

Markus Luukkonen

# LEIJUPETIKATTILAN JA SÄHKÖISTE- TYN HÖYRYAKUN YHTEISTOIMINTA HÖYRYVERKOSSA

Sähkövastusten ohjaus vuorokausi- ja  
reservimarkkinoiden mukaan

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastajat: Apulaisprofessori Henrik Tolvanen  
Professori Pertti Järventausta  
Syyskuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Markus Luukkonen: Leijupetikattilan ja sähköistetyn höyryakun yhteistoiminta höyryverkossa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö-, energia- ja biotekniikan DI-ohjelma  
Syyskuu 2025

---

Ilmastotavoitteiden kiristyessä ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentyessä teollisuudessa etsitään aktiivisesti vähäpäästöisiä ratkaisuja höyryntuotantoon. Yksi keino on sähköistää höyryntuotanto hyödyntämällä uusiutuvaa energiaa. Tämä diplomityö tutkii sähköistetyn höyryakun hyödyntämistä osana tehtaan höyryverkkoa, jossa se toimii yhdessä kuplaleijupetikattilan kanssa. Tavoitteena on optimoida sähkövastusten käyttö siten, että saavutetaan mahdollisimman suuret säästöt sähkömarkkinoilla ilman höyryverkon toiminnan häiritsemistä.

Työ pohjautuu tilanteeseen, jossa teollisuuslaitos suunnittelee varalla toimivan raskasöljykattilan korvaamista sähkövastuksellisella höyryakulla. Höyryverkon ja siihen liittyvien laitteiden toiminta mallinnettiin MATLAB-ympäristössä. Simulointimalli rakennettiin kuvaamaan leijupetikattilan, höyryakun ja sähkövastusten yhteistoimintaa. Mallin avulla analysoitiin järjestelmän taloudellista ja teknistä suorituskykyä sähkömarkkinoille osallistuessa. Malli verifioitiin askelvaste- ja sinikäyräkokeilla. Lisäksi leijupetikattilalle suoritettiin minimikuorma- ja säätövastekokeet, joiden avulla määritettiin kattilan minimitehoksi 5 kg/s ja maksimitehonmuutosnopeudeksi 1 kg/s/min.

Ajomallin avulla arvioitiin eri ohjausstrategioiden, kuten blokki- ja hintakäyrätarjouksen sekä FCR-D- ja mFRR-reservimarkkinoille osallistumisen säästömahdollisuuksia tarkastellussa kohteessa. Simulointien perusteella sähköistetty höyryakku mahdollisti jopa 13–26 % säästöt vuotuisiin höyryntuotannon kokonaiskustannuksiin verrattuna tavanomaiseen operointiin. Hintakäyrätarjouksella saavutetut säästöt olivat keskimäärin 2–12 % suuremmat kuin blokkitarjouksella, mutta samalla sähkövastusten aktivoinnit lisääntyivät keskimäärin 130 %. Lisäksi osoitettiin, että höyrynkulutuksen tarkempi ennustaminen vähentäisi ylimääräisen höyryntuotantoa ja kasvattaisi FCR-D- ja mFRR-markkinoille osallistuessa kokonaishöyryntuotannon säästöjä keskimäärin 2 %.

Sähkövastuksellisella höyryakulla saadut tuotot maksimoidaan osallistumalla vuorokausimarkkinoille hintakäyrätarjouksella ja reservimarkkinoille FCR-D- tai mFRR-markkinoiden kautta. Höyrynkulutuksen ennustamisella saadaan lisäsäästöjä ja höyryakun nestetilavuutta kasvattamalla voidaan vähentää ennustevirheistä johtuvia ulospuhalluksia. Säätölogiikassa höyryakun purkuteho pidetään ensisijaisena säätökeinona, mikä vähentää paineen nousua ja ulospuhallustilanteita sekä pidentää akun käyttöikä.

Työssä esitetään muitakin konkreettisia säätöparametriehdotuksia automaatiojärjestelmään sähkövastusten optimaalisen ohjauksen tueksi. Lisäksi arvioidaan simulointimallin tarkkuutta ja esitetään jatkokehityskohteita, kuten höyryakun nestetilavuuden tarkempi ohjaus ja tehtaiden yhteissähkötaseen hyödyntäminen.

Työ täydentää tutkimusaukkoa höyryakun sähköistämisestä ja sen yhteiskäytöstä leijupetikattilan kanssa, jota ei aiemmin ole tutkittu teollisessa kontekstissa. Työ tarjoaa kattavan analyysin sähköistetyn höyryakun teknisistä ja taloudellisista mahdollisuuksista teollisuuden energiapuolella. Lisäksi se antaa konkreettisia suosituksia ohjauslogiikan kehittämiseksi, jotta sähkömarkkinoiden säästöpotentiaalit voidaan hyödyntää tehokkaasti. Työn tulokset osoittavat, että sähkövastuksellisen höyryakun integrointi osaksi höyryverkkoa voi merkittävästi parantaa laitoksen kustannustehokkuutta erityisesti reservimarkkinoille osallistuttaessa.

