, Loviisa

Helsingin kaukolämmöstä suuri osa tuotetaan kivihiilellä, mikä tuottaa paljon hiilidioksidipäästöjä. Jotta päästöjä voitaisiin vähentää, kivihiili täytyisi korvata jollakin, joka tuottaa vähemmän tai ei ollenkaan päästöjä. Tästä syystä työssä on tutkittu kaukolämmön tuotantoa Loviisan ydinvoimalla. Loviisan laitoksia ei alun perin ole rakennettu yhteistuotantolaitoksiksi, sillä rakennusaikaan tämä ei olisi ollut kannattavaa. Kaukolämmön tuotantoa oli suunniteltu myös tulevalle Loviisa 3:lle, mutta tämä ei koskaan saanut rakennuslupaa.

Työssä on tutkittu, olisiko nyt järkevää tuottaa Loviisassa kaukolämpöä Helsinkiin ja näin korvata kokonaan kivihiilen käyttö. Työstä on rajattu kustannuslaskelmat kokonaan pois, joten tarkastelu kohdistuu energiantuotannon näkökulmaan. Aluksi on selvitetty kuinka suuri lämpöteho Loviisasta olisi mahdollista saada. Laskemista varten on kerätty tietoa Loviisan höyrypiirin arvoista ja nykyisestä tuotannosta. Koska lämmöntuotanto toteutettaisiin väliotolla matalapaineturbiinista, välioton massavirta ja kaukolämpöveden lämpötilaero määrää lämpötehon suuruuden. Massavirran ja lämpötilaeron määrittämisen jälkeen on laskettu lämmöntuotannosta aiheutuva sähkötehon vähennys. Kaukolämpövesi täytyy vielä saada siirrettyä Helsinkiin ja putkissa tapahtuu lämpöhäviöitä. Viimeiseksi on siis laskettu veden siirtämiseen tarvittava pumppausteho sekä lämpöhäviöt Helsingin ja Loviisan välillä, jolloin on saatu lopulliset lämpötehon ja sähkötehon arvot.

Laskennan tuloksena lämpötehoksi saatiin 1005 MW lämpöhäviöiden jälkeen ja sähkötehoksi tällöin 892 MW pumppaustehon vähentämisen jälkeen. Loviisan nykyinen sähköteho on noin 1010 MW, joten sähkötehon vähennys on paljon pienempi suhteessa saatavaan lämpötehoon. Helsingissä keskimääräinen tehontarve on 810 MW ja hetkellinen tehontarve voi olla yli 2000 MW. Loviisasta saatava lämpöteho on siis suurempi kuin keskimääräinen tehontarve, mutta talvisin tarvittaisiin lämpöä muualtakin. Helsingissä hiiltä käyttävien voimaloiden yhteisteho on 720 MW, jolloin Loviisan lämpöteho pystyttäisiin korvaamaan kokonaan kivihiilen käyttö. Työssä tultiin siihen tulokseen, että energiantuotannon näkökulmasta lämmöntuotanto Loviisassa olisi järkevää, mutta todennäköisesti lämpöä ei tuoteta Loviisassa vielä pitkään aikaan jos koskaan. Kaukolämpöputkien rakentaminen on kallista ja yleiset ennakoasenteet ydinvoimaa kohtaan ovat negatiivisia, joten kaukolämmön tuotanto ydinvoimalla ei ole todennäköistä lähitulevaisuudessa.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	KAUKOLÄMMÖN TUOTANTO JA KAUKOLÄMPÖVERKKO.....	3
2.1	Kaukolämmön tuotanto .....	3
2.2	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto .....	4
2.3	Kaukolämpöverkko .....	7
3.	HÖYRYPIIRIN JA KAUKOLÄMPÖVERKON LASKEMISEN TEORIAA .....	9
3.1	Höyrypiirin laskeminen ja lämpötehon määrittäminen.....	9
3.2	Vedensiirron pumppaustehon laskeminen .....	11
3.3	Lämpöhäviöiden määrittäminen.....	12
4.	LOVIISAN VOIMALAITOS, HELSINGIN KAUKOLÄMPÖ JA LASKENTA- MENETELMÄT .....	15
4.1	Helsingin kaukolämpö.....	15
4.2	Loviisan ydinvoimalaitos .....	16
4.3	Laskentamenetelmät.....	19
5.	TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY .....	21
5.1	Laskennan tulokset.....	21
5.2	Tulosten käsittely .....	23
6.	YHTEENVETO .....	26
	LÄHTEET.....	28

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Combined Heat and Power	
BWR	Boiling Water Reactor	
PWR	Pressurized Water Reactor	
$c_p$	Veden ominaislämpökapasiteetti	(J/kg°C)
$D$	Halkaisija	(m)
$d_s$	Putken sisähalkaisija	(m)
$E$	Meno- ja paluuputkien keskipisteiden etäisyys	(m)
$g$	Putoamiskiihtyvyys	(m/s <sup>2</sup> )
$H$	Pumpun nostokorkeus	(m)
$H$	Kaukolämpöputken sijaintisyvyys	(m)
$h$	Entalpia	(kJ/kg)
$h_{gs}$	Lämmönsiirtokerroin	(W/m <sup>2</sup> °C)
$K$	Lämmönläpäisy-luku	(W/m°C)
$k$	Lämmönjohtavuus	(W/m°C)
$L$	Pituus	(m)
$\dot{m}$	Massavirta	(kg/s)
$P$	Teho	(W)
$p$	Paine	(bar)
$Q$	Lämpövirta	(J/s)
$q_v$	Tilavuusvirta	(m <sup>3</sup> /s)
$R$	Lämpövastus	(m°C/W)
$Re$	Reynoldsin luku	
$T$	Lämpötila	(°C)
$w$	Virtausnopeus	(m/s)
$\Delta$	Delta, muutosta kuvaava symboli	
$\eta$	Hyötysuhde	
$\mu$	Dynaaminen viskositeetti	(kg/ms)
$\nu$	Kinemaattinen viskositeetti	(m <sup>2</sup> /s)
$\xi$	Kitkakerroin	
$\rho$	Tiheys	(kg/m <sup>3</sup> )
$\Phi$	Lämpöteho	(W)
$\Phi'$	Lämpöhäviö metriä kohden	(W/m)

# 1. JOHDANTO

Suomessa rakennuksista 46 % lämmitetään kaukolämmön avulla ja sen käyttö lisääntyy jatkuvasti kaukolämpöverkon laajentuessa [1, 2]. Suomessa kaukolämpö tuotetaan pääasiassa lämpövoimalaitoksissa tai sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa (CHP-laitos) [3, 4]. CHP-laitoksesta (Combined Heat and Power) saadaan vähemmän sähkötehoa, mitä saataisiin vastaavasta lauhdevoimalaitoksesta, mutta kokonaishyötysuhde on huomattavasti suurempi ja näin tuotanto on energiatehokkaampaa [5]. Loviisan ydinvoimalaitos tuottaa sähköenergiaa vuodessa yli 8 terawattituntia, mutta vain 34,5 % reaktorin lämpötehosta saadaan hyödynnettyä ja loppu teho lämmittää merivettä [6, 7]. Ydinvoimalan muuttaminen CHP-laitokseksi vähentäisi saatavaa sähkötehoa, mutta reaktorin lämpötehosta voitaisiin hyödyntää merkittävästi suurempi osa. Lisäksi rakennusten lämmittäminen on järkevää kaukolämmöllä, koska lämpöenergiaa ei tällöin tarvitse muuttaa välissä sähköenergiaksi ja näin vältetään tehohäviöitä. Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on myös tärkeä osa energiantuotantoa ja ydinvoima on tämän suhteen päästötön energiantuotantomuoto. Helsinki käytti kaukolämpöenergiaa 7,1 TWh:a vuonna 2016 josta 59 %:a tuotettiin käyttämällä kivihiiltä [8]. Kivihiilellä lämmitetään siis yli puolet Helsingistä, mikä tuottaa suuren määrän hiilidioksidipäästöjä. Mikäli Loviisan ydinvoimalasta saatava lämpöteho olisi riittävä ja laitoksen muokkaaminen ja yhdistäminen Helsingin kaukolämpöverkkoon järkevästi toteutettavissa, kivihiilen käyttöä voisi vähentää ja näin myös päästöjä. Lisäksi Loviisan voimalaitoksen hyötysuhde nousisi huomattavasti nykyisestä ja lämpötehoa ei tarvitsisi hukata mereen.

Työn tarkoituksena on tutkia, olisiko Loviisan ydinvoimalaitoksen muokkaaminen CHP-laitokseksi ja yhdistäminen kaukolämpöverkkoon järkevää. Kun laitoksia rakennettiin, kaukolämmön tuotannon mahdollisuutta tutkittiin, mutta se todettiin kannattamattomaksi [9]. Nykyään kaukolämpöä voidaan siirtää pitkiäkin matkoja ilman suuria lämpöhäviöitä, minkä takia Loviisa 3, jos olisi saanut rakennusluvan, olisi mahdollisesti yhdistetty Helsingin kaukolämpöverkkoon [10]. Työssä tarkastelu kohdistuu vain energiantuotantoon eli kustannuslaskelmat on rajattu pois tästä. Aluksi täytyy selvittää, kuinka suuri lämpöteho olisi mahdollista tuottaa Loviisan voimalaitoksessa. Tämän yhteydessä täytyy myös selvittää, kuinka paljon sähköteho vähenisi muutoksen myötä. Kaukolämpöveden lämpötila riippuu ulkoilman lämpötilasta, joten lämpötehon täytyy olla säädettävissä [4]. Työssä selvitetään, kuinka tämä voitaisiin toteuttaa, mutta laskenta keskittyy maksimilämpötehon käsittelyyn. Loviisasta on Helsinkiin matkaa noin 80 kilometriä, joten vesi täytyy saada siirrettyä tämä matka riittävällä paineella. Tätä varten tarvitsee määrittää tarvittava

pumppausteho matkalle johon vaikuttavat veden virtausnopeus, sallittu painehäviö pumppausasemien välillä ja putkikoko [4]. Lisäksi matkalla tapahtuvat lämpöhäviöt täytyy määrittää, jotta voidaan selvittää lämpöteho, mikä saadaan Helsinkiin asti.

Ensimmäisissä luvuissa tarkastellaan teoriaa kaukolämmöstä ja CHP-laitoksesta. Tähän kuuluu molempien toiminta ja sen taustalla oleva fysiikka. Luvussa 4 käsitellään tarkasteltavaa kohdetta eli Loviisan voimalaitosta sekä Helsingin kaukolämpöä. Tässä käsitellään myös kaikki tarvittavat tiedot laskemista varten. Seuraava luku sisältää laskemisen tulokset ja näiden tulosten käsittelyn sekä johtopäätökset tulosten perusteella. Lopuksi on vielä yhteenveto koko työstä.

## 2. KAUKOLÄMMÖN TUOTANTO JA KAUKOLÄMPÖVERKKO

Kaukolämmön käyttö rakennusten lämmityksessä ja teollisuuden prosesseissa on vielä uutta verrattuna muihin energiantuotantomuotoihin niin Suomessa kuin muualla maailmalla. Kaukolämmityksessä kuuma vesi tulee lämmönjakokeskuksen lämmönvaihtimelle, jossa kuuma vesi luovuttaa lämpönsä rakennuksissa kiertävälle vedelle tai käyttöveden lämmitykseen. Jäähdyntynyt kaukolämpövesi palaa tämän jälkeen takaisin voimalaitokselle, jossa sitä lämmitetään uudestaan. Putkiverkostossa on siis aina menoputki ja paluuputki. Kaukolämmön tuotanto on haastavaa, sillä samalla tavalla kuin sähköntarve, myös lämmöntarve vaihtelee jatkuvasti ja ulkolämpötila vaikuttaa kaukolämpöveden menolämpötilaan. [4] Tässä työssä keskitytään erityisesti kaukolämpöveden siirtämiseen voimalaitoksilta eli siirtoputkiin sekä kaukolämmön tuotantoon voimalaitoksilla Suomessa.

