

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

# Tuplavälitulistus – uusimmat höyryvoimalaitosten kiertoprosessit

Työn tarkastaja: Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Esa Vakkilainen ja Kari Luostarinen

Lappeenranta 19.09.2018

Sami Ketonen

## TIIVISTELMÄ

Sami Ketonen

Tuplavälitulistus – uusimmat höyryvoimalaitosten kiertoprosessit

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Esa Vakkilainen ja Kari Luostarinen

Kandidaatintyö 2018

32 sivua, 8 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: tuplavälitulistus, AD700, hyötysuhteen parantaminen

Tuplavälitulistuksellisessa voimalaitoksessa suoritetaan toinen välitulistus ennen matalapaine- tai välipaineturbiinia. Ylimääräinen kierros on investoinniltaan hyvin kallis, mutta sillä voidaan nostaa merkittävästi laitoksen hyötysuhdetta. Korkean investoinnin vuoksi tuplavälitulistus on kannattava vain suuren kokoluokan voimalaitoksissa. Maailmalla on käynnissä tutkimustyötä liittyen superkriittisiin voimalaitoksiin, jotka käyttävät tuplavälitulistusta. Näissä laitoksissa on tarkoitus nostaa höyryn lämpötila 700 °C:een ja paine 35 MPa:in. Tällöin ongelmana on voimalaitoskomponenttien materiaalit ja niiden kestävyys näin suurissa lämpötiloissa. Tutkimustyön pääkohteena on kehittää materiaalia, joka kestäisi kyseiset parametrit, olisi helposti muokattavissa sekä pitäisi investoinnit kurissa.

Työssä vertaillaan neljän erityyppisen voimalaitoksen investointeja ja kannattavuutta. Yhdessä laitoksista on tavallinen välitulistus ja kolmessa tuplavälitulistus. 1000 MW kokoluokassa kallein voimalaitos tuottaisi sähköä alle 31 €/MWh kun halvimmassa yhden välitulistuksen laitoksessa sähkön tuotantohinta olisi melkein 31,5 €/MWh. Lisäksi laskelmat osoittavat, ettei tuplavälitulistuksellista laitosta kannata rakentaa, jos sen kapasiteetti ei ole yli 700 MW.

Maailmalla nykypäiväistä tuplavälitulistusteknologiaa löytyy lähinnä Kiinasta ja Tanskasta. Kiinassa tuplavälitulistus on kasvava trendi Kiinan suurten hiilivarantojen ja suuri kapasiteettisten laitosten vuoksi. Muualla maailmassa tämän tyyppiset laitokset on rakennettu kymmeniä vuosia sitten, eikä niissä enää ole nykyaikaista teknologiaa.

# Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä</b>	<b>1</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>3</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>4</b>
<b>2 Toiminta ja rakenne</b>	<b>5</b>
2.1 Rakenne .....	7
2.1.1 Välipaineturbiini .....	8
2.1.2 Syöttöveden esilämmittimet.....	8
2.2 AD700- projekti .....	10
2.2.1 Komponenttien materiaalit.....	11
2.2.2 Korkeat lämpötilat.....	11
<b>3 Taloudelliset hyödyt</b>	<b>13</b>
3.1 Sähkön tuotantokustannus .....	13
3.2 Voimalaitoksen kannattavuus.....	18
3.3 Hiilidioksidivero.....	20
<b>4 Tuplavälitulistuslaitoksia maailmalla</b>	<b>21</b>
4.1 Aasia.....	21
4.2 Eurooppa .....	22
4.3 Amerikka .....	23
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>26</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>28</b>
<b>Liite I.</b>	

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

a	annuiteettitekijä	
C	vuosittainen kustannus	[M€]
H	huipunkäyttöaika	[h]
I	investointi	[M€]
p	hinta	[€/MWh]
p <sub>e</sub>	sähkön myyntihinta	[M€/h]
P	teho	[MW]
q <sub>m</sub>	massavirta	[kg/s]
q	lämpöarvo	[MWh/kg]

### Kreikkalaiset aakkoset

η	hyötysuhde	[%]
---	------------	-----

### Alaindeksit

e	Sähkö
F	Polttoaine
I	Investointi
OM	Huolto ja kunnossapito
tot	Kokonaisarvo

## 1 JOHDANTO

Kandidaatintyössä tutustutaan tuplavälitulistuksen toimintaan ja rakenteeseen, tutkitaan sen kannattavuutta erilaisissa ratkaisuissa sekä käydään läpi missä päin maailmaa tuplavälitulistusta on käytössä. Tuplavälitulistuksen karkeana ideana on lisätä välitulistusvoimalaitoksen höyrykiertoon ja tämän avulla nostaa tuorehöyryn parametrejä. Muutos vaatii suuria investointeja ja vahvempia materiaaleja korkeampien parametrien kestämiseksi, mutta hyötysuhteen kasvun vuoksi varsinkin isommissa laitoksissa investoinnit saadaan helposti kuitattua.

Korkeampi lämpötila vaikuttaa turbiinin lisäksi myös muihin laitoskomponentteihin. Työssä käydään lyhyesti läpi erilaisia sovelluksia suurempien lämpötilojen hallitsemiseksi. Esimerkkinä tähän on regeneraatioturbiini, joka sijoitetaan korkeapaineturbiinin väliin lauhduttamaan esilämmittimille kohdistuvaa lämpöä.

Talousoviossa lasketaan eri voimalaitosvaihtoehdoille kannattavuuslaskelmia. Lisäksi kyseisessä osiossa selvitetään erityyppisten tuplavälitulistuslaitosten minimiteho, jolla tuplavälitulistus olisi kannattava. Laskennassa käytetään erilaisten tuplavälitulistuslaitosten pohjaratkaisuja, joita vertaillaan yhden välitulistuksen voimalaitokseen.

Viimeisessä kappaleessa käydään pikaisesti läpi erilaisia tuplavälitulistuslaitoksia eripuolilla maailmaa. Kiristyvän energiapolitiikan ja hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteiden vuoksi tuplavälitulistusteknologia on ottanut tärkeän aseman Kiinan energiantuotannossa varsinkin hiiltä poltettaessa. Kiinan suurien hiilivarantojen vuoksi pyritään kasvattamaan laitosten hyötysuhteita hiilen syrjäyttämisen sijasta.

## 2 TOIMINTA JA RAKENNE

Kasvatavat hiilidioksidipäästöt ja muut tämänhetkiset ympäristöongelmat ovat loistava syy kehittää voimalaitostekniikkaa. Energiantuotanto on yksi suurimpia hiilidioksidipäästöjen aiheuttajia ja täten myös tärkeässä asemassa hiilidioksidipäästöjen alentamisessa. Energiantuotannossa päästöihin voidaan vaikuttaa usealla tavalla kuten siirtymällä uusiutuviin polttoaineisiin tai ydinvoimaan, tehostamalla teollista energian käyttöä, parantamalla voimalaitosten hyötysuhdetta ja niin edelleen. Tässä työssä keskitytään lähinnä voimalaitosten höyryprosessin hyötysuhteen nostamiseen. (Huhtinen et al. 2016, 289.)

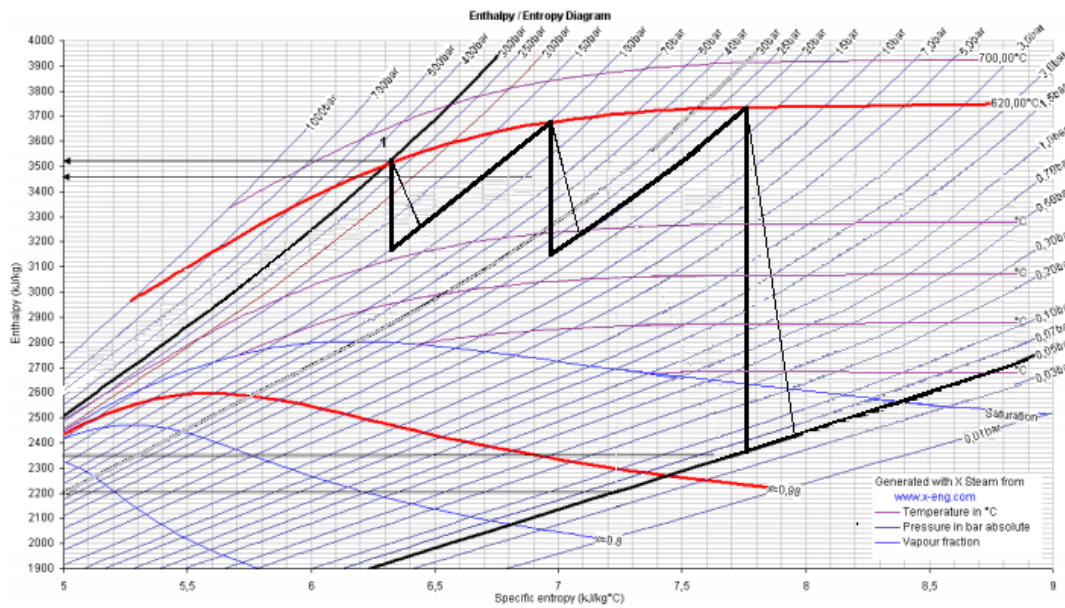
Höyryprosessissa kattilassa polttoaineen sisältämä energia poltetaan lämpöenergiaksi. Lämpöenergian siirretään veteen, joka lämpenee prosessihöyryksi. Höyry syötetään turbiiniin, jossa höyryn sisältämä energia muunnetaan liike-energiaksi pyörittämään turbiinia ja siitä edelleen sähköksi (Hytti 2015, 5). Höyryprosessin tehokkuutta voidaan parantaa muun muassa lisäämällä syöttöveden ja palamisilman esilämmittimiä, kasvattamalla höyryn maksimilämpötilaa tai pienentämällä höyryn lämpötilaa turbiinin ulostulossa. (Nicol 2015, 12.)