Avainsanat: Sähkökattila, höyryakku, leijupetikattila, vuorokausimarkkina, reservimarkkinat, energiamarkkina, kapasiteettimarkkina, MATLAB, optimointi, teollisuus.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Markus Luukkonen: Cooperation between a fluidized bed boiler and an electrified steam accumulator in a steam network  
Master's Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Program in Environmental, Energy and Biotechnology Engineering  
September 2025

---

As climate targets tighten and the use of fossil fuels decreases, the industry is actively seeking low-emission solutions for steam production. One option is to electrify steam generation by utilizing renewable energy. This thesis examines the integration of an electrified steam accumulator into a factory steam network, where it operates alongside a bubbling fluidized bed boiler. The objective is to optimize the use of electric resistors to achieve the greatest possible savings in the electricity markets without disrupting steam network operation.

The study is based on a case where an industrial facility is planning to replace a backup heavy fuel oil boiler with a steam accumulator equipped with electric resistors. The operation of the steam network and its associated equipment was modeled in the MATLAB environment. A simulation model was built to describe the interaction of the fluidized bed boiler, the steam accumulator, and the electric resistors. The model was used to analyze the system's economic and technical performance when participating in electricity markets. The model was verified with step response and sine wave tests. In addition, minimum load and control response tests were carried out for the fluidized bed boiler, which determined its minimum capacity to be 5 kg/s and maximum load change rate to be 1 kg/s/min.

Using the operational model, the savings potential of different control strategies such as block and price curve offers, as well as participation in FCR-D and mFRR reserve markets was evaluated. According to the simulations, the electrified steam accumulator enabled cost savings of up to 13–26% in annual steam production compared to conventional operation. Price curve offers yielded on average 2–12% higher savings than block offers, but resistor activations increased by an average of 130%. The results also showed that more accurate steam consumption forecasting would reduce excess steam production and increase total cost savings by approximately 2% when participating in FCR-D and mFRR markets.

The revenues from a resistor-equipped steam accumulator are maximized by participating in the day-ahead market with price curve offers and in the reserve markets via FCR-D or mFRR. Improved steam consumption forecasting provides additional savings, while increasing the liquid volume of the steam accumulator can reduce venting caused by forecasting errors. In the control logic, accumulator discharge power is prioritized as the primary balancing mechanism, which reduces pressure rises and venting events and extends accumulator lifetime.

The thesis also presents concrete control parameter proposals for the automation system to support optimal resistor operation. Furthermore, the accuracy of the simulation model is evaluated, and potential development areas are outlined, such as more precise control of the steam accumulator volume and utilizing the aggregated electricity balance of multiple plants.

This thesis fills a research gap in the electrification of steam accumulator and its combined operation with fluidized bed boiler, which has not previously been studied in an industrial context. It provides a comprehensive analysis of the technical and economic potential of electrified steam accumulators in industrial energy systems. In addition, it offers practical recommendations for developing control logic to efficiently capture electricity market savings. The results demonstrate that integrating a resistor-equipped steam accumulator into a steam network can significantly improve plant cost efficiency, particularly when participating in reserve markets.

Keywords: Electric boiler, steam accumulator, fluidized bed boiler, day-ahead market, reserve markets, energy market, capacity market, MATLAB, optimization, industry

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT (versiot GPT-3.5 ja GPT 4.0), Grok (versio 3) ja Consensus.

Käyttötarkoitus: Tekoälysovelluksia hyödynnettiin tekstin oikolukemiseen ja jäsentämiseen sekä lähteiden löytämiseen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tekoälyä on käytetty luvuissa 1–7 ja tiivistelmissä.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

## ALKUSANAT

Haluan kiittää Metsä Boardia mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta diplomityöaiheesta. Erityiskiitokset ohjaajilleni Matti Korhoselle aiheen tarjoamisesta ja sisällöllisestä tuesta sekä Jari Pitkäkoscalle avusta tehtaan toiminnan ymmärtämisessä.

Tampereen yliopiston puolelta kiitän Henrik Tolvasta ja Pertti Järventaustaa asiantuntevasta ohjauksesta. Neuvonne ja kommenttinne olivat merkittävä apu työn saattamisessa valmiiksi.

Yliopistovuoteni olivat ikimuistoiset ja en vaihtaisi niitä mihinkään. Haluan kiittää myös kaikkia kavereitani, jotka ovat olleet mukana luomassa näitä muistoja. Tästä on hyvä jatkaa kohti uusia mahdollisuuksia. Kiitti sulle ja kiitti kaikille.