### 2.1 Kaukolämmön tuotanto

Kaukolämpöä tuotetaan sekä yhteistuotantovoimalaitoksissa että lämpökeskuksissa [4]. Myös hukkalämmön käyttäminen kaukolämmön tuotannossa on yleistynyt, jolloin esimerkiksi savukaasujen tai jäteveden lämpö saadaan talteen ja polttoaineen kulutus lämmityksessä vähenee [1]. Kuitenkin valtaosa kaukolämmöstä tuotetaan Suomessa sekä fossiililla polttoaineilla että uusiutuvalla biomassalla ja kotimaisen polttoaineen käyttö on suosittua [1, 4]. Kaukolämpö tuotetaan myös usein lähellä asutusta, sillä lyhemmillä siirtomatkoilla on myös pienemmät lämpöhäviöt ja näin saadaan enemmän lämpöä hyötykäyttöön.

Lähes kaikki kaukolämpö tuotetaan Suomessa polttamalla jotakin polttoainetta. Kivihiili on ollut aina merkittävä osa kaukolämmön tuotantoa. Kivihiilellä on suuri lämpöarvo ja se on halpaa ja helppo varastoida, jolloin sen polttaminen energiantuotannossa on kannattavaa. [4] Vuonna 2017 23 % kaukolämmöstä tuotettiin Suomessa kivihiilellä ja kivihiiltä yritetään vähentää sen polttamisesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen takia [1]. Helsingissä kivihiilen osuus kaukolämmön tuotannosta on erittäin suuri ja Helsingissä käytetään eniten kaukolämpöä Suomessa, joten Helsingillä on suuri työ päästä eroon kivihiilen käytöstä. Puupolttoaineita ja biomassaa suositaan Suomessa, sillä se on kotimaista ja uusiutuvaa energiaa. Noin 36 % kaukolämmöstä tuotettiin näillä polttoaineilla 2017 ja puun käyttöä energiantuotannossa lisätään jatkuvasti [1]. Puuta täytyy käsitellä paljon ennen kuin sitä voidaan polttaa ja sen lämpöarvo on huonompi kuin hiilellä. Hiilidioksidipäästöjen hillitseminen on tärkeää, joten puupolttoaineita suositaan ja pyritään kehittämään niistä parempia ja näin vähennetään fossiilisia polttoaineita energiantuotannosta. Maakaasua ja turvetta käytetään myös paljon kaukolämmöntuotannossa [4]. Öljyä

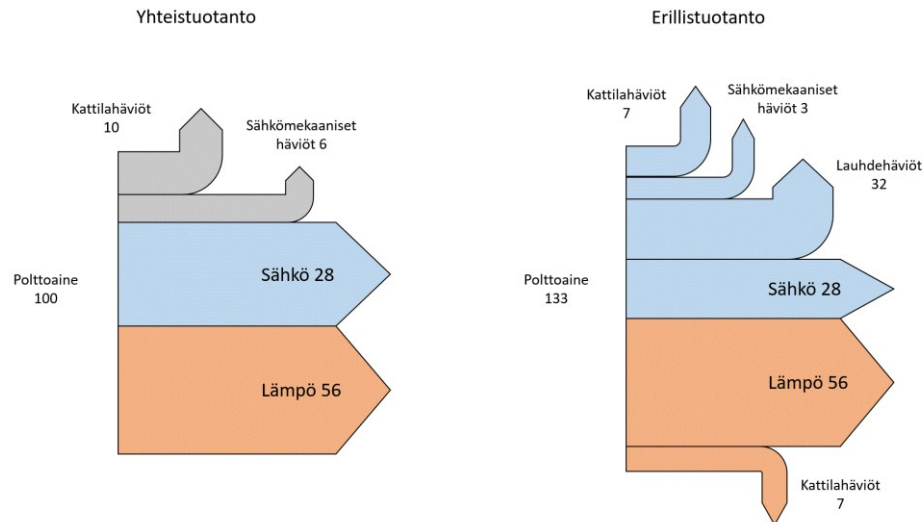
käytetään myös jonkun verran kaukolämmön tuotannossa, mutta suurin osa näistä voimaloista on huippukuormalaitoksia tai varavoimalaitoksia niiden helppokäyttöisyyden ja halvan tehokustannuksen vuoksi [4].

Kaukolämpöä voidaan tuottaa sekä yksin että sähkön kanssa. Voimalaitoksia voidaan jaotella esimerkiksi sen perusteella, kuinka monta tuntia vuodessa laitos on käynnissä ja millaista polttoainetta se käyttää. Yhteistuotantovoimalaitokset pyörivät silloin, kun lämmöntarve on suurimmillaan, jolloin ne ovat siis keskikuormalaitoksia [5]. Tällöin myös sähköä saadaan eniten yhteistuotantolaitoksesta. Jos poltovoimalaitos käyttää kiinteää polttoainetta, se soveltuu peruskuorman lisäksi keskikuormaan, sillä tällaiset voimalaitokset ovat kannattavia myös osakuormalla eli voimalaitos ei käy tällöin täydellä teholla. Maakaasulla ja öljyllä toimivat voimalaitokset sopivat parhaiten huipputeholle ja varateholle, sillä ne saadaan nopeasti käyntiin ja niiden pääomakustannukset ovat alhaiset. [4]

## 2.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

Kun sähkö ja lämpö tuotetaan erikseen, sähköntuotannon kokonaishyötysuhde on huono. Hyötysuhde lauhdevoimalaitoksessa on yleensä noin 30 % ja parhaimmillaan on päästy 60 %:iin [11]. Suuri osa tuotetusta energiasta menee siis hukkaan. Kuva 1 voidaan nähdä, kuinka erillistuotannossa syntyy huomattavasti enemmän energiahäviöitä verrattuna yhteistuotantoon. Suurin osa näistä häviöistä koostuu lauhdehäviöistä, jossa polttoaineen lämpöenergiaa hukataan lauhdutusprosessissa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa saadaan hyödynnettyä hyvin suuri osa polttoaineen energiasta, mikä tekee siitä energiatehokkaan tuotantotavan [5]. Verrattuna lauhdevoimalaitokseen, yhteistuotantolaitoksesta saadaan vähemmän sähköä, mutta saatava lämpöteho on suuri ja sitä pystytään käyttämään esimerkiksi teollisuuden prosesseissa tai kaukolämpönä.





**Kuva 1.** Sankey-diagrammi yhteistuotannosta ja erillistuotannosta. Kuvasta voi huomata, että yhteistuotannossa saman sähkön ja lämmön tuotto vaatii vähemmän polttoainetta. Kuva on muokattu lähteestä [12].

Suomessa noin 75 % kaukolämmöstä tuotetaan yhteistuotannolla, mikä on paljon verrattuna muuhun maailmaan [5]. Islannissa käytetään hyvin paljon kaukolämpöä maan geotermisen energian vuoksi, mutta muuten ainoastaan muutamissa Euroopan maissa kaukolämmön osuus energiantuotannosta on merkittävä [11]. Sähkön ja lämmön yhteistuotantoa ei käytetä juuri maailmalla, sillä saatavalle lämpöteholle ei ole juuri käyttöä. Yhteistuotannosta ollaan kuitenkin kiinnostuneita, koska hiilidioksidipäästöjä yritetään vähentää [4]. Kun polttoaineesta saadaan hyödynnettyä mahdollisimman paljon, hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät suhteessa tuotettuun tehoon. Kuitenkin päästöjen vähennys kohdistuu lähinnä lämpötehon tuotantoon, sillä sähkötehoa voidaan tuottaa hyvin hiilineutraalisti. Vuonna 2016 Suomessa tuotettiin 78 % sähköstä hiilineutraalisti, kun kaukolämmöstä noin puolet vuonna 2017 tuotettiin vielä fossiilisilla polttoaineilla [1, 13].

Lämpöä voidaan tuottaa sähkön ohella monessa eri voimalaitostyyppissä. Usein lämpö tuotetaan juuri sähkön mukaan eli polttoaineella tuotetaan ensisijaisesti sähköä ja lämmön tuotanto toteutetaan väliotolla turbiinista tai hukkalämmön avulla. Yhteistuotanto voidaan toteuttaa myös toisinpäin eli polttoaineesta saatava lämpöenergia hyödynnetään lämpöenergiana ja yli jäävä lämpö käytetään sähkön tuotannossa [11]. Tällaisissa tapauksissa lämpöenergia hyödynnetään teollisuuden prosesseissa, joissa vaaditaan hyvin korkeita lämpötiloja [11]. Tyypillisin tapa tuottaa kaukolämpöä sähkön kanssa on höyryprosessilla. Tällöin polttoaineen lämpöteholle lämmitetään prosessissa kiertävää vettä, jolloin vesi höyrystyy. Höyry kulkeutuu turbiinille ja turbiinin pyörittää generaattoria tuottaen sähköä. Höyryvoimalaitoksissa on korkeapaineturbiini ja matalapaineturbiini erikseen, sillä tulistamalla höyryä uudestaan näiden kahden turbiinin välillä, pystytään paimuttamaan höyryä enemmän eli saadaan enemmän sähkötehoa. [14] Kaukolämmön tuotannossa voidaan ottaa veden lämmittämiseen tarvittava höyry muutamasta eri kohdasta

prosessia. Höyry voidaan ottaa esimerkiksi jo korkeapaineturbiinin jälkeen, jolloin kaikkea höyryä ei ajeta ollenkaan matalapaineturbiiniin. Kaukolämmönvaihtimeen voidaan ajaa myös kaikki höyry, jolloin hukkalämpöä ei synny lauhduttimessa, mutta sähköteho pienenee huomattavasti, sillä höyry ei voi paisua yhtä alhaiseen paineeseen kuin normaalisissa lauhdevoimalassa. Usein kaukolämmönvaihtimeen otetaan höyry väliotona matalapaineturbiinista, jolloin höyryn määrää lämmönvaihtimeen pystytään säätämään ja sähköteho ei laske yhtä paljon verrattuna lauhdevoimalaan. [11]

Ydinvoimalla tuotetaan sähköä ja se toimii samalla tavalla kuin muutkin lauhdevoimalaitokset. Tässä tapauksessa reaktori kuumentaa prosessissa kiertävää vettä höyryksi ja höyry pyörittää turbiinia tuottaen sähköä. Ydinvoimalaitos voitaisiin siis muokata yhteistuotantolaitokseksi samaan tapaan kuin muukin lauhdevoimalaitos, mutta varsinkin poliittiset syyt ja turvallisuuskysymykset ovat hidastaneet tätä kehitystä länsimaissa [15].

Ydinvoimaloissa on käytössä kaksi vallitsevaa kevytvesireaktorityyppiä; kiehumisvesireaktori (BWR eli Boiling Water Reactor) ja painevesireaktori (PWR eli Pressurized Water Reactor). Kiehumisvesireaktorissa reaktorissa kiertävä vesi kiertää myös koko voimalaitoksessa, eli piirejä on vain yksi. Tällöin vesi kiehuu reaktorissa ja syntynyt höyry johdetaan turbiiniin, joka pyörittää generaattoria tuottaen sähköä. Lauhduttimen lopusta poistuva höyry lauhdutetaan takaisin vedeksi joka lähtee kiertämään prosessia uudelleen. [14, 16] Koska kiertopiirejä on vain yksi, kiehumisvesireaktorivoimalassa säteilee myös turbiinipuolella, koska reaktorista tulevan höyryn mukana kulkeutuu radioaktiivisia hiukkasia [16]. Painevesireaktorissa on kaksi kiertopiiriä vedelle. Reaktorissa kiertävä vesi on niin korkeassa paineessa, ettei se kiehu ollenkaan. Reaktorista vesi ohjataan höyrystimiin, joissa reaktorin lämmittävän veden avulla kuumennetaan sekundääripiirissä kiertävää vettä ja tämä vesi höyrystyy. Tuotettu höyry kulkeutuu turbiiniin ja tämä osa toimii samalla tavalla kuin kiehumisvesireaktorissa. [14] Kahden piirin ansiosta säteilevät hiukkaset eivät kulkeudu turbiinille, mikä helpottaa erityisesti huoltotöitä voimalaitoksessa [16].