Lisäämällä välitulistus voimalaitoksen tavalliseen höyrynkiertoon saadaan nostettua höyryn lämpötilaa ja painetta turbiinien sisääntulossa ja täten kasvattaa laitoksen hyötysuhdetta ja lisäksi se mahdollistaa useampien esilämmittimien käytön. Välitulistuksessa voimalaitokselle rakennetaan höyrylle lisäkierros, jossa höyry kulkeutuu ensimmäisen turbiiniportaan läpi takaisin kattilalle tulistettavaksi, jolloin höyryn lämpötila saadaan takaisin alkuperäiseen lämpötilaan. Ylimääräisen kierron vuoksi korkeapaineturbiinissa voidaan tuottaa sähköä ilman suurempia lämpöhäviöitä. Välitulistuskierron lisääminen höyrypiiriin kasvattaa laitoksen prosessihyötysuhdetta noin 3,5-4,5 %. Usein laitoksissa on vain yksi välitulistus tai ei välitulistusta ollenkaan riippuen laitoksen kapasiteetista. Näiden lisäksi on olemassa myös tuplavälitulistus joka on hieman harvinaisempi vaihtoehto laitoksen höyrykierrossa. (Huhtinen et al. 2016, 53-54.)

Voimalaitoksessa, jossa on käytössä kaksi peräkkäistä välitulistusta, on korkea- ja matalapaineturbiinin lisäksi myös välipaineturbiini. Turbiinikokonaisuus vaatii ylimääräisen

portaan tai portaita, jotta kaikki hyöty tuplavälitulistuksesta saataisiin irti. Tuplavälitulistus nykYTEknologialla parantaa laitoksen sähköntuottohyötysuhdetta noin 1-2 % (Nicol 2015, 15). Kuitenkin ympäri maailmaa kuten Kiinassa, Japanissa, Saksassa ja Amerikassa on kehitteillä AD700 niminen projekti, jossa tuorehöyryn lämpötila ja paine nostettaisiin aina 700 °C ja 35 MPa:in. Näillä arvoilla voimalaitos voisi saavuttaa yli 50 % hyötysuhteen. Projektin ongelmana on korkea lämpötila ja sitä kestävä materiaalin löytäminen. (Siemens AG 2014.)

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertainen tuplavälitulistusprosessi, jonka luomisessa on käytetty apuna Voimalaitosoppi-kirjan sivun 55 h, s- piirrosmallia välitulistuksellisesta voimalaitoksesta sekä suunnitteilla olevien tuplavälitulistuksellisten laitosten parametrejä. Kuvassa käytetään tuorehöyryn lämpötilana 620 °C ja paineena 30 MPa. Välitulistuksissa höyry tulistetaan aina takaisin 620 °C. Korkeapaineturbiinissa höyry paisuu 10 MPa paineeseen ja välipaineturbiinin jälkeen 2 MPa paineeseen. Välitulistuksen ansiosta paisunta siirtyy enemmän oikealle, jolloin höyryn kosteuspitoisuus ja täten myös korroosioriski pienenee. Sallittu alue höyryn kosteudelle on yleisesti yli 88 %, mikä on kuvassa alempi punainen viiva. Kuiva höyry matalapaineturbiinin loppuosassa mahdollistaa tuorehöyryn paineen korottamisen, mikä johtaa suurempaan keskimääräiseen lämmöntuontilämpötilaan ja termiseen hyötysuhteeseen. (Huhtinen et al. 2016, 54-55.)



Kuva 1 Tuorehöyryn muutokset eri turbiiniportaissa esitettynä h, s - piirroksessa

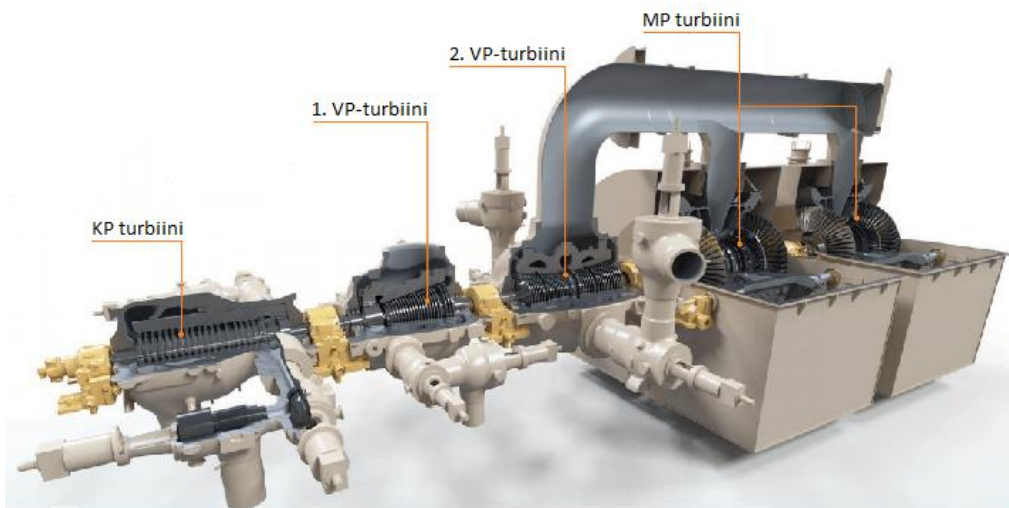
## 2.1 Rakenne

Tavallisesti tuplavälitulistuksellinen voimalaitos koostuu korkeapaine-, välipaine- ja matalapaineturbiineista. Tavalliseen laitokseen verrattuna erona on välipaineturbiini. Yleisimmässä mallissa tulistettu höyry tulee ensimmäisenä korkeapaineturbiinille, minkä jälkeen höyry uudelleen tulistetaan ennen välipaineturbiinille menoa. Välipaineturbiineja on yleensä kaksi ja toinen välitulistuksista tapahtuu niiden välillä. Sen jälkeen höyry jatkaa matalapaineturbiinille ilman välitulistusta, kuten kuvasta 2 voidaan todeta. Joissakin tapauksissa prosessissa on vain yksi välipaineturbiini, jolloin toinen välitulistus on ennen matalapaineturbiinia. (Siemens AG 2014.)



### 2.1.1 Välipaineturbiini

Välipaineturbiini on vähemmän käytetty komponentti voimalaitoksissa ja se yleensä tulee välitulistuksen kanssa suuremmissa voimalaitoksissa. Turbiinin fyysinen koko vastaa lähemmin korkeapaineturbiinia kuin matalapaineturbiinia. Välipaineturbiinia tarvitaan välitulistushöyryn korkean paineen vuoksi. Joissakin tapauksissa voidaan käyttää myös useampaa korkeapaineturbiinia. (Siemens AG 2014.)

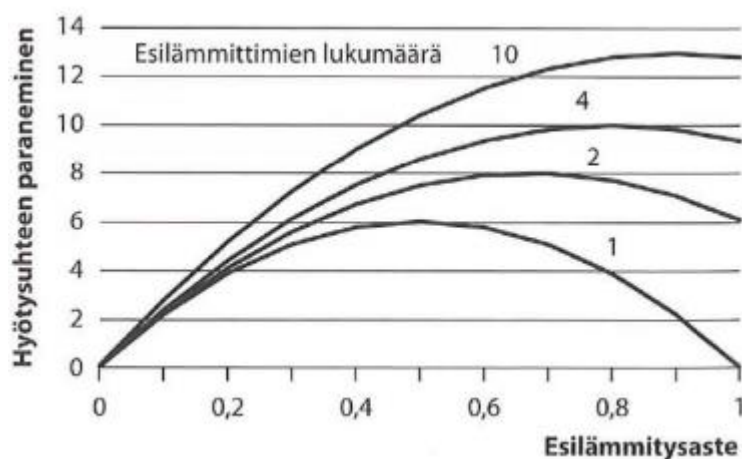


**Kuva 2** Turbiinin yleinen rakenne tuplavälitulistuksellisessa voimalaitoksessa (Siemens AG 2014)

### 2.1.2 Syöttöveden esilämmittimet

Useampi turbiiniporras ja korkeammat höyryn parametrit mahdollistavat enemmän syöttöveden esilämmittimiä, mikä taas mahdollistaa vieläkin paremman hyötysuhteen. Kuvasta 3 nähdään syöttöveden esilämmittimien lukumäärän vaikutus laitoksen hyötysuhteeseen. Esilämmitysaste tarkoittaa syöttöveden lämpötilaa verrattuna veden höyrystyslämpötilaan eli nolla tarkoittaa, ettei vettä esilämmitetä ja yksi, että se esilämmitetään höyrystyslämpötilaan. (Huhtinen et al. 2016, 51-53.)

Esilämmittimien lukumäärän optimoiminen on tärkeä osa voimalaitoksen hyötysuhdetta parantaessa. Esilämmitykseen käytetty lämpö otetaan väliottoina turbiinilta ja mitä korkeampi lämmitysaste sitä suurempi höyryvirta. Korkeampi höyryvirta tarkoittaa välioton sijoittamista suurempaan paineeseen. Tällöin turbiinin sisällä tapahtuvan höyrymuutoksen entalpiaero pienenee, mikä johtaa huonompaan prosessihyötysuhteeseen. Jos syöttöveden lämmitys jää liian alhaiseksi, turbiinin sisäinen höyrymuutoksen entalpiaero ja höyryn massavirta kasvaa. Kuitenkin syöttöveden lämpötilan laskiessa kattilan täytyy tehdä enemmän työtä syöttöveden höyrystämiseksi, minkä takia kokonaisuudessa hyötysuhde laskee. Kuvasta 3 nähdään, että hyötysuhdetta saadaan parhaimmillaan kasvatettua noin 13 %. Tämän jälkeen lisäesilämmittimet alkavat olla kohtalaisen merkityksettömiä. Esilämmittimien optimointiin vaikuttavat myös niihin käytettävät investoinnit. Yksinkertaisesti sanottuna lisäesilämmittimen tuoma hyöty polttoaineen säästöissä pitää olla suurempi kuin esilämmittimeen käytetty investointi sekä huolto- ja kunnossapitokustannukset. (Huhtinen et al. 2016, 52-53.)



**Kuva 3** Esilämmittimien määrän vaikutus hyötysuhteeseen (Huhtinen et al. 2016, 52)

## 2.2 AD700- projekti

Laitosten tehokkuuden kehittämiseksi maailmalla on aloitettu kehittää seuraavan sukupolven superkriittistä voimalaitosteknologiaa eli niin kutsuttua AD700- projektia. Tämä on mahdollistanut jatkuvan kehityksen paineen ja lämpötilan kohottamisessa. Verrattuna 25 Mpa/600 °C yksikköihin uudet 35 MPa/700 °C ylikriittiset laitokset voivat kasvattaa laitoksen hyötysuhdetta noin 8 % ja laskea päästöjä jopa 6,5 %. Näillä arvoilla saadaan aikaan suuri hyöty sekä talous- että ympäristösektorilla. Kuitenkin tämänhetkisissä laitoskomponenteissa materiaalien lämpöraja tulee vastaan jo 625 °C:ssa, eikä täten pysty saavuttamaan korkeamman lämpötilan tuomia etuja. Painetta voitaisiin nostaa, mutta ilman lämpötilan nousua höyryn kosteus kasvaisi liian korkeaksi matalapaineturbiinin loppuosassa. Ilman uutta materiaalia korkeaa painetta saadaan hallittua esimerkiksi paksummalla putkenseinämällä, mikä ikävä kyllä kasvattaisi laitoksen investointeja. Liian korkean paineen takia talvella välitulistuksen käyttö voi johtaa höyryn liialliseen kosteuteen, vaikka kesällä arvot olisivatkin hyviä. Kuitenkin tuplavälitulistus yleisesti vähentää höyryn kosteutta ja pienentää korroosioriskiä loppupään lavoissa. (Niu et al. 2015, 2200.)

AD700- projektin tavoitteena on kasvattaa laitoksen sähköntuottohyötysuhde vähintään 50 %:iin. Projektin kimpussa on tällä hetkellä pääosin Kiina, Japani, USA ja Euroopasta muun muassa Saksa. Jotta hyötysuhde saataisiin korotettua 50 %:iin, on ensimmäiseksi parannettava höyryn parametreja. Tulistetun höyryn lämpötila on tarkoitus nostaa 700 °C ja paine 35 MPa:in. Ongelmana projektissa on materiaali, joka kestäisi näin suuria lämpötiloja eri komponenteille. Paremmilla materiaaleilla komponentit saataisiin tehokkaammaksi ja mikä tärkeintä halvemmiksi. AD700- projektin olisi tarkoitus valmistua vuoteen 2020 mennessä ja ensimmäisen AD700 tuplavälitulistuslaitoksen olisi määrä valmistua 2020- luvulla. (Si et al. 2017, 155.)

### 2.2.1 Komponenttien materiaalit

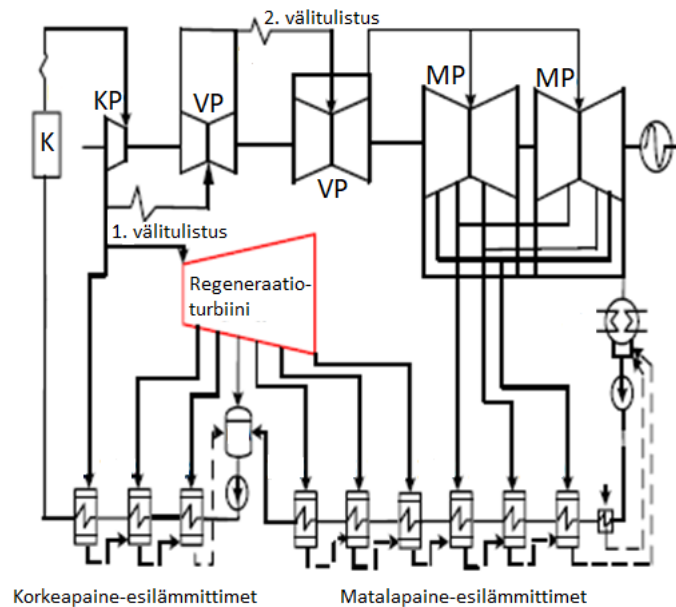
Suurin ongelma tuplavälitulistuksen kehittämisessä on tarpeeksi lämpötilaa kestävien materiaalien löytäminen ilman, että investoinnit nousevat liian korkeiksi. Tutkimukset näyttävät, että esimerkiksi kaasuturbiineihin kehitetyt nikkelpohjaiset seokset ovat hyviä ehdokkaita tarvittaviksi seoksiksi. Näiden seosten muunnosten on ajateltu optimoivan mikrostruktuuria, hapettumisen vastustamista ja suurien komponenttien rakennus- ja muokkausongelmia. (Ennis 2014,147.)

Voimalaitosten kriittisiltä komponenteilta vaaditaan pitkää käyttöikää jatkuvan rasituksen alaisina korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Kriittisimmät komponentit ovat taotut roottorit ja laikat, valetut tai taotut turbiinilavat, kylmähaaran ja pursotetut putket sekä valut ja pultitukset. Austeniittiset teräkset kestävät ainoastaan reiluun 600 °C:een, minkä jälkeen tilalle tulee nikkelpohjaiset terässeokset. Nikkelpohjaiset terässeokset saadaan kestämaan korkeitakin lämpötiloja, mutta ongelmana on niiden muokattavuus ja korkea hinta. (Ennis 2014, 154.)

### 2.2.2 Korkeat lämpötilat

Superkriittiset voimalaitokset tarkoittavat korkeampia lämpötiloja ja tämä aiheuttaa suuria lämpötilamuutoksia höyryn välitoissa. Suuret lämpöerot välitoissa taas heikentävät lämmönvaihtimien termistä suorituskykyä. Ongelmaa voidaan parantaa esimerkiksi lisäämällä välilottoon regeneraatioturbiini tai sitten ulkoisia höyryn jäähdyttimiä. Ulkoisilla höyryn jäähdyttimillä voidaan optimoida oikea lämpötila esilämmittimiin. Höyryn jäähdyttäminen on halvempi ratkaisu, mutta siitä aiheutuu hukkalämpöä. Ulkoiset höyrynjäähdyttimet parantavat hyötysuhdetta 0,16 % ja tuovat noin kahden miljoonan USA:n dollarin lisäinvestoinnin (Zhou 2014, 1358). Regeneraatioturbiini taas on tehokas mutta kallis ratkaisu. (Gang et al. 2015, 863-865.)

Kuten kuvasta 4 voidaan todeta, että regeneraatioturbiini on sijoitettu korkeapaineturbiinin väliottoon laskemaan esilämmittimille 2-7 kohdistuvaa lämpöä. Regeneraatioturbiinin lisäys tässä tapauksessa nostaa sähköntuotantohyötysuhdetta 0,67 %. Syynä tähän on ylikuumenemisasteen alentuminen ja käyttöasteen kohentuminen väliottohöyryssä. Esilämmitysaste hieman laskee verrattuna tavalliseen tapaukseen, mutta lämpöä ei mene hukkaan samalla tavalla kuin jäähdyttimissä. Regeneraatioturbiini käyttää lämmön hyväksi ja tuottaa näin lisäsähköä. (Gang et al. 2015, 867-869.) Investointi regeneraatioturbiinille on noin kuusi miljoonaa USA:n dollaria (Zhou 2014, 1358).