Ydinvoimaloista hyvin pieni osa on yhteistuotantolaitoksia ja näistä suurin osa sijaitsee Venäjällä tai entisen Neuvostoliiton alueella [15]. Näistäkin kaikki voimalaitokset ovat ainakin 30 vuotta vanhoja ja voimalat rakennettiin ensin lauhdevoimalaitoksiksi ennen muuttamista yhteistuotantolaitoksiksi [11, 15]. Kyseisissä voimalaitoksissa kaukolämmön tuotantoon tarvittava höyry otettiin matalapaineturbiinista, mutta olisi myös mahdollista, että höyry otettaisiin korkeapaineturbiinin jälkeen [11]. Ydinvoimalla pystytään tuottamaan suuri määrä energiaa, minkä takia myös kaukolämpöä voitaisiin saada hyvin paljon. Koska kaukolämpöä hyödynnetään melko vähän Euroopassa, ydinvoimalan lämmöntuotantopotentialille ei ole kysyntää eikä kehitystä siihen suuntaan tapahdu. Ydinvoimaa ei voida rakentaa lähelle asutusta, jolloin mahdollisen kaukolämpöveden siirtomatka kasvaa ja tällöin myös lämpöhäviöt ja kustannukset kasvavat [11]. Kuitenkin jos siirrettävä lämpöteho on riittävän suuri, lämpöhäviöt ja kustannukset suhteessa tuotettuun tehoon pienenevät ja näin lämmöntuotanto voisi olla kannattavaa.

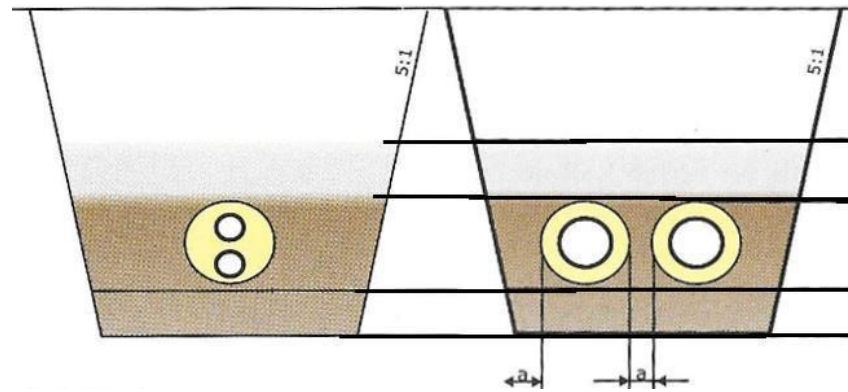
## 2.3 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkkoa voidaan verrata sähköverkkoon, sillä kaukolämpöverkon tarkoitus on jakaa lämpöä asiakkaille voimalaitoksilta. Yleisin tapa siirtää kaukolämpöä on kuuman veden avulla, mutta varsinkin Yhdysvalloissa käytetään myös kuumaa höyryä kaukolämpöverkossa [4, 17]. Suurin osa kaukolämpöverkoista on kaksiputkijärjestelmiä, jossa on sekä meno- että paluuputki. Tällöin kaukolämpövesi luovuttaa lämpöenergiaa lämmönvaihtimessa ja palaa takaisin voimalaitokselle lämmitettäväksi. Muualla kuin Suomessa on myös yksi-, kolmi- ja neliputkijärjestelmiä. Neliputkijärjestelmiä on erityisesti Itä-Euroopassa, jossa asunnon lämmitykseen ja käyttöveden lämmitykseen on omat putkensa. Kolmiputkijärjestelmä on muuten samanlainen kuin kaksiputkijärjestelmä, mutta mukana on myös kolmas menoputki hyvin kuumalle vedelle, jota voidaan käyttää esimerkiksi teollisuuden prosesseissa. Islannissa on käytössä yksiputkijärjestelmä ja myös paikoin Venäjällä, jolloin kuuma vesi sekoittuu suoraan kylmään veteen [17]. [4]

Koska kaukolämmön tarve vaihtelee paljon vuodenajasta riippuen, erityisesti pohjoisessa, kaukolämmön täytyy olla säädettävissä. Lämmitystehoa voidaan säätää sekä veden nopeutta säätämällä että veden lämpötilaa säätämällä. Suomessa säädetään lämpötilan avulla ja kuuman veden lämpötila vaihtelee 115 ja 65 asteen välillä [2]. Kuukausittaisen vaihtelun lisäksi yhden päivän aikaiset vaihtelut ovat suuria [4]. Näitä vaihteluita pyritään ennustamaan, jotta lämpöhäviöt olisivat mahdollisimman pienet kaukolämpöverkossa.

Kaukolämpöverkoston ja kaukolämpöputkien mitoitus ja suunnittelu on tärkeää, sillä näihin vaikuttavat monet tekijät. Suunnittelussa täytyy ottaa huomioon jo olemassa olevat kaukolämmöntuotantolaitokset sekä kaukolämmön tarve. Johtojen mitoitukseen vaikuttaa hyvin paljon putkien reitti, sillä esimerkiksi putkien koon muutokset tai mutkat vaikuttavat siirrettävään tehoon. Veden virtausnopeus vaikuttaa tarvittavaan pumppaustehoon ja siihen, kuinka paljon lämpötehoa saadaan siirrettyä. Kaukolämpöputkessa tapahtuu sekä lämpöhäviöitä, että painehäviöitä. Lämpöhäviöitä voidaan vähentää eristyksellä ja painehäviöille siirto johdoissa pidetään usein rajana 0,5 – 2,0 bar/km jolloin pitkillä siirtomatkoilla välipumppaukselle on tarvetta. [4]

Suomen kaukolämpöverkko on kaksiputkijärjestelmä [2, 4]. Voimalaitokselta kaukolämpövesi siirretään suurissa siirto johdoissa, joissa painehäviöt ja lämpöhäviöt pyritään pitämään mahdollisimman vähäisinä. Näistä johdoista vesi siirtyy runkojohtoihin, jotka siirtävät veden määritetyllä alueelle. Runkojohdon suuruus riippuu alueen huipputehontarpeesta. Rakennuksiin kaukolämpö kulkeutuu liittymisjohtoja pitkin. Putket voivat olla joko yksiputkijohtoja tai kaksiputkijohtoja, jossa ensimmäisessä putken ovat täysin erikseen ja niillä on omat eristeensä ja jälkimmäisessä molemmat putken ovat saman suoja-kuoren ja eristeen sisällä kuten Kuva 2 näkyy. [4]



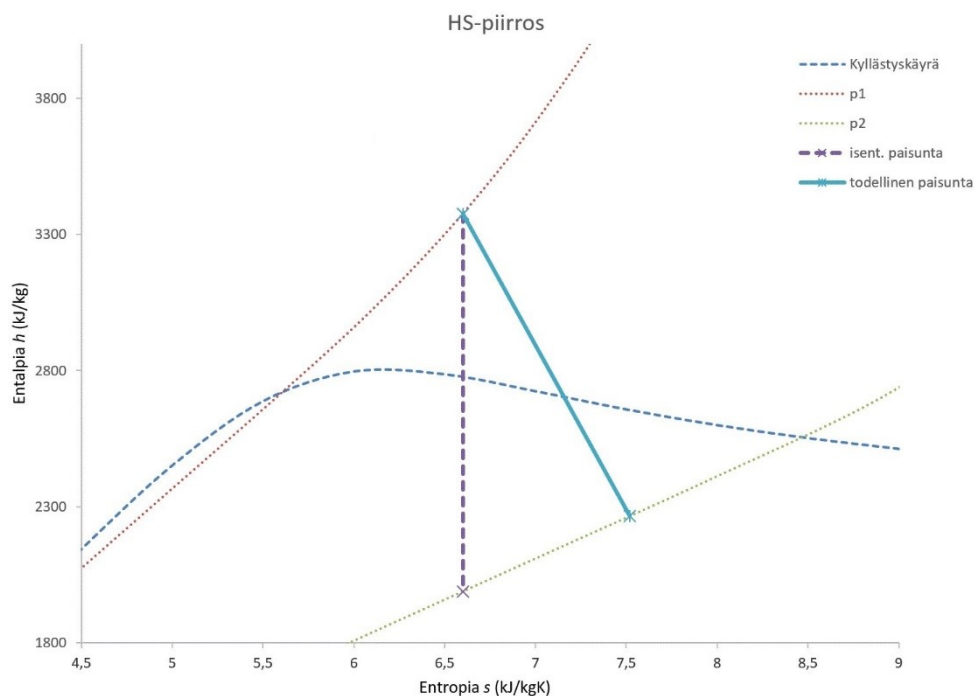
**Kuva 2.** Kaukolämpöjohdot, jossa vasemmalla on kaksiputkijohto ja oikealla yksiputkijohto. Kuva on muokattu lähteestä [4].

Muitakin putkityyppejä on, mutta Suomessa juuri kuvan mukainen kiinnivaahdotettu putki on yleisin ja 80-luvulta asti on rakennettu vain tätä putkityyppiä käyttäen kaukolämpöverkkoa. Mitä suurempi voimalaitoksen lämpöteho on, sitä suurempi halkaisija tarvitaan siirtojohdolle. Kaksijohtoputkeen tarvitaan vähemmän materiaalia ja lämpöhäviöt ovat pienempiä verrattuna yksijohtoputkeen, mutta yksittäisen putken halkaisija ei voi olla kovin iso, jolloin suurilta voimalaitoksilta siirtojohdot toteutetaan yksiputkijohdoilla. [4]

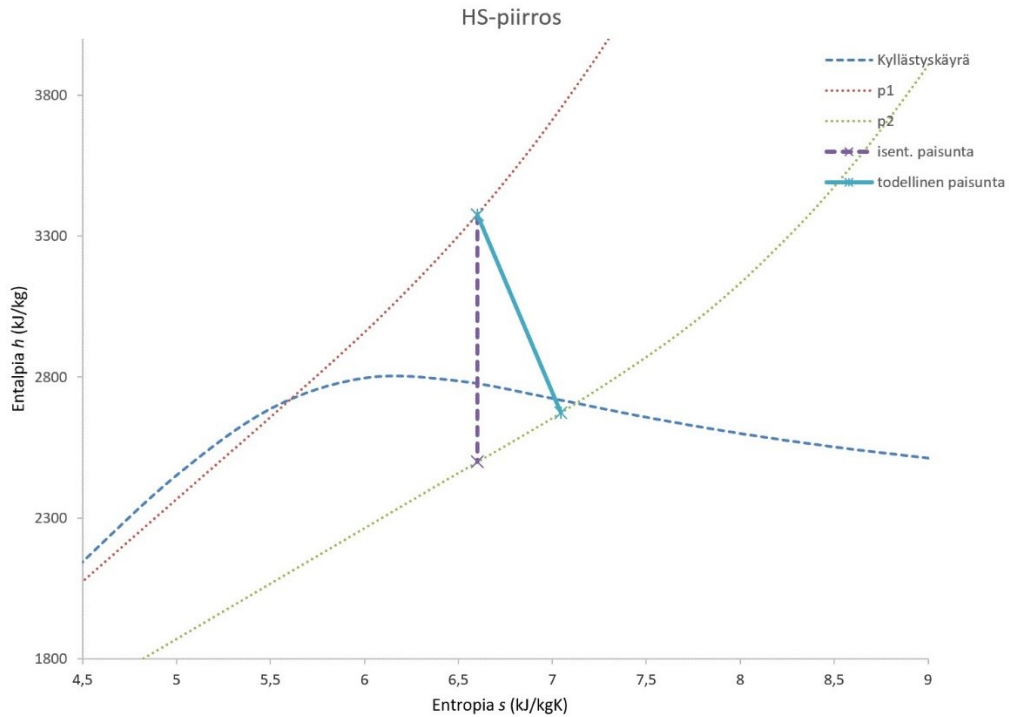
## 3. HÖYRYPIIRIN JA KAUKOLÄMPÖVERKON LASKEMISEN TEORIAA

### 3.1 Höyrypiirin laskeminen ja lämpötehon määrittäminen

Voimalaitoksen höyrypiiriä laskettaessa tärkeimpiä suureita ovat entalpia, kosteusprosentti, paine ja lämpötila. Entalpia ilmaisee energiasisältöä termodynamiikassa. Entalpia voidaan laskea systeemin sisäenergian ja systeemin paineen ja tilavuuden tulon summasta. Entalpiaa ei pystytä mittaamaan, mutta sen erotuksen voi määrittää. Höyrytekniikassa höyrypiirin eri pisteiden entalpioita voidaan kuitenkin määrittää monilla tavoilla. Kun turbiiniin menevän höyryn paine ja lämpötila tiedetään, pystytään määrittämään tämän pisteen entalpia  $h$ -piirroksen avulla. Alla on kaksi  $h$ -piirrosta, josta ensimmäisessä on kuvattu lauhtuminen loppuun asti ja toisessa höyry lauhtuu vastapaineeseen asti. Kuva 3 ja Kuva 4 on käytetty alkulämpötilana  $500\text{ °C}$  ja alkupaineena 100 baria sekä isentrooppiyötysuhteena on käytetty arvoa 0,8. Kuvista huomaa, että entalpian muutos on pienempi kun lauhtumispaine on suurempi. Tällöin siis sähköä saadaan vähemmän, sillä sähkön määrä riippuu turbiinin entalpian muutoksesta.