**Kuva 4** Prosessipiiri regeneraatioturbiinilla (Gang et al. 2015, 867)

### 3 TALOUDELLISET HYÖDYT

Tässä kappaleessa syvennyttään kolmen erilaisen tuplavälitulistuksellisen voimalaitostapauksen taloudelliseen puoleen sekä siihen, miten ne eroavat voimalaitoksesta, jossa on ainoastaan yksi välitulistus. Laskelmat ja arvot on arvioitu 1000 MW sähköä tuottavalle kivihiiivoimalaitokselle. Seuraavassa kappaleessa kaikille neljälle laitostapaukselle lasketaan sähkön tuotantokustannukset.

#### 3.1 Sähkön tuotantokustannus

Alkuarvot eri laitostyypeille on annettu taulukossa 1. Annetut investoinnit on muutettu dollareista suoraan euroiksi, koska sillä ei ole suurta merkityä laitosten vertailussa ja yksittäisen laitoksen katsastuksessa suurempi investointi toimii varmuuskertoimena. Näiden arvojen lisäksi polttoaineena käytetään kivihiiiltä, huipunkäyttöaikana käytetään 8000 tuntia ja laitoksen käyttöikä on 30 vuotta.

**Taulukko 1** Tapausten lähtöarvot (Zhou et al. 2016, 654-648)

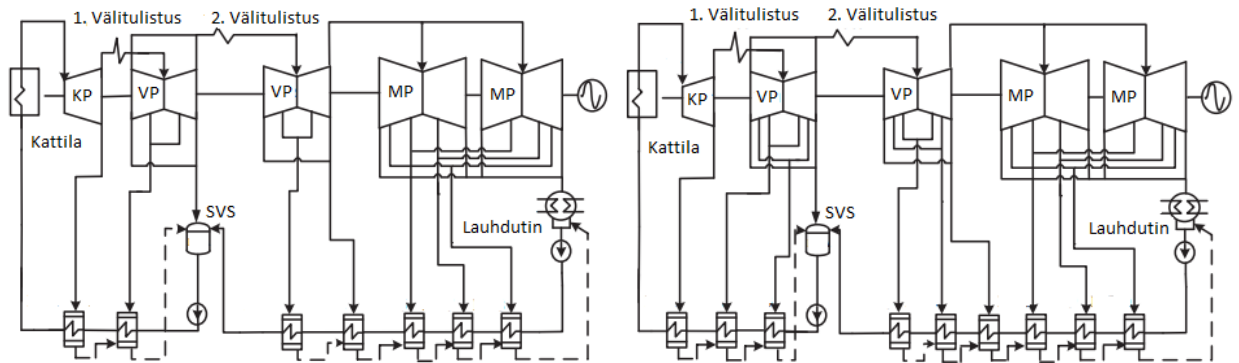
		Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4
Teho	[MW]	1000	1000	1000	1000
Sähköntuottohyötysuhde		0,45	0,4675	0,4689	0,4724
Investointi	[M €]	700	742	742	744,22

Tapaus 1 on perinteinen voimalaitos yhdellä välitulistuksella. Voimalaitoksen hyötysuhteeksi on valittu 0,45, joka on hyvä hyötysuhde tavalliselle voimalaitokselle. Valinta perustuu tapauksen 2 hyötysuhteeseen, jonka hyötysuhde on sanottu olevan 1-2 prosenttiyksikköä parempi kuin samankokoisessa yhden välitulistuksen omaavassa laitoksessa. (Zhou et al. 2016, 654.)

Tapaus 2 on yksinkertainen tuplavälitulistuslaitos, jossa kattilan jälkeen on yksi korkeapaine-, kaksi välipaine- ja kaksi matalapaineturbiinia. Välitulistukset tapahtuvat korkeapaineturbiinin ja välipaineturbiinien välillä kuten kuvasta 5 käy ilmi.

Tapaus 3 on sama kuin tapaus 2 mutta optimoiduilla höyryn paineilla.

Tapauksessa 4 taas on optimoitu esilämmittimien lukumäärä. Kyseisessä tapauksessa esilämmittimiä on kymmenen kappaletta, kun taas aikaisemmissa tapauksissa niitä on ollut kahdeksan. (Zhou et al. 2016, 655-657.)



**Kuva 5** Tapausten 2 ja 4 voimalaitosprosessit (Zhou et al. 2016, 653, 656)

Seuraavaksi lasketaan sähkön tarvittava myyntihinta alla olevalla yhtälöllä. Laskettaessa käytetään tapauksen 4 arvoja ja oletuksia. Muiden tapauksien tulokset nähdään kappaleen lopussa taulukosta 2.

$$p_e = C_{\text{tot}}/H \quad (1)$$

missä

$C_{\text{tot}}$	Vuosittaiset menot	[M€]
H	Huipunkäyttöaika	[h]

Vuosittaiset menot koostuvat kolmesta eri kategoriasta.

$$C_{\text{tot}} = C_F + C_I + C_{\text{OM}} \quad (2)$$

missä

$C_F$	Vuosittainen polttoainekustannus	[M€]
$C_I$	Vuosittainen investoinnin takaisinmaksu	[M€]
$C_{\text{OM}}$	Vuosittaiset huolto- ja kunnossapitomaksut	[M€]

Näistä ensimmäiseksi voidaan laskea vuosittaiset polttoainekustannukset.

$$C_F = 3600 \cdot q_{m,\text{hiili}} \cdot q_{\text{hiili}} \cdot p_{\text{hiili}} \cdot H \quad (3)$$

missä

$q_m$	Polttoaineen massavirta	[kg/s]
$q$	Alempi lämpöarvo	[MWh/kg]
$p$	Polttoaineen hinta	[€/MWh]

Tähän yhtälöön kuitenkin ratkaistaan ensiksi polttoaineen massavirta, mihin tarvitaan kattilan teho.

$$q_{m,\text{hiili}} = \frac{P_{\text{kattila}}}{q_{\text{hiili}} \cdot 3600} \quad (4)$$

missä

$P$	Teho	[MW]
-----	------	------

$$P_{\text{kattila}} = \frac{P_e}{\eta_e} \quad (5)$$

missä

$\eta$	Hyötysuhde
--------	------------

Kattilan teho saadaan yksinkertaisesti jakamalla laitoksen teho sähköntuottohyötysuhteella.

$$P_{\text{kattila}} = \frac{1000 \text{ MW}}{0,4724} = 2116,9 \text{ MW}$$

Ja tällöin polttoaineen massavirraksi saadaan



$$q_{m,\text{hiili}} = \frac{2116,9 \text{ MW}}{0,007 \frac{\text{MWh}}{\text{kg}} \cdot 3600 \text{ s}} = 83,97 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Hiilen alempi lämpöarvo on 0,007 MWh/kg ja hinta 10 €/MWh, joten vuosittaiseksi polttoainekustannukseksi saadaan (Alakangas 2000, 9).

$$C_F = 3600 \cdot 83,97 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,007 \frac{\text{MWh}}{\text{kg}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 8000 \text{ h} = 169 \text{ M€}$$

Investointi laitokselle, jossa on vain yksi välitulistus, on noin 700 M€. Voimalaitos kahdella välitulistuksella on suunnilleen 6 % kalliimpi, mikä tarkoittaa noin 742 M€ investointia. Tapauksissa 2 ja 3 voidaan olettaa yhtä suuret investoinnit, sillä paineiden optimointi ei vaadi merkittäviä rakenteellisia muutoksia. Tapauksessa 4 rakenteelliset muutokset lisäävät laitoksen hintaa noin 2,22 M€:lla. Summa sisältää esilämmittimet sekä niiden asennuksen ja suunnittelun. (Zhou et al. 2016, 658.)

$$C_I = I \cdot a \tag{6}$$

missä

I	Investointi	[M€]
a	Annuiteettitekijä	

Annuiteettitekijä on laskettu 30 vuoden takaisinmaksuajalla sekä 5 % korolla

$$a = 0,0651$$

joten

$$C_I = 744,22 \text{ M€} \cdot 0,0651 = 48,4 \text{ M€}$$

Viimeiseksi ratkaistaan laitoksen huolto ja kunnossapitokustannukset. Huolto- ja kunnossapitokustannukset ovat noin 4 % kokonaisinvestoinnista (Zhou et al. 2016, 658).

$$C_{OM} = 0,04 \cdot I = 0,04 \cdot 744,22 \text{ M€} = 29,77 \text{ M€}$$

Kaikki kustannukset tunnetaan, joten seuraavaksi voidaan laskea laitoksen vuosittainen kokonaiskustannus yhtälöllä 2

$$C_{tot} = 169 \text{ M€} + 48,4 \text{ M€} + 29,77 \text{ M€} = 247,5 \text{ M€}$$

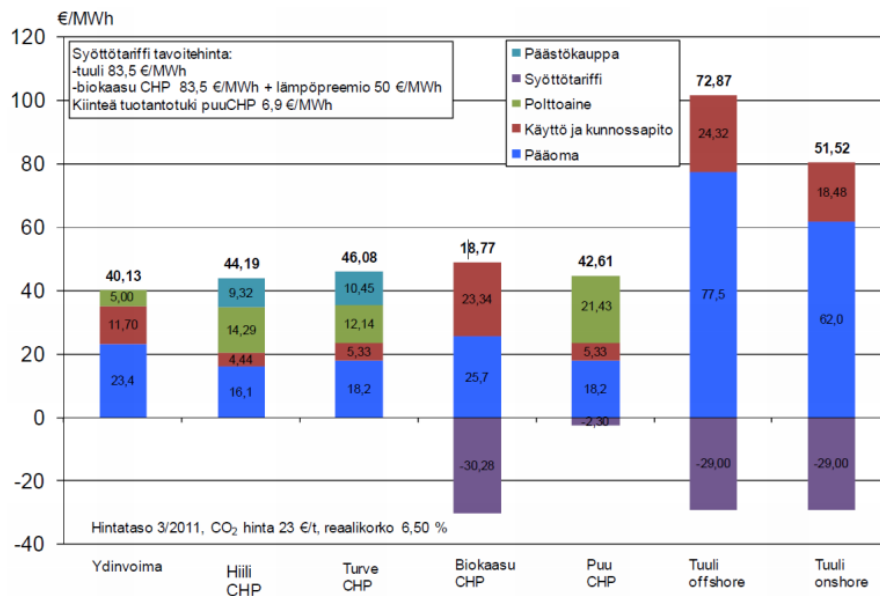
ja viimeiseksi vain jaetaan kokonaiskustannus huipunkäyttöajalla.

$$p_e = \frac{247,5 \text{ M€}}{8000 \text{ h}} = 30,94 \text{ €/MWh}$$

Kuvan 6 mukaan hiilen sähköntuotantohinta on vuonna 2011 ollut keskimäärin 44,19 €/MWh. Kuitenkin laskuissa ei ole otettuna huomioon päästökauppaa, joka hiilellä muodostaa lähes neljänneksen sähköntuotantokustannuksesta. 2011 päästökauppa lisäsi hintaa 9,32 €/MWh. Tällöin hinta ilman päästökauppaa vuonna 2011 oli 34,87 €/MWh. Tämä tarkoittaa, että tuplavälitulislaitos olisi taloudellisesti kannattava kaikilla tapauksilla ilman suurempia ongelmia. Ongelmana kuitenkin on pitkäkestoisen sijoituksen riskit ja jatkuvasti muuttuva sähköntarve ja hinta. Seuraavassa kappaleessa tutkitaan, minkä kokoisen laitoksen rakentaminen on kannattavaa. (Vakkilainen et al. 2011, 23.)

**Taulukko 2** Kaikkien tapauksien tärkeimmät arvot

		Tapaus 1	Tapaus 2	Tapaus 3	Tapaus 4
Kattila	[MW]	2222,2	2139,0	2132,7	2116,9
Polttoaineen massavirta	[kg/s]	88,1	84,8	84,6	84,0
Vuotuinen tasaerä	[M €]	45,5	48,3	48,3	48,4
Vuotuinen polttoainekustannus	[M €]	177,8	171,1	170,6	169,3
Huolto ja kunnossapitokustannukset	[M €]	28,0	29,7	29,7	29,8
Vuotuiset Kokonaiskustannukset	[M €]	251,3	249,1	248,6	247,5
Sähkön tuotantohinta	[€/MWh]	31,41	31,13	31,07	30,94

**Kuva 6** Sähkön tuotantohinnat (Vakkilainen et al. 2011, 23)

### 3.2 Voimalaitoksen kannattavuus

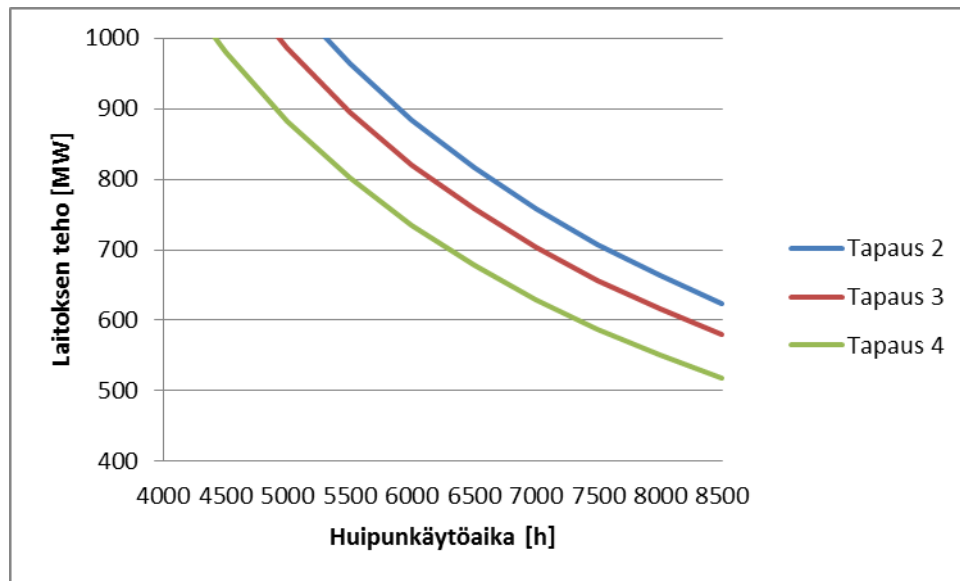
Seuraavaksi tutkitaan, milloin tuplavälitulistuksellinen laitos on kannattava. Tätä tarkoitusta varten on johdettu yhtälö 7. Yhtälön johtaminen löytyy liitteestä I. Yhtälö on johdettu aikaisemmin käytettyjen laskujen ja perusyhtälöiden avulla ja sillä voidaan laskea millä kapasiteetilla tapaukset 2-4 ovat kannattavampia kuin tapaus 1. Esimerkkilaskussa vertaillaan tapauksia 1 ja 4.

$$P_e = \frac{(a + 0,04) \cdot (I_2 - I_1)}{p \cdot H \cdot \left(\frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_1}\right)} \quad (7)$$

Huipunkäyttöajaksi valitaan 6000 h ja hiilen hinnaksi on arvioitu 10 €/MWh (Tilastokeskus 2017). Investoinnit ja hyötysuhteet löytyvät taulukosta 1.

$$P_e = \frac{(0,0651 + 0,04) \cdot (7\,442\,200 \text{ €} - 7\,000\,000 \text{ €})}{10 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 6000 \text{ h} \cdot \left(\frac{1}{0,45} - \frac{1}{0,472}\right)} = 735 \text{ MW}$$

Joten 735 MW on raja, jota pienemmäksi tapaus 4 tyyppistä laitosta ei taloudellisesti ole kannattavaa rakentaa, jos keskimääräinen huipunkäyttöaika on 6000 h. Kuvassa 7 näytetään kaikkien tapausten kannattavuus kapasiteetin ja huipunkäyttöajan suhteen.



**Kuva 7** Eri tapausten kannattavuuskäyrät tehon ja huipunkäyttöajan suhteen

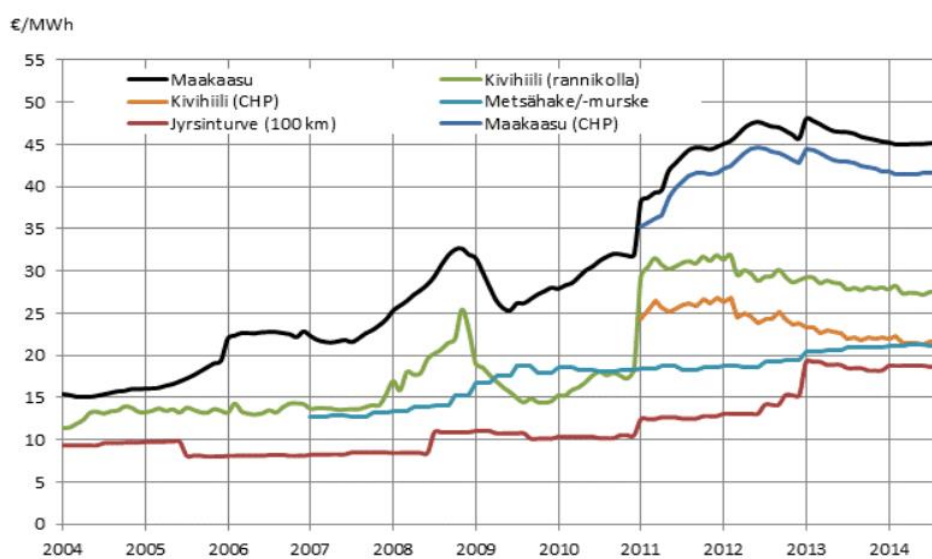
Jos tapaus olisi Suomessa ja polttoaineena olisi metsähaketta tai biomassaa, huipunkäyttöaika olisi suurin piirtein 6000 tunnin luokkaa tai alle (Vakkilainen et al. 2012, 8). Tällöin taloudellisesti kannattavan laitoksen kapasiteetin pitäisi olla lähempänä 1000 MW:a.

Polttoaineen ja sijainnin muutos lisää yhtälöön useita muuttujia kuten esimerkiksi logistiikkakustannukset ja mahdollisen lämmöntuotannon. Tämän vuoksi arvio kannattaa aina korottaa kohti varmempaa arvoa.