**Kuva 3.** Höyryn lauhtuminen 0,04 barin. Kuvassa on vain tarvittavat isobaarit ja isotermit on jätetty kokonaan pois. Kuva on tehty lähteen [14] avulla.



**Kuva 4.** Höyryn lauhtuminen 2 barin. Kuvassa on vain tarvittavat isobaarit ja isotermit on jätetty kokonaan pois. Kuva on tehty lähteen [14] avulla.

Entalpia turbiinin jälkeen saadaan selville, kun on tiedossa isentrooppihyötysuhde ja paine turbiinin jälkeen. Entalpia voidaan laskea kaavalla

$$h_2 = h_1 - \eta_s(h_1 - h_{2s}), \quad (1)$$

missä  $h_2$  on turbiinin jälkeinen entalpia (kJ/kg),  $h_1$  on turbiinia ennen oleva entalpia (kJ/kg),  $\eta_s$  on isentrooppihyötysuhde ja  $h_{2s}$  on isentrooppinen entalpia turbiinin jälkeen (kJ/kg). Turbiinin jälkeen höyry kulkee lauhduttimelle, jossa höyry lauhtuu takaisin vedeksi. Tällöin entalpia voidaan määrittää paineen avulla. Lauhduttimessa paine säilyy samana kuin turbiinin lopussa, jolloin kylläisen veden taulukosta voidaan määrittää painetta vastaava entalpia. Samalla tavalla voidaan määrittää myös kaukolämmönvaihtimen jälkeinen entalpia. Kaukolämmönvaihtimessa paine on suurempi, mutta höyry lauhtuu tässäkin takaisin kylläiseksi nesteeksi.

Kaukolämmönvaihtimessa tapahtuu lämmönsiirto kaukolämpövedeen ja tämän lämpövirran laskeminen on työn kannalta tärkeää. Kun kaukolämmönvaihdinta edeltävä ja sen jälkeinen entalpia on selvitetty, voidaan määrittää lämpövirta kaukolämpövedeen. Lämpövirta saadaan laskettua kaavasta

$$Q = P = \dot{m}(h_2 - h_3), \quad (2)$$

jossa  $Q$  on lämpövirta (kJ/s),  $P$  on teho (kW),  $\dot{m}$  on kaukolämmönvaihtimeen menevän höyryn massavirta (kg/s),  $h_2$  on kaukolämmönvaihdinta edeltävä entalpia eli usein myös

turbiinin jälkeinen entalpia (kJ/kg) ja  $h_3$  on kaukolämmönvaihtimen jälkeinen entalpia (kJ/kg). Lämpövirta on suoraan kaukolämmönvaihtimen lämpöteho.

Kun kaukolämmönvaihtimessa siirtyvä lämpöteho on määritetty, voidaan selvittää massavirta kaukolämpövedelle. Massavirta voidaan laskea kaavasta

$$\Phi = c_p \dot{m} \Delta T = c_p \rho q_v \Delta T, \quad (3)$$

jossa  $\Phi$  on lämpöteho (W),  $c_p$  on veden ominaislämpökapasiteetti (J/kg°C),  $\dot{m}$  on veden massavirta (kg/s),  $\rho$  on veden tiheys (kg/m<sup>3</sup>),  $q_v$  on veden tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s) ja  $\Delta T$  meno- ja paluuveden lämpötilojen erotus (°C) [4]. Kun lämpöteho kasvaa, veden massavirtaa täytyy myös kasvattaa. Massavirran kasvaessa veden virtausnopeus kasvaa, joten putkikokoa täytyy kasvattaa, ettei virtausnopeus kasva liian isoksi. Suurimmat kaukolämpöputket ovat halkaisijaltaan 1200 mm, joka rajoittaa siirrettävän lämpötehon suuruutta. Meno- ja paluuveden lämpötilaerolla on myös vaikutusta, mutta loputtomiin ei tätäkään voida kasvattaa.

### 3.2 Vedensiirron pumppaustehon laskeminen

Yleensä kaukolämpöveden siirtämiseen käytetään keskipakopumppuja, sillä ne soveltuvat sekä veden kiertoprosessin pumppaukseen että paineen nostoon pitkällä siirtomatkoilla [4]. Laskettaessa virtausteknisiä suureita putkessa virtaavalle vedelle, käytetään usein laminaarille virtaukselle päteviä laskukaavoja, sillä se helpottaa laskemista huomattavasti ja saatu tulos on riittävän tarkka. Todellisuudessa virtaus putkessa on lähes aina turbulenti. [18] Veden siirtämiseen tarvittava pumppausteho saadaan kaavasta

$$P = \frac{q_v \Delta p}{\eta} = \frac{q_v \rho g H}{\eta} = \frac{\dot{m} g H}{\eta}, \quad (4)$$

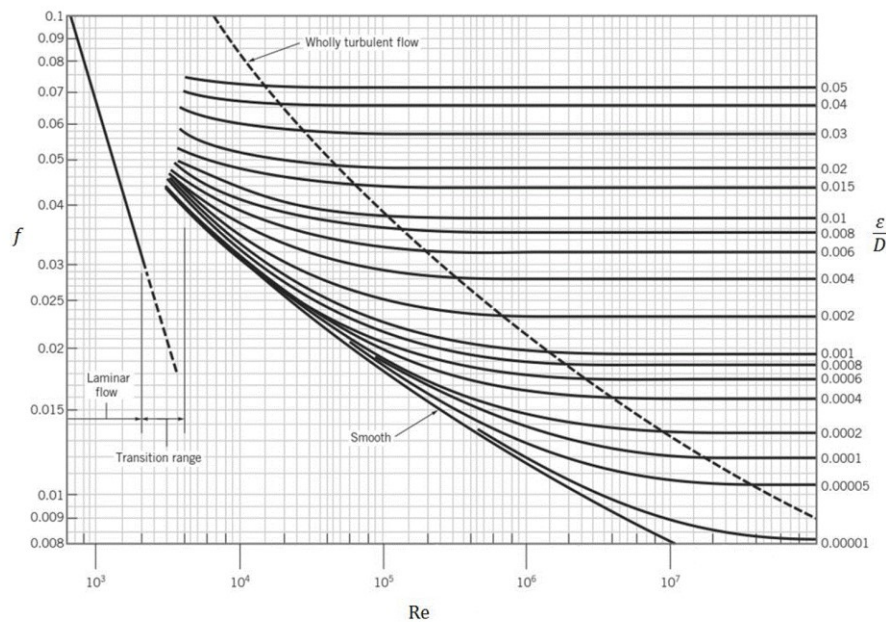
missä  $P$  on pumpun tarvitsema teho (W),  $q_v$  on tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s),  $\Delta p$  on paine-ero (Pa),  $\rho$  on pumpattavan nesteen tiheys (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  on putoamiskiihtyvyys (m/s<sup>2</sup>),  $H$  on nostokorkeus (m),  $\dot{m}$  on massavirta (kg/s) ja  $\eta$  on pumpun hyötysuhde [4]. Hyötysuhde on pumpulle ominainen ja putoamiskiihtyvyys ja nesteen tiheys saadaan taulukoista, mutta muut arvot tulee selvittää, ennen kuin tehon voi määrittää. Painehäviön saa laskettua nostokorkeuden avulla, joten vain toinen näistä tarvitsee selvittää. Myös tilavuusvirta saadaan massavirrasta, jolloin toinen vain tarvitsee laskea. Putkessa painehäviö koostuu nesteen ja putken pinnan välisestä kitkasta sekä kertahäviöistä, jotka aiheutuvat esimerkiksi putken mutkista tai venttiileistä [4]. Kertavastuksia ei tässä työssä huomioida, sillä niitä on mahdoton arvioida alkutietojen perusteella, joten laskuissa otetaan huomioon vain kitkan aiheuttama painehäviö. Painehäviö saadaan määritettyä kaavasta

$$\Delta p = \xi \frac{L}{d_s} \frac{\rho w^2}{2} = \xi \frac{8L}{d_s^5} \frac{\rho q_v^2}{\pi^2} = \xi \frac{8L}{d_s^5} \frac{\dot{m}^2}{\pi^2 \rho}, \quad (5)$$

missä  $\xi$  on kitkakerroin,  $L$  on putkiosuuden pituus (m),  $d_s$  on putken sisähalkaisija (m) ja  $w$  on virtausnopeus (m/s) [4]. Kitkakerroin riippuu kahdesta tekijästä; Reynoldsin luvusta ja putken pinnan karheudesta [4]. Reynoldsin luvusta käy ilmi, onko virtaus laminaari vai turbulenti [18]. Putken karheus riippuu putkimateriaalista, mutta normaalisti karheus on 0,04 mm ja 0,1 mm:n väliltä kaukolämpöteräsputkissa [4]. Reynoldsin luku saadaan selville kaavasta

$$Re = \frac{wd_s}{\nu} = \frac{4q_v}{\pi d_s \nu} = \frac{4q_v \rho}{\pi \mu d_s} = \frac{4\dot{m}}{\pi \mu d_s}, \quad (6)$$

missä  $\nu$  on kinemaattinen viskositeetti ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ja  $\mu$  on dynaaminen viskositeetti ( $\text{kg}/\text{ms}$ ) [4]. Viskositeetti riippuu veden lämpötilasta ja paineesta, mutta paine vaikuttaa huomattavasti vähemmän [18]. Dynaaminen viskositeetti kertoo, kuinka paljon neste vastustaa muutosta eli virtausta. Kinemaattinen viskositeetti taas on dynaamisen viskositeetin ja tiheyden suhde. [18] Kun Reynoldsin luku, putken karheus ja putken halkaisija tiedetään, voidaan kitkakerroin määrittää Moodyn käyrästä (Kuva 5).



**Kuva 5.** Moodyn käyrästä voidaan selvittää kitkakerroin. Vasemmassa reunassa on kitkakertoimien arvoja, alhaalla Reynoldsin luku ja oikeassa reunassa karheuden ja putkihalkaisijan suhde. Kuva on muokattu lähteestä [18].

Kun kitkakerroin on määritetty ja muut arvot tunnetaan, saadaan laskettua painehäviö pumppujen välissä ja tämän avulla yhden pumpun tarvitsema teho.