Kivihiili kasvattaa hiilidioksidipäästöjä ja näin suurella laitoksella olisi ongelmia biomassan käytön vuoksi. Muun muassa biomassan matalampi lämpöarvo tarkoittaisi erittäin suurta polttoaineen massavirtaa ja tästä johtuvia kasvavia kustannuksia. Suomessa maakaasu voisi olla yksi huomioon otettava polttoaine, jos tällaisia voimalaitoksia joskus rakennettaisiin. Maakaasulla on parempi lämpöarvo kuin kivihiilellä ja siinä on myös paljon vähemmän rikkiä. Lisäksi siihen voidaan sekoittaa biokaasua. (Alakangas 2000, 21, 141, 149.)

### 3.3 Hiilidioksidivero

Kuvassa 8 on käyrä eri polttoaineiden hinnoille sisältäen verot. 2014 hiilen hinta on lähes 30 €/MWh, mikä on kolme kertaa enemmän kuin laskennassa käytetty hiilen hinta. Nykyinen kasvihuonekaasujen vähentämistrendi kasvattaa jatkuvasti hiilen, turpeen ja maakaasun hintaa. Energiantuotantoa halutaan muuntaa kohti uusiutuvaa energiantuotantoa. Tämän seurauksena fossiilisten polttoaineiden saantia ja käyttöä yritetään vaikeuttaa tavoitteen saavuttamiseksi. (Tilastokeskus 2014.)



**Kuva 8** Polttoainehinnat niihin sisällytettävien verojen kanssa (Tilastokeskus 2014)

## **4 TUPLAVÄLITULISTUSLAITOKSIA MAAILMALLA**

Tässä kappaleessa esitellään kahden välitulistuksen omaavia voimalaitoksia ympäri maailmaa. Uusimmat laitokset löytyvät Kiinasta, jossa on jatkuvasti tarvetta lisäenergialle. Tuplavälitulistus on vanha keksintö ja suurin osa laitoksista on valmistettu 70- ja 80-luvuilla, ja joitakin jopa 50- ja 60-luvuilla. Kuitenkin Kiinassa on herätty tähän teknologiaan uudestaan 2000-vuosituhanalla ja ensimmäinen uuden teknologian laitos on otettu käyttöön vuonna 2015. Tämän jälkeen laitoksia onkin valmistunut nopeaan tahtiin ja lähestulkoon kaikki laitokset ovat kivihiilikäyttöisiä 660MW tai 1000 MW voimalaitoksia. Taulukkoon 3 on listattu eri maiden voimalaitoksia sekä niiden tyypillisiä arvoja. (Nicol 2015, 62-66.)

### **4.1 Aasia**

Voimalaitosten suurella energian kulutuksella ja päästöillä on suuri vaikutus ympäristöön, joten energiatehokkuudesta ja ympäristön suojelusta on tullut maailmanlaajuinen tavoite. 2012 loppupuolella Kiinan käytössä oleva kapasiteetti tavoitti 1,14 TW, josta 0,82 TW tuotettiin höyryvoimalaitoksilla. Toisin sanoen 71,5 % koko maan kapasiteetista tuotetaan höyryvoimalaitoksilla. Kiinan suurten hiilivarantojen vuoksi voi nähdä jo kauas tulevaisuuteen, ettei hiilikäyttöinen energiantuotanto ole muuttumassa mihinkään. Siksi suuren kapasiteetin voimalaitosten kehittäminen ja rakentaminen on yksi tärkeimmistä osa-alueista Kiinan päästöjä vastaan. (Niu et al. 2015, 2200.)

Vuonna 2012 Kiinan PCC-laitokset vastasivat 80 prosenttia koko Kiinan sähköntuotannosta ja hiilivoimalaitokset tuottivat noin puolet Kiinan hiilidioksidipäästöistä. Lisäksi on arvioitu, että Kiinalla on välillä 2012-2020 tarvetta lisätä hiilivoimaa 400 GW:n edestä, mikä on noin 50 % lisää nykyiseen kapasiteettiin. Samaan aikaan Kiinalla on suuria ongelmia ilman saasteiden kanssa ja Kiinan hallitus onkin aloittanut päästörajojen tiukentamisen. Tämän vuoksi onkin tärkeää parantaa tehokkuutta ja hyödyntää Kiinan hiilivarantoja mahdollisimman tehokkaasti. (Nicol 2015, 62-66.)

Hiilen käytön tehokkuus onkin parantunut huomattavasti käynnissä olevien parannusten vuoksi. Hyötysuhteet ovat nousseet sekä pieniä hiilivoimalaitoksia puretaan pois uusien superkriittisten voimalaitosten edestä. Hiilen käyttö on kymmenessä vuodessa laskenut 380 g/kWh:sta 320 g/kWh, mikä on kolmanneksi alin Japanin ja Saksan jälkeen. Parantuneiden arvojen vuoksi tuplavälitulistusteknologia on yksi päätutkimus- ja kehityskohde Kiinassa. 13 yksikköä on tällä hetkellä rakenteilla, mikä vastaa noin 11 GW:n kapasiteettiä. (Nicol 2015, 66.)

Kiinan lisäksi Japani on ainut Aasian maa, jossa on rakennettu tuplavälitulistuslaitoksia. Japanissa tuplavälitulistuksellisia voimalaitoksia on 11 kappaletta ja ne kaikki ovat valmistuneet vuosien 1968- 1990 välillä. Toisin kuin Kiinassa, yksikään laitoksista ei ole hiilikäyttöinen. Viisi näistä on kaasukäyttöisiä ja kuusi öljykäyttöisiä. Hiilivoiman rakentaminen Japanissa ei ole ollut taloudellisesti suotuisaa, ja siksi niitä ei ole Japaniin rakennettu. Kaasukäyttöiset yksiköt saavuttavat noin 47 % hyötysuhteen, joka kuitenkin jää kilpailussa kaasuturbiinien korkean sähköntuottohyötysuhteen taakse. Vaikka sähköntuotantokustannukset ovat olleet matalampia tuplavälitulistuksellisissa laitoksissa, on Japanissa helpompi rakentaa halpoja pieniä kaasuturbiinilaitoksia kuin suuria höyryvoimalaitoksia. (Nicol 2015, 34-35.)

## **4.2 Eurooppa**

Euroopassa tuplavälitulistuslaitoksia löytyy Saksasta, Italiasta ja Tanskasta. Uusimmat laitokset löytyvät Tanskasta, ja ne on rakennettu 90-luvulla. Uusia laitoksia ei tällä hetkellä ole rakenteilla, mutta tutkimustyötä tehdään muun muassa Saksassa. (Nicol 2015, 19, 33, 38.)

Saksassa on otettu käyttöön ensimmäinen tuplavälitulistuksella toimiva voimalaitos vuonna 1956 ja vuonna 1982 Saksassa tilattiin 11 tuplavälitulistuksellista voimalaitosta. Näistä seitsemän oli hiili- ja neljä kaasukäyttöisiä. Laitosten yhteistuotanto oli vain noin 1,65 GW. Kuten taulukosta 3 voidaan huomata, ovat laitosten kapasiteetit hyvin pieniä, mikä viittaa voimalaitosten varhaiseen teknologiaan. Hüls-yksikössä oli kaikkein suurin

tuorehöyryn lämpötila 600 °C ja paine 30 MPa. Tästä seuraavissa viidessä hiililaitoksessa lämpötila ulottui ainoastaan 540 °C ja paine 25 MPa:in. Tulistetun höyryn lämpötilaa ja painetta laskettiin komponenttien materiaalikestävyyden vuoksi. Saksalaisilla oli vain vähän kokemusta austeniittisista teräksistä eikä täten haluttu ottaa riskejä komponenttien kestävyuden kanssa. Laitosten teho saavutti lopulta vain 475 MW ja hyötysuhde jäi 40 %:in. Tuplavälitulustuslaitosten rakentaminen lopetettiin Saksassa 1982 niiden korkeiden kustannusten vuoksi. (Nicol 2015, 18-19.)

Tanskassa vallitsee suuri julkinen paine ja kova hallituksen vaatimus ympäristöystävällisempään lämmön- ja sähköntuotantoon. Lähes kaikki fossiiliset polttoaineet tuodaan muualta. Tanskassa on harrastettu laajaa tutkimus- ja kehitystyötä hiilen ja biomassan muuntoteknologiaan, minkä pohjalta Nordjyllandin yksikkö 3 laskettiin mahdollisimman tehokkaaksi vähäisillä kustannuksilla. Alhaisella lämpötilalla toimiva jäähdytys merivedellä mahdollisti vieläkin korkeamman hyötysuhteen sekä paremmat eroosio olosuhteet. Nordjylland yksikkö on yksi maailman tehokkaimmista ja puhtaimmista PCC -laitoksista. Myös Tanskan toinen tuplavälitulustuslaitos Skærbæk -yksikkö 3 on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen. Molemmat laitokset toimivat 580 °C ja 29 MPa:in tuorehöyryllä ja hyötysuhde on luokkaa 47 -49 %. Molemmat laitokset voidaan vaihtaa yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon, jolloin hyötysuhteet kohoavat aina yli 90 %:in. (Nicol 2015, 38-43.)