### 3.3 Lämpöhäviöiden määrittäminen

Lämpöhäviö kaukolämpöputkessa on suoraan verrannollinen virtaavan veden ja maaperän lämpötilaeroon. Lämpöhäviöitä pyritään pienentämään hyvällä eristyksellä ja mitä



suurempi putki, sen pienemmät lämpöhäviöt suhteessa tehonsiirtokykyyn. Lämpöhäviöön vaikuttaa eristeen lämpövastus, maaperän lämpövastus sekä meno- ja paluuputkien yhteisvaikutus. Lämpövastus kertoo kuinka hyvin esimerkiksi putken eriste vastustaa lämmön siirtymistä vedestä. [4, 19] Eristetyn putken lämpövastus voidaan määrittää kaavasta

$$R_i = \frac{1}{2\pi k_i} \ln \frac{D_i}{D_p}, \quad (7)$$

jossa  $R_i$  on eristeen lämpövastus ( $\text{m}^\circ\text{C}/\text{W}$ ),  $k_i$  on eristeen lämmönjohtavuus ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ ),  $D_i$  on eristeen ulkohalkaisija ja  $D_p$  on eristeen sisähalkaisija [4]. Eristeen jälkeen lämpö kuluu maaperään ja maaperän lämpövastus voidaan määrittää kaavasta

$$R_g = \frac{1}{2\pi k_g} \left( \ln \left( \frac{4H}{D_i} \right) - \frac{\left(\frac{D_i}{2E}\right)^2 + \left(\frac{D_i}{4H}\right)^2 + \frac{D_i^2}{4(4H^2 + E^2)}}{\frac{1+\beta}{1-\beta} \left(\frac{D_i}{2E}\right)^2} \right), \quad (8)$$

jossa  $R_g$  on maaperän lämpövastus ( $\text{m}^\circ\text{C}/\text{W}$ ),  $k_g$  on maaperän lämmönjohtavuus ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ ),  $H$  on putken korjattu sijaintisyvyys (m) ja  $E$  on putkien keskipisteiden välinen etäisyys (m) [4]. Apusuure  $\beta$  saadaan laskettua kaavasta

$$\beta = \frac{k_g}{k_i} \ln \left( \frac{D_i}{D_p} \right) [4]. \quad (9)$$

Sen sijaan, että määritettäisiin erikseen maanpinnan lämpövastus, voidaan tämä sisällyttää maaperän lämpövastukseen korjatun putken sijaintisyvyyden avulla. Tämä voidaan laskea kaavalla

$$H = H' + \frac{k_g}{h_{gs}}, \quad (10)$$

jossa  $H'$  on putken todellinen sijaintisyvyys (m) ja  $h_{gs}$  on maanpinnalla oleva lämmönsiirtokerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ) [4]. Koska kaukolämpöputket lämmittävät maaperää joka suuntaan, ne lämmittävät myös toisiaan ja tämä yhteisvaikutus täytyy huomioida lämpöhäviöiden määrityksessä. Putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus voidaan laskea kaavasta

$$R_m = \frac{1}{4\pi k_g} \ln \left( 1 + \left( \frac{2H}{E} \right)^2 \right), \quad (11)$$

jossa  $R_m$  on keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus ( $\text{m}^\circ\text{C}/\text{W}$ ) [4]. Myös itse kaukolämpöputkella ja eristeen ulkopuolella olevalla suojakuorella on lämpövastus, mutta ne voidaan olettaa paljon pienemmiksi kuin eristeen ja maaperän, jonka takia ne voi jättää laskuista pois. Lämpövastuksien avulla pystytään määrittämään molemmille putkille lämmönläpäisykertoimet. Meno- ja paluuputkessa nämä ovat eri suuret, sillä putkessa virtaavan veden lämpötila on eri. Näiden erotus voidaan määrittää kaavalla

$$K_1 - K_2 = \frac{1}{R_i + R_g + R_m}, \quad (12)$$

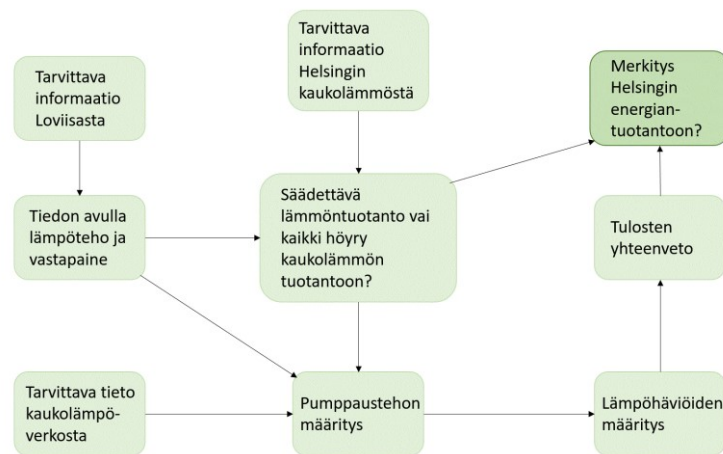
jossa  $K_1$  ja  $K_2$  ovat putkien lämmönläpäisykertoimet ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ). [4] Eristeen lämmönjohtavuuteen vaikuttavat monet asiat, kuten eristeen ikä, kaukolämpöveden lämpötila ja kosteus, jotka taas vaikuttavat lämpöhäviöihin, mutta uuden putken lämpöhäviöiden laske-  
misessa näitä ei huomioida. Kokonaislämpöhäviö, sekä meno- että paluuputken, saadaan laskettua kaavalla

$$\Phi' = 2(K_1 - K_2) \left( \frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right), \quad (13)$$

jossa  $\Phi'$  on lämpöhäviö metriä kohden ( $\text{W/m}$ ),  $T_m$  on veden menolämpötila ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_p$  on veden paluulämpötila ( $^\circ\text{C}$ ) ja  $T_g$  on maaperän lämpötila putken sijaintisyvydessä ( $^\circ\text{C}$ ). [4] Kun lämpöhäviöt kerrotaan putken matkalla, saadaan selville menetetty lämpöteho.

## 4. LOVIISAN VOIMALAITOS, HELSINGIN KAUKOLÄMPÖ JA LASKENTAMENETELMÄT

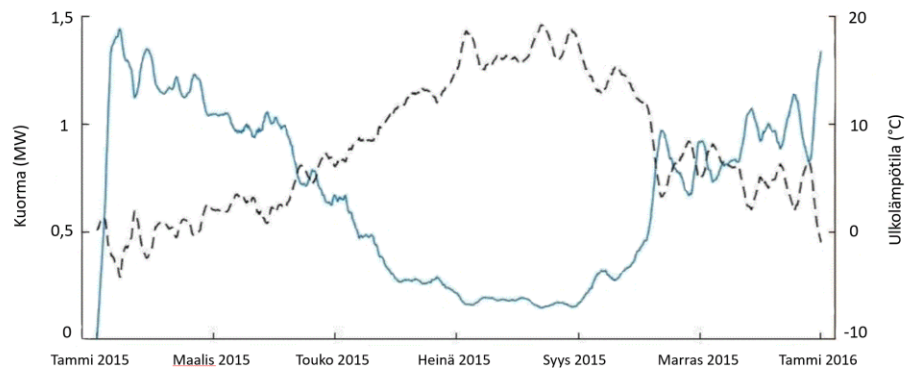
Työn tavoitteena on selvittää maksimilämpöteho, tähän tarvittava vastapaine, veden siirtämiseen tarvittava pumppausteho, sähkötehon vähennys suurimmillaan, ja lämpöhäviöt. Näiden avulla on tarkoitus tutkia, olisiko kaukolämmön tuotanto järkevää Loviisan ydinvoimalassa. Kuva 6 on kaavio, minkä avulla työtä on lähdetty tekemään. Työn kannalta tärkeät tiedot on merkitty kaavioon, mutta taustatietoa tarvitaan monesta muustakin kuten kaukolämmöstä yleisesti, höyrypiirin laskemisesta, virtauksesta ja lämmönsiirrosta.



*Kuva 6. Kuvaaja työn suorittamisen vaiheista*

### 4.1 Helsingin kaukolämpö

Helsingissä on hyvin laaja kaukolämpöverkko. Rakennuksista noin 90 % lämmitetään kaukolämmön avulla ja kaukolämpöputkia on 1300 km Helsingin alla [20, 21]. Tarvittava lämpöteho on siis ajoittain hyvin suuri ja tehontarpeen ennätys on 2650 MW [22]. Kuva 7 on vuodelta 2015 aikasarja Helsingin lämmöntarpeesta. Talvikuukausina tehontarve on suurimmillaan ja yli megawatin luokkaa, kun taas kesäisin lämmön tarve vähenee ja tehoa tarvitaan vain muutama sata kilowattia. Kaukolämpöveden lämpötilaa säädetään tehontarpeen mukaan, eli pyritään säätää ennustamalla arvioimaan etukäteen tarvittavaa lämpötehon määrää, jotta lämpöä tuotettaisiin sopivasti.

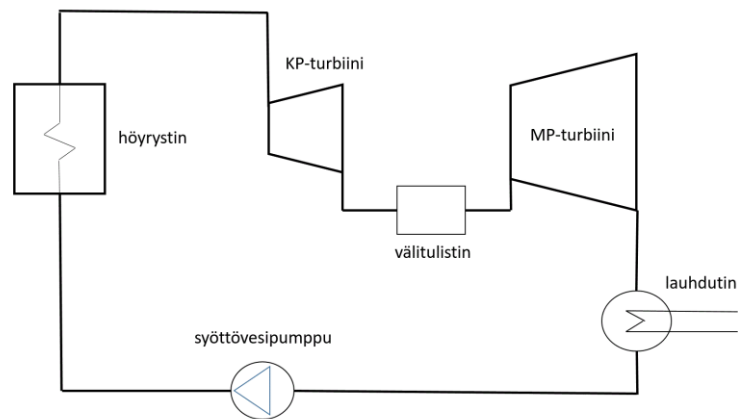


**Kuva 7.** Helsingin kaukolämmön tarve suhteessa ulkolämpötilaan vuonna 2015. Sininen käyrä kuvastaa tehon tarvetta ja musta katkoviiva ulkolämpötilaa. Kuva on muokattu lähteestä [23].

Helen vastaa lähes kaikesta Helsingin energiantuotannosta. Helenin omista voimalaitoksista kaksi käyttää kivihiiltä polttoaineenaan ja näiden lämpöteho on yhteensä 720 MW [24]. Molemmissa käytetään kivihiilen seassa puupellettejä, sillä kivihiilen osuutta yritetään vähentää [24]. Tämän lisäksi Helsingissä Vuosaaren maakaasulla käyvän voimalaitoksen lämpöteho on 600 MW ja lämpökeskusten yhteislämpöteho on 2000 MW [24].

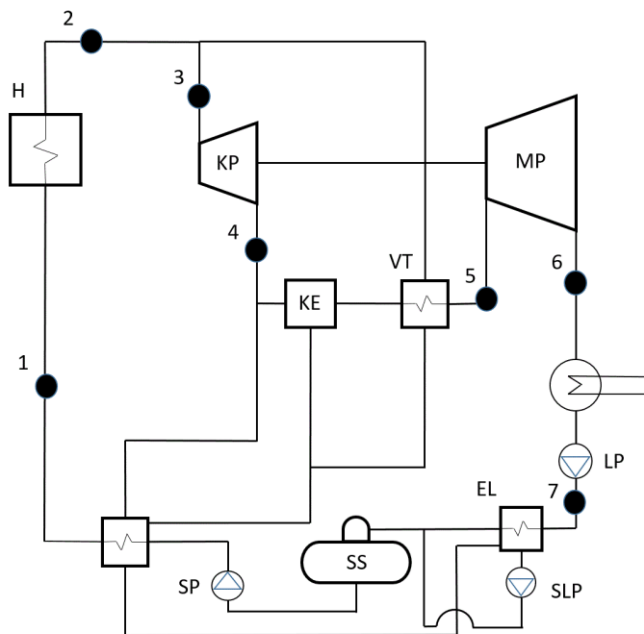
## 4.2 Loviisan ydinvoimalaitos

Loviisan ydinvoimalat on otettu käyttöön vuosina 1977 ja 1980. Laitoksilla on käyttöluvat 50 vuoden ajaksi eli tällä hetkellä Loviisasta saadaan sähköä vuoteen 2030 asti. [7] Molemmissa laitoksissa on kaksi painevesireaktoria ja molempien teho on noin 500 MW. Turbiinilaitos on yksi kokonaisuus, jossa on yhteensä 4 turbiinikokonaisuutta. Yhdessä kokonaisuudessa on yksi korkeapaineturbiini ja kaksi matalapaineturbiinia. Alla olevassa Kuva 8 on Loviisan voimalan sekundäärihöyrypiiri yksinkertaistettuna yhden turbiinikokonaisuuden osalta.



**Kuva 8:** Loviisan voimalaitoksen sekundärihöyrypiiri yksinkertaistettuna. Kaavion piirtämiseen on hyödynnetty lähdettä [14].

Työn tarkoituksena on tarkastella sähkön ja lämmön yhteistuotantoa ydinvoimalla Loviisan voimalaitoksessa. Jotta mahdollista lämpötehoa ja muita arvoja voidaan laskea, tarvitaan tietoa nykytilanteesta. Alla olevasta Kuva 9 on Loviisan voimalaitoksen sekundäripiiri yhden turbiinikokonaisuuden suhteen. Piiri on monimutkaisempi kuin yksinkertaistettu ja tietoa on saatavilla vain kuvaan merkityistä numeroiduista pisteistä, jolloin koko piirin laskeminen on haastavampaa, kuin yksinkertaisen piirin.



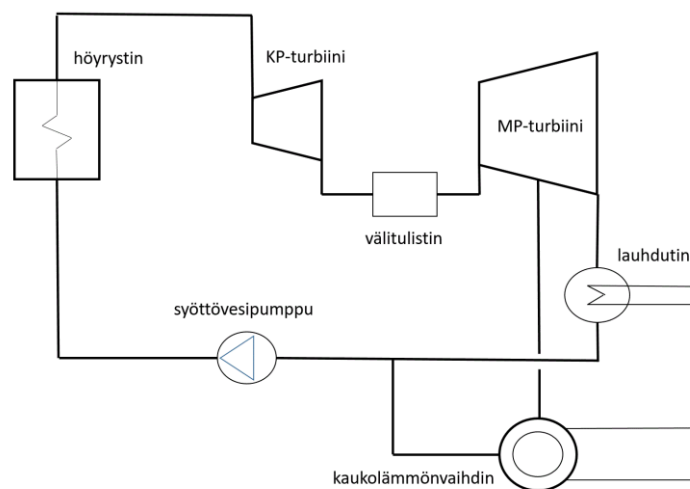
**Kuva 9:** Loviisan voimalaitoksen sekundäripiirin arvoja. Kuvan numeroitujen pisteiden tiedot löytyvät **Taulukko 1**. Kuva on muokattu lähteestä [14].

Kuva 9 H tarkoittaa höyrystintä, KP korkeapaineturbiinia, MP matalapaineturbiinia, KE kosteudenerotinta, VT välitulistinta, LP lauhdepumppua, EL esilämmitintä, SLP sivulauhdepumppua, SS syöttövesisäiliötä ja SP syöttövesipumppua [14]. Taulukko 1 on höyrypiirin arvoja, joita on hyödynnetty työn laskemisosuudessa.

**Taulukko 1.** Sekundääripiirin arvoja lähteestä [14]

	1	2	3	4	5	6	7
massavirta (kg/s)	440	440	425	300	265	235	235
paine (bar)	60	44	44	3,10	2,89	0,032	24,1
lämpötila (°C)	225	255	255	137	241	25,2	24
entalpia (kJ/kg)	966	2780	2780	2450	2948	2360	105
kosteusprosentti	-	99,5	99,5	87	-	92,5	-

Loviisan voimalaitoksen muokkaamisen yhteistuotantolaitokseksi voisi toteuttaa kahdella tavalla. Joko kaikki höyry matalapaineturbiinista ajettaisiin kaukolämmönvaihtimeen tai sitten vain osa, jolloin matalapaineturbiinista tulisi väliotolla höyryä kaukolämmön tuotantoon. Koska kaukolämpöveden lämpötilan pitää olla säädettävissä, väliotto on parempi tapa tässä tilanteessa. Kuva 10 on sekundääripiiri, johon kaukolämmönvaihdin on lisätty välioton avulla.



**Kuva 10.** Yksinkertaistettu yhden turbiinikokonaisuuden sekundääripiiri, johon on lisätty kaukolämmönvaihdin. Kuvan tekemisessä on hyödynnetty lähteitä [9, 14]

Väliotto tulisi siis matalapaineturbiinista ja olisi säädettävissä. Kaukolämmönvaihtimessa höyry lauhtuisi takaisin vedeksi ja yhdistyisi takaisin lauhduttimesta tulevan veden kanssa. Koska lauhduttimessa on alipaine, lauhduttimesta tuleva vesi täytyy pumpata samaan paineeseen kuin kaukolämmönvaihtimesta tuleva vesi tai estää veden virtaus väärään suuntaan takaiskuventtiilillä.

### 4.3 Laskentamenetelmät

Laskenta on aloitettu lämpövirran määrittämisellä. Lämpövirta kaukolämmönvaihtimesta kaukolämpövedeen saadaan laskettua kaavalla (2). Tätä varten tarvitaan höyryn massavirta lämmönvaihtimeen sekä entalpia ennen ja jälkeen lämmönvaihtimen. Koska lämmönvaihtimessa höyryn lämpötila ei laske faasinmuutoksen vuoksi, voidaan arvioida, että höyryn ollessa 120 °C se riittää lämmittämään kaukolämpöveden 115 asteiseksi. Voidaan myös olettaa, että lämmönvaihtimeen tuleva höyry on kylläistä, joten lämpötilan avulla voidaan selvittää kylläisen höyryn paine. Tässä työssä on hyödynnetty X Steam – funktioita Excelillä, mutta arvot voisi selvittää kylläisen veden/höyryn taulukosta. Kun väliottohöyryn paine on selvitetty, saadaan tämän avulla määritettyä entalpia ennen lämmönvaihtintä, sillä höyryn voidaan olettaa olevan kylläistä. Voidaan myös olettaa, että paine pysyy lähes samana lämmönvaihtimessa, joten samalla paineella voidaan määrittää lämmönvaihtimen jälkeinen entalpia. Tässä tapauksessa lämmönvaihtimen jälkeen höyry muuttuu kylläiseksi vedeksi. Höyryn massavirraksi on valittu 125 kg/s, sillä se on noin puolet koko höyryn massavirrasta, joten se on hyvä luku lähteä kokeilemaan millaisia tuloksia laskuista saadaan.

Koska höyryn määrä vähenee turbiinissa, myös sähköteho vähenee. Nykyinen yhden turbiinikokonaisuuden sähköntuotanto on 255 MW [14]. Taulukko 1 tietojen avulla voidaan määrittää teoreettinen maksimi sähköteholle ja näin laskea turbiinihyötysuhde. Sähköteho saadaan laskettua entalpian muutoksen ja höyryn massavirran avulla sekä korkeapaine-että matalapaineturbiinille ja näiden summa on teoreettinen maksimiteho. Koska höyryn väliotto tulisi matalapaineturbiinille, korkeapaineturbiinin sähköteho pysyy ennallaan. Matalapaineturbiinin sähköteho välioton kanssa voidaan määrittää jälleen kaavaa (2) hyödyntämällä. Tällöin summataan väliottoon menevän höyryn tuottama teho lopun höyryn tuottaman tehon kanssa. Kertomalla tulos aiemmin määritetyllä hyötysuhteella, saadaan todellinen sähköteho.

Pumppaustehon selvittämiseen tarvitaan massavirta, joka kaukolämpövedellä täytyy olla, että se pystyy siirtämään vaaditun lämpötehon. Tämä voidaan laskea hyödyntämällä kaavaa (3). Tätä varten tarvitaan veden ominaislämpökapasiteetti, siirrettävä lämpöteho ja veden lämpötilaero. Ominaislämpökapasiteetti on vakio ja lämpöteho on jo määritetty aiemmin joten lämpötilaero jää määritettäväksi. Koska työssä selvitetään maksimilämpöteho, menoveden lämpötilaksi on valittu 115 °C ja paluuv veden lämpötilaksi 45 °C. Voidaan olettaa, että veden massavirta on suuri, joten on järkevää valita kaukolämpöputkiksi isoin mahdollinen vaihtoehto eli halkaisijaltaan 1200 mm. Tällöin saadaan määritettyä vedelle myös tilavuusvirta ja virtausnopeus. Veden tiheys on määritetty korkeamman lämpötilan mukaan, sillä veden tiheys ei muutu merkittävästi lämmönvaihtimissa, jolloin laskujen tarkkuus pysyy riittävän hyvänä. Pumppaustehon määrittämiseen kaavan (4) avulla tarvitaan vielä painehäviö ja pumpun hyötysuhde. Hyötysuhteeksi on valittu 80 %, sillä usein pumppujen hyötysuhteet ovat tätä luokkaa [4]. Siirto johdoissa sallittu painehäviö on 0,5-1 bar/km, joten lähtöarvoja täytyy muuttaa, jos painehäviö ei pysy näissä

rajoissa [4]. Painehäviö on laskettu kaavan 5 avulla. Tätä ennen täytyy määrittää putkiosuuden pituus ja kitkakerroin. Putkiosuuden pituus tarkoittaa pumppujen välimatkaa ja tässä työssä on valittu 8 pumppua koko matkalle niin, että ensimmäinen on jo voimallaisella. Kitkakerroin on määritetty Kuva 5 Reynoldsin luvun ja putken karheuden avulla. Reynoldsin luku taas on laskettu kaavalla (6), jota varten on selvitetty kinemaattinen viskositeetti kylläisen veden taulukosta.

Kaukolämpöputkissa tapahtuu lämpöhäviöitä, sillä lämpöä karkaa vedestä putken kautta eristeeseen ja siitä suojakuoren läpi maaperään ja maan pintaan. Lämpöhäviöiden tarkastelua varten täytyy määrittää eristeen ja maan lämpövastus sekä putkien keskinäinen vaikutus yhteislämpöhäviöihin. Tätä varten tarvitaan useita alkuarvoja. Putkien sijaintisyvyudeksi on arvioitu 1,5 metriä maanpinnasta putken keskipisteeseen, sillä upotussyvyys vaihtelee 0,5 ja 1 metrin välillä. Maaperän lämmönjohtavuudeksi on valittu 2 W/m°C, sillä se vaihtelee 0,5 ja 3,5 välillä riippuen olosuhteista. Ilman lämmönsiirtokerroimeksi on valittu 13,5 W/m<sup>2</sup>°C koska se on yleensä 12 ja 15 välillä. [4] Kaukolämpöputken lämpövastus on laskettu kaavalla (7). Tähän arvoon vaikuttaa vain putken eristeen ominaisuudet. Maaperän lämpövastus voidaan laskea kaavalla (8). Tätä varten tarvitaan korjattu putken syvyys sekä apusuure  $\beta$ . Korjattu putken syvyys voidaan laskea kaavalla (10) ja apusuure kaavalla (9). Lisäksi maaperän lämpövastukseen vaikuttaa putkien keskipisteiden etäisyys toisistaan, jonka on arvioitu olevan 1,5 metriä. Lopuksi kaavan (11) avulla on laskettu putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus. Lämpövastusten avulla saadaan laskettua lämmönläpäisykerroimet. Putkien symmetrisyyden takia nämä voidaan yhdistää ja saadaan laskettua meno- ja paluuputkien lämmönläpäisykerroimien erotus. Tämä voidaan määrittää kaavan (12) avulla. Lämpöhäviö metriä kohden saadaan kaavalla (13). Maaperän lämpötilaksi on valittu lämpöhäviöiden laskemista varten 5 °C, sillä se on hyvä keskiarvo koko vuotta ajatellen. Kokonaislämpöhäviö on laskettu kertomalla lämpöhäviö metriä kohden Helsingin ja Loviisan etäisyydellä.

Työssä on arvioitu sopivia alkuarvoja, jotta laskeminen olisi mahdollista. Kun kaikki on laskettu Excelillä, alkuarvoja voi alkaa muuttamaan. Lopullisiin tuloksiin on siis laskettu kokonaislämpöteho, mistä on vähennetty kaukolämpöputkien lämpöhäviöt, ja kokonais-sähköteho, mistä on vähennetty veden siirtämiseen vaadittu pumppausteho. Alkuarvoja on muutettu siten, että kaukolämpöveden massavirta pysyisi suunnilleen samana, sillä todellisuudessa vesi virtaa samalla nopeudella ja tehon säätäminen tapahtuu voimalaitoksella säätämällä esimerkiksi höyryn väliottoa.



## 5. TULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY

### 5.1 Laskennan tulokset

Tulokset on laskettu kokonaan Excelin ja X Steam – funktioiden avulla. Aluksi täytyy selvittää väliottohöyryn paine 120 celsiusasteessa. Höyryn paineeksi saadaan Excelin avulla 1,99 baria. Höyryn paine laskee siis alle barin, joten voidaan olettaa, että höyry on kylläistä eli kosteutta ei tarvitse huomioida. Kylläisen höyryn entalpiaksi saadaan Excelin avulla 2706 kJ/kg. Koska paine säilyy samana lämmönvaihtimessa ja lämmönvaihtimen jälkeen veden voidaan olettaa olevan myös kylläistä, saadaan määritettyä tämän pisteen entalpia. Kylläisen veden entalpiaksi saadaan paineen funktiona 504 kJ/kg. Kun entalpiat ja massavirta on määritetty, kaavalla (2) saadaan lämmönvaihtimen lämpövirraksi 275,3 MJ/s. Yhden turbiinikokonaisuuden lämpöteho olisi siis noin 275 MW ja kokonaislämpöteho 1100 MW.