Tanskan tapaan, myös Italiassa on vain kaksi tuplavälitulustuslaitosta, mutta italialaiset laitokset on rakennettu jo 60-luvulla. La Spezia yksiköt 3 ja 4, joista ensimmäisessä poltettiin maakaasua ja toisessa kivihiiltä. Laitosten kapasiteetti oli 600 MW höyryn ollessa lämpötilassa 542 -566 °C ja paineen 24,6 MPa. Hyötysuhteet laitoksilla olivat noin 39 %.(Nicol 2015, 33.)

### **4.3 Amerikka**

1940 -1980 PCC- tehtaiden kokonaiskapasiteetti kasvoi räjähdysmäisesti muutamasta GW:sta aina 300 GW:in. Tuon ajan voimalaitossuunnittelijat arvioivat ylikriittisten tuplavälitulustuslaitosten olevan taloudellisesti kannattavampia elinkaarensa aikana kuin



pienemmät yhden välitulistuksen voimalaitokset. Aina 1970-luvulle asti PCC -teknologiaa hallitsivat Pohjois- Amerikkalaiset yritykset Babcock & Wilcox ja General Electric. 25 vuodessa USA:han valmistettiin 32 tuplavälitulistuslaitosta, joiden kokonaiskapasiteetti oli noin 17 GW. 27 näistä laitoksista käytti kivihiiltä, kolme maakaasua, yksi öljyä ja yksi ruskohiiltä. (Nicol 2015, 29-30.)

Myös USA:ssa oli ongelmia turbiinikomponenttien materiaalin kanssa. Kokemattomuus austeniittisten terästen kanssa johti siihen, että tuorehöyryn parametrit suunniteltiin 649 °C:een ja 34,5 MPa:in Eddystonen ensimmäisessä yksikössä. Myös Philon 6 yksikössä arvot suunniteltiin liian korkeiksi. Tämä aiheutti värinää roottoreissa ja tulistuspuolen korroosiota, minkä takia arvot tiputettiin 610 °C ja 33 MPa:in. Ongelmat komponenttien materiaalien kanssa jatkuivat vielä 60- ja 70-luvuilla, jolloin liian korkeat lämpötilat ja paineet aiheuttivat värinää sekä väsymiskestävyuden heikentymistä kattilan teräsputkissa sekä korkeasta paineesta johtuva hapettuminen kulutti nopeasti kattilan putkia ja turbiinin suuttimia. Tämän seurauksena tuplavälitulistuslaitosten huolto- ja kunnossapitokustannukset nousivat merkittävästi, mikä taas johti tuplavälitulistuslaitosten saatavuuden vähenemiseen. Tämän jälkeen rakennetuissa tuplavälitulistuksellisissa voimalaitoksissa höyryn parametrit on pidetty alhaisina. Lämpötilat olivat luokkaa 538 -565 °C ja paine ei noussut yli 26 MPa:n. (Nicol 2015, 29.)

1960-luvun puolessa välissä laitosten rakennuskustannukset tippuivat huomattavasti niiden yleisyyden vuoksi. Kustannukset tippuivat reilusti, mutta nousivat kuitenkin 70-luvulla tarkentuneen ilman saastumisvalvonnan ja jäähdytystornien tarpeen vuoksi. Kuitenkin 70-luvun jälkeen ei ole uusia tuplavälitulistuslaitoksia USA:han rakennettu sähkön tarpeen vähentymisen ja sähkömarkkinoiden yksityistymisen vuoksi. Kuitenkin 2007 on haettu lupaa uudelle tuplavälitulistuslaitokselle. (Yeh 2007, 2002-2003.)

Operointi austeniittisten teräskomponenttien kanssa alemmilla höyryn arvoilla on osoittautunut USA:ssa erittäin toimivaksi ratkaisuksi. Niiden käyttöikä on ollut yli 50 vuotta. Tuplavälitulistusteknologiaa on tutkittu ja kehitetty, mutta tämä ei ole johtanut uusien laitosten rakentamiseen. Tähän syynä on sähkömarkkinoiden yksityistyminen, jolloin

pitkäaikaiset investoinnit eivät ole kannattavia. Lähes puolet laitoksista on jo suljettu ja osa on siirtymässä polttamaan kaasua tai biomassaa päästösäädösten kiristyessä ja saatavissa olevan halvan liuskekaasun vuoksi. (Nicol 2015, 29.)

**Taulukko 3** Tuplavälitulistuksellisia voimalaitoksia eripuolilta maailmaa (Nicol 2015, 19, 30, 35, 38, 42, 67)

Laitos	Käyttöönotto vuosi	Pääpolttoaine	Kapasiteetti [MWe]	Höyryn arvot (°C/°C/°C/MPa)	Sähköntuotto-hyötysuhde
<b>Kiina</b>					
Waigaoqiao 9	2017	Hiili	1000	600/620/610/30	48,92
Guodian Taizhou 1 ja 2	2015	Hiili	1000	600/610/610/31	47,94
Guodian Bengbu 1 ja 2	2015	Hiili	660	600/620/620/31	
Huaneng Anyuan 3 ja 4	2015	Hiili	660	600/620/620/31	
<b>USA</b>					
Gibbons Creek 1	1982	Ligniitti	480	538/538/540/16.5	33
Four Corners 5	1969	Hiili	818	538/538/540/26	33
John E Amos 1 ja 2	1971/1972	Hiili	816,3	538/552/565/24	39,4
Philo 6	1957	Hiili	120	621/565/538/31	40
<b>Japani</b>					
Kawagoe 1 ja 2	1989/1990	Kaasu	700	565/565/565/31	45
Kainan 4	1974	Öljy	600	538/552/566/24.1	
Himeji Daini 5 ja 6	1973	Kaasu	600	538/552/566/24.2	
Himeji Daini 4	1968	Kaasu	450	538/552/566/24.3	
<b>Saksa</b>					
Sandreuth 1-3	1982	Kaasu	25	535/360/400/12	28,1
Mannheim 4	1970	Hiili	220	530/540/530/25	39,4
Mannheim 7	1982	Hiili	475	530/540/530/25	39,6
Franken II 1 ja 2	1966/1967	Hiili	206	530/540/540/24,5	39,4
<b>Tanska</b>					
Nordjylland 3	1998	Hiili	385	582/580/580/29	47,2
Skærbæk 3	1997	Kaasu	392	580/580/580/29	49

## 5 YHTEENVETO

Kandidaatintyössä käytiin läpi tuplavälitulistuksellisen voimalaitoksen toimintaa ja rakennetta, sen hyviä ja huonoja puolia, tutkittiin sen kannattavuutta eri voimalaitosmaaleissa sekä kyseisen teknologian käyttöä maailmalla. Työssä tehtyjen laskelmien mukaan tuplavälitulistuslaitoksen hyötysuhdetta saadaan parhaalla mahdollisella nykyteknologialla parannettua 2,72 %, mikä on merkittävä parannus esimerkiksi tämänhetkisiin suomalaisiin voimalaitoksiin. Paremmalla hyötysuhteella saadaan alennettua polttoainekustannuksia sekä hiilidioksidipäästöjä merkittävästi.

Tälläkin hetkellä voimalaitostekniikkaan on käynnissä AD700 projekti. Projektin ideana on nostaa tuorehöyryn lämpötila 700 °C:een ja paine 35 MPa:in. Tällaisissa olosuhteissa komponenttien materiaalit joutuvat kovalle koetukselle, varsinkin korkeapaineturbiinin roottorin ja staattorin lavat. Projektin päätavoitteena tällä hetkellä on kehittää materiaali, joka kestäisi kyseisen lämpötilan ilman huomattavaa investoinnin kasvua. Tämän hetken parhaana materiaalivaihtoehtona toimivat nikkelipohjaiset terässeokset, mutta niissä ongelmana on niiden muokattavuus.

Työssä käsiteltiin tuplavälitulistuksen kannattavuutta usealla eri tapauksella. Tapauksia vertailtiin yhden välitulistuksen voimalaitokseen ja tulosten mukaan tuplavälitulistus halvimmilla investoinneilla olisi kannattava rakentaa, jos sen kapasiteetti olisi lähempänä 900 MW:a. Parhaimmillaan tuplavälitulistuslaitos olisi kannattava 750 MW kapasiteetillä. Vertailulaitos tuottaisi sähköä 31,41€/MWh, kun tuplavälitulistuksellinen laitos pystyisi parhaimmillaan 30,94 €/MWh. Laskennassa käytettiin polttoaineena hiiltä ja huipunkäyttöaikana 6000 tuntia.

Maailmalla suurin osa tuplavälitulistuksellisista laitoksista on valmistettu kymmeniä vuosia sitten ja oikeastaan ainoat nykyaikaisella teknologialla käyvät laitokset ovat Kiinassa ja Tanskassa. Tanskassa laitokset on valmistettu 1997 ja 1998 ja ne tuottavat sähköä sekä lämpöä. Parhaimmillaan sähköntuottohyötysuhde on jopa 49 % ja yhdistetyssä tuotannossa hyötysuhde nousee yli 90 prosenttiyksikön. Kiinassa valtaosa käyvistä laitoksista on rakennettu kauan aikaa sitten, mutta se on herännyt teknologiaan uudestaan kiristyvien

ympäristörajoitusten vuoksi. Kiinan suuret hiilivarannot estävät Kiinaa luopumasta hiilen poltosta, joten paras tapa vaikuttaa on panostaa laitoksen tehokkuuteen. Kiinassa onkin tällä hetkellä rakenteilla 13 tuplavälitulistuksellista laitosta, mikä vastaa noin 11 GW kapasiteettia.

## LÄHDELUETTELO

Alakangas Eija, 2000. [verkkodokumentti]. ”Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia” VTT Energia. s.9. [viitattu 15.10.2017]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>

Ennis P. J., 2014. Coal Power Plant Materials and Life Assessment: Developments and Applications. University of Leicester, UK. Kappale 6: “Nickel-base alloys for advanced power plant components”. s. 147-170. Elsevier.

Gang Xu, Luyao Zhou, Shifei Zhao, Feifei Liang, Cheng Xu, Yongping Yang, 2015. [verkkodokumentti]. ”Optimum superheat utilization of extraction steam in double reheat ultra-supercritical power plants”. National Thermal Power Engineering and Technology Research Center. Applied Energy, osa 160, s. 863-872. [viitattu 20.10.2017]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915000331>

Huhtinen Markku, Korhonen Risto, Pimiä Tuomo, Urpalainen Samu, 2016. ”Voimalaitostekniikka” 3. painos. kustantaja: Opetushallitus. Paino: Next Print Oy, Helsinki, 2016.

Hytti Matias, 2015. [Diplomityö]. ”VOIMALAITOKSEN KÄYTÖNAIKAISEN OPTIMOINNIN ONLINESEURANTATYÖKALUN SUUNNITTELEMINEEN”. [viitattu 15.10.2017]. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23284/Hytti.pdf?sequence=>

Kyle Nicol, 2015. [verkkodokumentti]. “Application and development prospects of double-reheat coal-fired power units”. © IEA Clean Coal Centre. [viitattu 30.10.2017]. Saatavissa:

<https://www.usea.org/sites/default/files/media/Application%20and%20development%20prospects%20of%20double-reheat%20coal-fired%20power%20units%20-%20ccc255.pdf>

Niu Hai-Ming, Zhang Wei, 2015. [verkkodokumentti]. “Technical Analysis on Double Reheat for Ultra-Supercritical Units”. 5th International Conference on Advanced Design

and Manufacturing Engineering, s. 2200-2205. [viitattu 20.10.2017]. Saatavissa: [file:///C:/Users/samik/Downloads/25840488%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/samik/Downloads/25840488%20(1).pdf)

Si Ningning, Zhigang Zhao, Sheng Su, Pengshuai Han, Zhijun Sun, Jun Xu, Xiaoning Cui, Song Hu, Yi Wang, Long Jiang, Yingbiao Zhou, Gang Chen, Jun Xiang, 2017. [verkkodokumentti]. Exergy analysis of a 1000 MW double reheat ultra-supercritical power plant. Energy Conversion and Management, osa 147, s. 155-165. [viitattu 16.10.2017]. Saatavissa: [https://ac-els-cdn-com.ezproxy.cc.lut.fi/S0196890417304934/-1-s2.0-S0196890417304934-main.pdf?\\_tid=7316bbd6-acb2-11e7-bfb0-00000aacb362&ac-dnat=1507526989\\_04bea2ecb43a9189771cb64ac31cd352](https://ac-els-cdn-com.ezproxy.cc.lut.fi/S0196890417304934/-1-s2.0-S0196890417304934-main.pdf?_tid=7316bbd6-acb2-11e7-bfb0-00000aacb362&ac-dnat=1507526989_04bea2ecb43a9189771cb64ac31cd352)

Siemens AG. 2014. [verkkodokumentti]. Double Reheat Technology The next step to optimized efficiency. [viitattu 14.10.2017]. Saatavissa: <https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/siemens-brochure-double-reheat-technology-steam-turbines.pdf>

Tilastokeskus 2014. [nettijulkaisu]. ”Fossiilisten polttoaineiden ja sähkön hinnat laskivat toisella vuosineljänneksellä”. [viitattu 18.10.2017]. Saatavissa: [https://www.tilas-tokeskus.fi/til/ehi/2014/02/ehi\\_2014\\_02\\_2014-09-18\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.tilas-tokeskus.fi/til/ehi/2014/02/ehi_2014_02_2014-09-18_tie_001_fi.html)

Tilastokeskus 2017. [nettijulkaisu]. ”Energian hintojen nousu hidastui vuoden toisella neljänneksellä”. [viitattu 18.10.2017]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/ehi/2017/02/ehi\\_2017\\_02\\_2017-09-07\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2017/02/ehi_2017_02_2017-09-07_tie_001_fi.html)

Vakkilainen Esa, Kivistö Aija, 2011. [verkkodokumentti]. ”Uusiutuvan sähkön lisäämiseen käytettyjen energiaverojen vaikutus kuluttajan maksamaan sähkön hintaan”. [viitattu 11.9.2018]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/-265845104\\_Uusiutuvan\\_sahkon\\_lisaamiseen\\_kaytettyjen\\_energiaverojen\\_vaikutus\\_kuluttajan\\_maksamaan\\_sahkon\\_hintaan](https://www.researchgate.net/publication/-265845104_Uusiutuvan_sahkon_lisaamiseen_kaytettyjen_energiaverojen_vaikutus_kuluttajan_maksamaan_sahkon_hintaan)

Vakkilainen Esa, Kivistö Aija, Tarjanne Risto, 2012. [verkkodokumentti]. ”Sähkön tuotantokustannusvertailu”. [viitattu 22.10.2017]. Saatavissa: <http://www.doria.fi/>

bitstream/handle/10024/86304/S%E4hk%F6n+tuotantokustannusvertailu+,+tutkimusraportti+27,+2012.pdf;jsessionid=853BE744B9E910E5A5421DC62A05EA83?sequence=1

Yeh Sonia, Rubin, Edward, 2007. "A centurial history of technological change and learning curves for pulverized coal-fired utility boilers". Energy, osa 32, s. 1996-2005. Elsevier.

Zhigang Zhao, Sheng Su, Ningning Si, Song Hu, Yi Wang, Jun Xu, Long Jiang, Gang Chen, Jun Xiang. 2017. [verkkodokumentti]. "Exergy analysis of the turbine system in a 1000 MW double reheat ultra-supercritical power plant". Energy, osa 119, s. 540-548. Elsevier. [viitattu 22.10.2017]. Saatavissa: [www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy)

Zhou Luyao, Gang Xu, Shifei Zhao, Cheng Xu, Yongping Yang, 2016. [verkkodokumentti]. "Parametric analysis and process optimization of steam cycle in double reheat ultra-supercritical power plants". Applied Thermal Engineering, s. 652-660. Elsevier. [viitattu 28.10.2017]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/-science/article/pii/S1359431116001022>

Zhou Luyao, Gang Xu, Yongping Yang, Shifei Zhao, Cheng Xu, Kai Zhang, 2014. [verkkodokumentti]. "A comparative study of superheat utilization measures of extraction steam in double reheat power plants". Energy Procedia, s. 1356-1359. [viitattu 27.10.2017]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661-0214031555>

## LIITE I.

Johdetaan yhtälö voimalaitoksen teholle, kun sähkön tuotantohinta on yhtäsuuri molemmilla laitoksilla.

$$P_{e,1} = P_{e,2} \quad P_{e,1} = P_{e,2} = P_e = ?$$

$$P_e = \frac{C_{tot,1}}{H} = \frac{C_{tot,2}}{H} \rightarrow C_{tot,1} = C_{tot,2}$$

$$C_{tot} = C_F + C_I + C_{OM}$$

$$C_{tot} = 3600 \cdot q_m \cdot p_{pa} \cdot q \cdot H + I \cdot a + I \cdot 0,04$$

$$= 3600 \cdot q_m \cdot p_{pa} \cdot q \cdot H + I \cdot (a + 0,04)$$

$$q_m = \frac{P_k}{q \cdot 3600}$$

$$C_{tot} = \frac{P_k \cdot \cancel{3600}}{q \cdot \cancel{3600}} \cdot p_{pa} \cdot q \cdot H + I \cdot (a + 0,04)$$

$$= P_k \cdot p_{pa} \cdot H + I \cdot (a + 0,04) \quad \left| P_k = \frac{P_e}{n_e} \right.$$

$$C_{tot,1} = C_{tot,2}$$

$$\rightarrow \frac{P_e \cdot p_{pa} \cdot H}{n_{e,1}} + I_1 \cdot (a + 0,04) = \frac{P_e \cdot p_{pa} \cdot H}{n_{e,2}} + I_2 \cdot (a + 0,04)$$

$$\rightarrow \frac{P_e \cdot p_{pa} \cdot H}{n_{e,1}} - \frac{P_e \cdot p_{pa} \cdot H}{n_{e,2}} = I_2 \cdot (a + 0,04) - I_1 \cdot (a + 0,04)$$

$$P_e \cdot p_{pa} \cdot H \cdot \left( \frac{1}{n_{e,1}} - \frac{1}{n_{e,2}} \right) = (a + 0,04) \cdot (I_2 - I_1)$$

$$P_e = \frac{(a + 0,04) \cdot (I_2 - I_1)}{p_{pa} \cdot H \cdot \left( \frac{1}{n_{e,1}} - \frac{1}{n_{e,2}} \right)}$$