Seuraavia laskuja varten on laskettu entalpia-arvoja ennen ja jälkeen turbiinin. Näin saadaan tarkempia tuloksia ja Excelissä on tällöin enemmän arvoja, joita ei tarvitse muuttaa vaan ne ovat riippuvaisia muista arvoista. Taulukko 1 saadaan tarvittavat arvot entalpioiden määrittämistä varten. Ennen korkeapaineturbiinia höyryn paine on 44 baria ja kosteusprosentti höyrylle on 99,5 %. Näiden avulla saadaan tämän pisteen entalpiaksi 2790 kJ/kg. Korkeapaineturbiinin jälkeen höyryn paine on 3,1 baria ja höyryn kosteusprosentti 87 %. Näillä arvoilla höyryn entalpiaksi saadaan 2446 kJ/kg. Matalapaineturbiiniin menevän höyryn paine on 2,89 baria ja lämpötila 241 °C. Entalpiaksi saadaan näillä arvoilla 2950 kJ/kg. Lopuksi matalapaineturbiinin jälkeen höyryn paine on 0,032 baria ja kosteusprosentti 92,5 %. Näiden avulla saadaan höyryn entalpiaksi 2364 kJ/kg.

Sähkötehoa saadaan vähemmän lämmöntuotannon myötä. Jotta uusi sähköteho saadaan laskettua, määritetään ensin teoreettinen maksimi sähköteholle. Höyryn massavirta korkeapaineturbiinin läpi on Taulukko 1 mukaan 425 kg/s. Tällöin sähkötehoksi saadaan kaavan (2) avulla 146 MW. Matalapaineturbiinissa höyryn massavirta on 265 kg/s ja tällä saadaan sähkötehoksi 155 MW. Yhden turbiinikokonaisuuden teoreettinen sähköteho on siis noin 302 MW ja turbiinihyötysuhteeksi saadaan 84 %. Väliottoon menevä höyry on 125 kg/s ja loppu höyry saadaan vähentämällä väliotto koko höyryvirrasta, joka on 265 kg/s. Näillä arvoilla saadaan matalapaineturbiinin sähkötehoksi 113 MW. Yhden turbiinikokonaisuuden teoreettinen sähköteho olisi siis 259 MW. Jos otetaan aiemmin laskettu hyötysuhde huomioon, saadaan sähkötehoksi 219 MW. Vähentämällä tämä nykyisestä tehosta, saadaan sähkötehon vähennykseksi yhdessä turbiinikokonaisuudessa 36,1 MW eli yhteensä koko voimalassa 144,5 MW.

Seuraavaksi määritetään veden siirtämiseen vaadittu pumppausteho. Aluksi määritetään veden massavirta. Veden lämpötilaero on jo määritetty, lämmönvaihtimen lämpöteho on

laskettu aiemmin ja veden ominaislämpökapasiteetti on  $4,186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ . Näillä arvoilla kaukolämpöveden massavirraksi saadaan  $3758 \text{ kg/s}$ . Exceliä hyödyntämällä on laskettu veden tiheydeksi  $115$  asteen lämpötilassa  $947 \text{ kg/m}^3$ . Veden tilavuusvirta saadaan massavirran ja tiheyden avulla laskettua ja arvoksi saadaan  $3,97 \text{ m}^3/\text{s}$ . Putken poikkipinta-alaksi saadaan  $1,13 \text{ m}^2$  ja tämän sekä tilavuusvirran avulla saadaan virtausnopeudeksi  $3,51 \text{ m/s}$ . Seuraavaksi määritetään painehäviö putkessa. Putken karheuden voidaan olettaa olevan luokkaa  $0,04 \text{ mm}$  jolloin karheuden ja putkihalkaisijan suhteeksi saadaan noin  $0,00003$ . Reynoldsin luku voidaan laskea käyttämällä kaavaa (6). Viskositeetti riippuu veden lämpötilasta, ja tässä työssä kylläisen veden taulukkoa hyödyntämällä on saatu  $115$  asteisen veden kinemaattiseksi viskositeetiksi  $2,46\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$  ja  $45$  asteisen veden  $1,74\text{E-}05$ . Tällöin Reynoldsin luku menoveden tapauksessa on  $171166$  ja paluueden tapauksessa  $241931$ . Reynoldsin luku on molemmissa niin suuri, että voidaan päätellä virtauksen olevan turbulenttista. Reynoldsin luvun sekä putken karheuden ja putkihalkaisijan suhteen avulla voidaan Kuva 5 lukea kitkakerroin. Koska Reynoldsin luvut ovat samassa suuruusluokassa, voidaan riittävällä tarkkuudella määrittää kitkakertoimen arvoksi  $0,0175$ . Painehäviö saadaan nyt laskettua kaavalla (5), jolloin arvoksi saadaan pumppujen välimatkalla  $8,5$  baria. Painehäviö pysyy siis sallituissa rajoissa, koska painehäviö on alle  $1 \text{ bar/km}$ . Yhden pumpun vaatima teho saadaan laskettua kaavalla (4) ja tehoksi saadaan tällöin  $4,2 \text{ MW}$ . Yhteen suuntaan pumppuja oli  $8$ , joten kokonaisuudessaan  $16$  pumppua tarvitsee  $67,4 \text{ MW}$  tehoa pumpatakseen vaaditun määrän vettä sallitulla painehäviöllä.

Lopuksi lasketaan putkissa aiheutuvat lämpöhäviöt. Eristeen aiheuttama lämpövastus voidaan laskea kaavalla (7). Eristeen paksuus on tämän putken tapauksessa  $78 \text{ mm}$ , joten eristeen ulkohalkaisijaksi saadaan  $1,356$  metriä. Eriste on polyuretaania, jonka lämmönjohtavuus on noin  $0,03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . Eristeen lämpövastukseksi saadaan näiden arvojen avulla  $0,648 \text{ m}^\circ\text{C/W}$ . Maaperän lämpövastuksen määrittämistä varten täytyy laskea pari muutujaa ensin. Korjattu sijaintisyvyys saadaan laskettua todellisen sijaintisyvyyden, maaperän lämmönjohtavuuden ja ilman lämmönsiirtokertoimen avulla kaavalla (10) ja annetuilla arvoilla syvyydeksi saadaan  $1,65 \text{ m}$ . Apusuure lasketaan eristeen halkaisijoiden sekä lämmönjohtavuuksien avulla kaavalla (9) ja sen arvoksi saadaan  $8,15$ . Tällöin maaperän lämpövastukseksi saadaan  $0,142 \text{ m}^\circ\text{C/W}$  kaavan (8) avulla. Putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus saadaan kaavan (11) avulla. Putkien etäisyyden, korjatun putkisyvyyden sekä maan lämmönjohtavuuden avulla saadaan lämpövastukseksi  $0,070 \text{ m}^\circ\text{C/W}$ . Lasketuilla lämpövastuksilla erotukseksi saadaan  $1,163 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  kaavan (12) avulla. Tällöin saadaan määritettyä kaavalla (13) lämpöhäviöt metriä kohden ja arvoksi saadaan  $174 \text{ W/m}$ . Kokonaislämpöhäviöt koko matkalla ovat siis  $13,95 \text{ MW}$ .

Alla olevassa Taulukko 2 on havainnollistettu, miten tulokset muuttuvat, kun veden lämpötiloja ja höyryn massavirtaa säädetään. Aluksi on määritelty veden lämpötilat ja sen jälkeen säädetty massavirta sopivaksi niin, että painehäviöt pysyvät sallituissa rajoissa. Tällöin kaukolämpöveden massavirta pysyy likimain samana, jolloin arvojen säätö vastaa hyvin todellista tilannetta.

**Taulukko 2.** Lämpöteho, sähköteho, pumppausteho ja lämpöhäviöt eri massavirralla sekä veden meno- ja paluulämpötilalla

	A	B	C	D
Menolämpötila °C	115	75	75	115
Paluulämpötila °C	45	60	45	40
Välioton massavirta kg/s	125	28	58	145
Lämpöteho MW	1100	247	511	1277
Sähköteho MW	875	987	953	852
Pumppausteho MW	67	73	81	86
Lämpöhäviöt MW	14	12	10	13
Lämpö yhteensä MW	1087	235	501	1264
Sähkö yhteensä MW	808	915	872	767

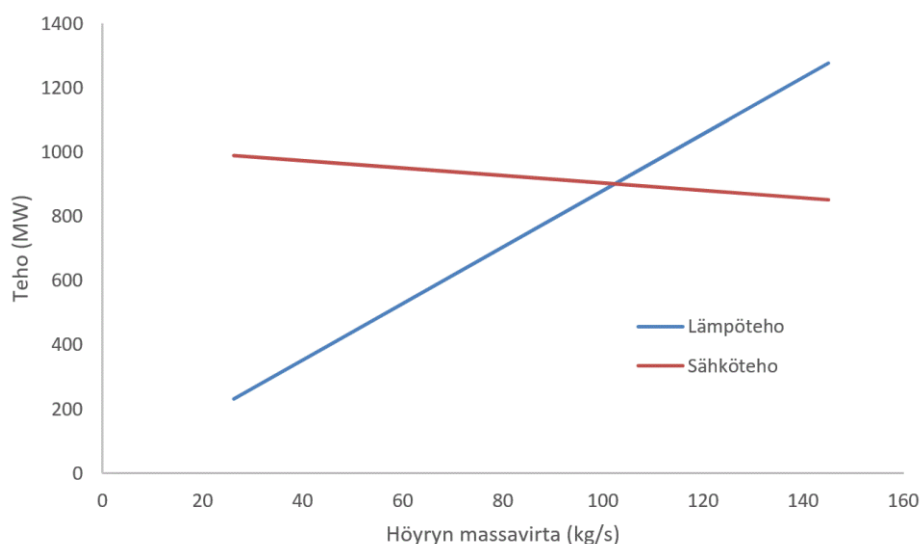
Tilanne A:n alkuarvot on määritelty ennen laskemista, jotta laskenta on voitu toteuttaa. Alkuarvot ovat osoittautuneet järkeviksi, sillä tulokset ovat oletuksien mukaisia. B tilanteessa on arvioitu, millaiset lämpötilat vedellä olisi kesäaikaan, kun menolämpötila on alhaisimmillaan ja paluulämpötila suhteellisen korkea lämmöntarpeen ollessa pieni. Laskuissa tuli ilmi, että lämpötilaeron täytyy olla vähintään 15 °C, jotta lämpöä olisi järkevä tuottaa, sillä tätä pienemmällä lämpötilaerolla höyryn massavirta on turhan pieni. B:n tilanteessa sähkötehoa saadaan noin 100 MW enemmän, mutta lämpötehoa vain 235 MW, joka vastaa hyvin kesän lämmöntarvetta. Koska kaukolämpöveden lämpötilaa aletaan nostamaan 65 asteesta vasta kun ulkolämpötila on alle 0 °C, veden menolämpötila ei nouse juurikaan syksyisin ja keväisin [4]. Paluulämpötila sen sijaan laskee ja tätä tilannetta kuvastaa taulukossa C:n arvot. Lämpöteho on noin puolet maksimista, mutta sähkötehoa saadaan jonkin verran enemmän. Tilanteessa D on pyritty maksimoimaan entisestään lämpötehoa. Lämpötilaero on siis kasvatettu niin suureksi kuin teoreettisesti mahdollista ja välioton massavirtaa on kasvatettu niin, että painehäviö pysyy juuri alle 1 bar/km. Teoreettinen maksimi siis lämpöteholle on 1264 MW, mutta samalla pumppausteho alkaa kasvamaan hyvin suureksi, minkä takia A kohdan tuloksia on enemmän käytetty tulosten tarkastelussa.

## 5.2 Tulosten käsittely

Nykyään Loviisan tuottama sähköteho on yhteensä noin 1020 MW. Jos voimalaitos muokattaisiin sähköä ja lämpöä tuottavaksi, lämpötehoksi saataisiin lämpöhäviöiden jälkeen 1087 MW. Lämpötehon tuotto kuitenkin vähentää sähkötehoa ja kaukolämpöveden pumppaaminen vie sähkötehoa, joten näiden jälkeen sähkötehoa saataisiin Loviisasta 808 MW. Helsingin vuosittaisen kaukolämmön kulutuksen avulla voidaan laskea, että keskimääräinen lämpötehon tarve vuoden ympäri on noin 810 MW. Tästä huomataan, että keuhkaisin lämpötehoa ei tarvitse tuottaa täydellä teholla ja talvisin kylmimpinä aikoina lämpötehoa tarvitaan muualtakin. Merkittävää on se, että Loviisan potentiaalinen lämpöteho

voisi teoriassa kattaa koko Helsingin lämmön tarpeen. Käytännössä ajallinen tehon vaihtelu estää tämän, mutta ainakin kivihiilen käyttö lämmöntuotannossa voitaisiin korvata kokonaan Loviisasta saatavalla lämmöllä.

Kun lämpöä tuotetaan vähemmän, eli vähennetään välioton höyryn massavirtaa, sähköä saadaan enemmän. Alla olevassa Kuva 11 on kuvattu sähkötehon ja lämpötehon suhde perustuen Taulukko 2 arvoihin.



**Kuva 11.** Sähkö- ja lämpöteho suhteessa höyryn välioton massavirtaan. Kuvaaja on tehty laskettujen tulosten perusteella.

Kuvasta huomataan, että sähköteho laskee lineaarisesti sen mukaan, mitä vähemmän höyryä ajetaan turbiinin loppuun asti ja lämpöteho taas nousee lineaarisesti höyryn massavirran kasvun myötä. Tämä siis tarkoittaa sitä, että kesäisin sähköä tuotettaisiin enemmän kuin talvella, mikä ei ole ihanteellista. Yhteistuotantolaitokset nykyään ovat lähinnä polttovoimalaitoksia, missä tehonsäätö tapahtuu säätämällä kuormaa eli polttoaineen määrää. Lisäksi monissa kaikki höyry ajetaan kaukolämmönvaihtimeen, jolloin sähköteho ja lämpöteho molemmat pienenevät osakuormalla. Ydinvoimalaa ei ole kannattavaa käyttää vajalla teholla, jolloin yhteistuotannon tapauksessa sähkö- ja lämpöteho käyttäytyisivät Kuva 11 mukaan. Sähkötehon vähennys on suurimmillaan 200 – 250 MW ja tämä sijoituisi talvelle, jolloin uupuva sähköteho täytyisi korvata jollain muulla. Määrä on niin suuri, että sitä ei oikeastaan voida tuottaa muulla kuin biopolttoaineella tai fossiilisilla polttoaineilla ja tämä heikentää kokonaishyötyä, mikä Loviisan voimalaitoksen muokkaamisella saavutettaisiin.

Energiantuotannon näkökulmasta kaukolämmön tuotanto Loviisan ydinvoimalassa olisi järkevää. Lämpöhäviöt matkalla ovat pienet suhteessa tuotettuun tehoon ja hyvin pienellä sähkötehon vähennyksellä saadaan suuri määrä lämpötehoa tuotettua. Kivihielestä voitaisiin tällöin luopua ja näin vähentää hiilidioksidipäästöjä. Todellisuudessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon monia muita asioita. 80 kilometriä pitkän putkilinjan rakentaminen

on suuri investointi ja laitoksen muokkaaminen on myös kallista, joten täytyisi selvittää, missä ajassa investointi maksaisi itsensä takaisin. Loviisan molemmat voimalaitokset ovat jo vanhoja, joten niille todennäköisesti pitäisi saada lisää käyttöaikaa ennen kuin kaukolämmön tuotantoa voitaisiin edes harkita. Muutoksen myötä Helsinki olisi hyvin riippuvainen Loviisan lämmöntuotannosta, jolloin yllättävät alasajot, varsinkin talviaikaan, aiheuttaisivat suuren lämpötehokadon kaukolämpöverkossa. Varalla täytyisi siis olla useita keski- tai huippukuormalaitoksia, jotta Loviisan tuottama lämpöteho voitaisiin tarvittaessa korvata. Nykyisin Helsingin energiantuotannosta vastaa lähes kokonaan Helen, joka on kaupungin omistuksessa oleva yhtiö. Tästä syystä on hyvin epätodennäköistä, että Helen antaisi Loviisan ydinvoimalan tuottaa kaukolämpöä Helsinkiin. Asenne ydinvoimaa kohtaan on edelleen negatiivinen tiedon puutteen ja ennakkoasenteiden vuoksi, mikä hidastaisi todennäköisesti kaukolämmön tuotantoa ydinvoimalla.

## 6. YHTEENVETO

Kaukolämpö on tehokas tapa lämmittää rakennuksia etenkin pohjoisessa. Suomessa onkin tästä syystä laaja kaukolämpöverkko ja erityisesti Helsingissä käytetään kaukolämpöä. Kaukolämpöä tuotetaan sekä erikseen että yhdessä sähkön kanssa ja erityisesti yhteistuotannosta ollaan yhä kiinnostuneempia. Yhteistuotannolla saadaan enemmän irti polttoaineesta jolloin hyötysuhde sähkön ja lämmön tuotannossa on parempi ja hiilidioksidipäästöt suhteessa tuotettuun lämpötehoon ovat pienemmät. Kaukolämmön tuotannosta syntyy suhteellisen paljon hiilidioksidipäästöjä, sillä monet laitokset käyttävät fossiilisia polttoaineita ja erityisesti kivihiiltä. Työssä tarkasteltiin Loviisan ydinvoimalan liittämistä Helsingin kaukolämpöverkkoon ja ajatus tähän lähti hiilidioksidipäästöjen vähentämisestä. Loviisasta olisi mahdollisesti saatavissa niin paljon lämpötehoa, että se riittäisi korvaamaan Helsingissä nykyään käytettävän kivihiilen. Tämän mahdollisuuden järjestyttävyyttä on tarkasteltu laskettavan lämpötehon, veden siirron pumppaustehon, sähkötehon vähennyksen sekä kaukolämpöputkissa tapahtuvien lämpöhäviöiden avulla.

Tarvittavien arvojen laskeminen vaatii teoriaa monesta aiheesta kuten höyrypiirin laske- misesta, lämpötekniikasta ja virtaustekniikasta. Loviisasta saatavaa lämpötehoa on las- kettu kaukolämpövaihtimen entalpian muutoksen ja höyryn massavirran avulla. Tätä on hyödynnetty veden massavirran määrittämisessä, joka tarvitaan siirtämään saatava läm- pöteho. Veden siirtämiseen tarvittava pumppausteho on laskettu veden virtausnopeutta ja kitkakerrointa hyödyntämällä. Lämpöhäviöiden määrittäminen vaatii usean kaavan käyt- tämistä, sillä laskemiseen täytyy ottaa useita asioita huomioon. Laskemalla lämpövastuk- sia, mitkä vaikuttavat lämpöhäviöihin, saadaan määritettyä lämpöhäviö metriä kohden, jolloin kokonaishäviön saa kertomalla saadun arvon Helsingin ja Loviisan etäisyydellä. Lämpöä ei voida tuottaa ilman sähkötehon häviöitä, joten nämä on laskettu samalla ta- valla kuin lämpövirta eli turbiinin entalpian muutoksen ja höyryn massavirran avulla.

Loviisan nykyinen sähköteho on yhteensä noin 1020 MW. Tässä työssä Loviisan lämpö- tehoksi laskettiin 1087 MW jolloin sähköä saataisiin 808 MW mikä on noin 200 MW nykyistä vähemmän. Kun alkuarvoja muutettiin, saatiin myös erilaisia tuloksia. Kauko- lämpöveden lämpötilaeron ollessa 15 astetta ja höyryn massavirran 28 kg/s, sähkötehoksi saatiin 915 MW ja lämpötehoksi 235 MW. Tuplasti isommalla lämpötilaerolla ja massa- virran ollessa 58 kg/s sähkötehoksi saatiin 872 MW ja lämpötehoksi 501 MW. Lopuksi vielä kasvatettiin maksimilämpötehoa niin paljon kuin mahdollista ja teoreettinen mak- simi on 1264 MW ja sähköteho tällöin on 767 MW. Lämpötehoa pystyy siis hyvin säätä- mään ja saadut arvot vastaavat hyvin Helsingin lämmöntarvetta. Saatava lämpöteho on niin suuri, että ainakin kivihiilen käyttö lämmöntuotannossa voitaisiin korvata kokonaan Loviisasta saatavalla kaukolämmöllä. Laskettujen arvojen perusteella kaukolämmön tuo- tanto Loviisassa olisi järkevää, mutta työstä on jätetty esimerkiksi kustannuslaskelmat

kokonaan pois. Kaukolämpöputken rakentaminen Helsingin ja Loviisan välille täytyisi olla kannattavaa, jotta lämmöntuotantoa voisi edes harkita. Lämmöntarpeeseen pitää myös pystyä vastaamaan vuoden ympäri ja myös silloin, kun tulee yllättäviä tehonalennuksia esimerkiksi vikojen takia. Ennakkoasenteet ydinvoimaa kohtaan eivät ole kovin positiivisia, joten kaukolämmön tuotantoa ydinvoimalla todennäköisesti ei tulla harkitsemaan vielä vuosiin.

## LÄHTEET

- [1] Energiateollisuus, Kaukolämpötilastot, Saatavissa: [https://energia.fi/ajankoh-taista\\_ja\\_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot](https://energia.fi/ajankoh-taista_ja_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot)
- [2] Energiateollisuus, Kaukolämpöverkot, Saatavissa: [https://energia.fi/perustie-toa\\_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot](https://energia.fi/perustie-toa_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot)
- [3] Energiateollisuus, Kaukolämmön tuotanto, Saatavissa: [https://energia.fi/perustie-toa\\_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon\\_tuotanto](https://energia.fi/perustie-toa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto)
- [4] Energiateollisuus, Kaukolämmön käsikirja, 2006
- [5] Energiateollisuus, Yhteistuotanto, Saatavissa: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/yhteistuotanto](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/yhteistuotanto)
- [6] Loviisan voimalaitos, voimalaitosesite, Saatavissa: [https://www.fortum.com/SiteCollectionDocuments/Energy%20production/106-voimalaitosesite\\_fin.pdf](https://www.fortum.com/SiteCollectionDocuments/Energy%20production/106-voimalaitosesite_fin.pdf).
- [7] Fortum, Voimalaitoksemme, Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/yhtiomme/energiantuotantomme/voimalaitoksemme/loviisan-voimalaitos/voimalaitoksen>
- [8] Helen, Energian alkuperä, Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritys/energia/energiantuotanto/energian-alkupera/>
- [9] N. Bergroth, 2010, Large-Scale Combined Heat and Power (CHP) Generation at Loviisa Nuclear Power Plant Unit 3
- [10] 2010, Nuclear Design Practices and the Case of Loviisa 3
- [11] P. Breeze, 2017, Combined Heat and Power
- [12] M. Kara, VTT Prosessit, 2004, Energia Suomessa: tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset
- [13] Energiateollisuus, Sähköntuotanto, Saatavissa: [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto)
- [14] M. Huhtinen, R. Korhonen, T. Pimiä, S. Urpalainen, 2008, Voimalaitostekniikka, 1st ed.
- [15] M. Leurent, F. Jasserand, G. Locatelli, J. Palm, M. Rämä, A. Trianni, 2017, Driving forces and obstacles to nuclear cogeneration in Europe: Lessons learnt from Finland, in: Energy Policy



- [16] R. Prince, 2012, Radiation Protection at Light Water Reactors
- [17] R.L. Koral, 2014, District heating, Access Science
- [18] Y.A. Çengel, J.M. Cimbala, 2014, Fluid mechanics : fundamentals and applications, 3rd ed.
- [19] J. Lienhard IV, J. Lienhard V, 2017, A Heat Transfer Textbook, 4th ed.
- [20] M. Välimäki, 2015, Kaukolämpö lämmittää Helsingin, Helen
- [21] K. Tamminen, 2015, Kaukolämpöverkko laajenee edelleen, Helen
- [22] S. Uusitalo, 2016, Uusi kaukolämpöennätys tehtiin Helsingissä, Helen
- [23] S. Salo, 2016, Predictive Demand-side Management in District Heating and Cooling Connected Buildings, Aalto University
- [24] Helen, Voimalaitokset, Saatavissa: <https://www.helen.fi/yrittys/energia/energian-tuotanto/voimalaitokset/>