Tampereella, 8.9.2025

Markus Luukkonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SÄHKÖISEN HÖYRYNTUOTANNON JA LEIJUPETIKATTILAN YHTEISKÄYTTÖ HÖYRVERKOSSA .....	4
2.1 Leijupetikattilat ja niiden ominaisuudet .....	4
2.2 Höryakku .....	8
2.3 Sähkökattilat .....	12
2.4 Höryakun sähköistäminen .....	15
2.5 Leijupetikattila ja sähkövastuksellinen höryakku osana höyryverkkoa	16
3. SÄHKÖVASTUKSELLISEN HÖYRYAKUN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖMARKKINOILLA .....	23
3.1 Sähkömarkkinoiden esittely .....	23
3.2 Reservimarkkinatuotteet .....	27
3.3 Reservimarkkinoille osallistuminen .....	33
3.4 Tuottomahdollisuudet vuorokausi- ja reservimarkkinoilta sähkövastuksellisella höryakulla .....	34
4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTOT .....	38
4.1 Tutkimusstrategia ja tutkimuskohde .....	38
4.2 Tarkastellun tehtaan höyryverkko .....	40
4.3 Leijupetikattilan minimikuorma- ja säätövastekoe .....	43
4.4 Sähköistetyn höryakun ajomallin luominen, verifiointi ja kustannuslaskelma .....	47
5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU .....	52
5.1 Minimikuorma- ja säätövastekokeen tulokset .....	52
5.2 Ajomallin verifiointi .....	55
5.3 Tulokset eri ajomallien tuotoista .....	59
5.4 Uudet säätöparametrit sähkövastukselliselle höryakulle .....	64
5.5 Tulosten pohdinta .....	72
6. YHTEENVETO .....	74
LÄHTEET .....	76

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

aFRR	Automaattinen taajuuden palautusreservi
BCTMP	Valkaistu kemihierre
CH <sub>4</sub>	Metaani
CO	Hiilimonoksidi
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
EUPHEMIA	Euroopan yhteinen vuorokausimarkkinoiden hintalaskenta-algoritmi
EU	Euroopan unioni
FCR	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi
FFR	Nopea taajuusreservi
HCl	Suolahappo
MATLAB	MATrix LABoratory
mFRR	Manuaalinen taajuuden palautusreservi
NO <sub>x</sub>	Typpioksidi
PCM	Faasimuutosmateriaali
SO <sub>x</sub>	Rikkioksidi

<i>C</i>	Hinta	€/MWh
<i>E</i>	Energiasisältö	kJ
<i>h</i>	Ominaisentalpia	kJ/kg
<i>I</i>	Sähkövirta	A
<i>m</i>	Massa	kg
<i>ṁ</i>	Massavirta	kg/s
<i>P</i>	Teho	kW
<i>p</i>	Paine	bar
<i>R</i>	Resistanssi	Ω
<i>r</i>	Veden höyrystymislämpö	kJ/kg
<i>t</i>	Aika	s
<i>v</i>	Ominaisilavuus	m <sup>3</sup> /kg
<i>V</i>	Tilavuus	m <sup>3</sup>
<i>η</i>	Hyötysuhde	-

### Alaindeksit

1	Höryakun höyry
2	Höryakun neste
a	Alkutila
avg	Keskiarvo
B	Biomassa
BFB	Kuplaleijupetikattila
C	Kulutus
e	Sähkövastus
E	Sähkönoston rajahinta
f	Uusi höryakun väsymiskesto
FB	Leijupetikattila
g	Alkuperäinen höryakun väsymiskesto
in	Sisäänvirtaus
l	Lopputila
max	Höryakun suurin sallittu paine
min	Höryakun pienin sallittu paine
out	Ulosvirtaus
SA	Höryakku

## Yläindeksit

'	Kylläinen vesi
”	Kylläinen höyry
$\alpha$	Materiaalikohtainen väsymiskestokerroin

# 1. JOHDANTO

Noin 75 % ilmastomuutoksen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä syntyy fossiilisten polttoaineiden käytöstä energiantuotannossa. Tämän seurauksena energiantuotannossa on siirrytty vähäpäästöisiin uusiutuviin energianlähteisiin. Tällä hetkellä noin 14 % maailman energiasta ja 33 % sähköstä tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä. (Ritchie et al., 2020.) Pariisin ilmastosopimuksen mukaan lämpötilan nousu pitäisi rajoittaa selvästi alle 2 °C:een ja pyrkiä rajoittamaan korkeintaan 1,5° C:een verrattuna esiteolliseen aikaan eli noin vuoteen 1850. Tavoitteen saavuttaminen vaatisi uusiutuvien energianlähteiden osuuden nousemisen 65 %:iin maailman kokonaisenergiankulutuksesta. (International Renewable Energy Agency, IRENA, 2017)

Uusiutuvien energianlähteiden lisääntyminen ja niiden sääriippuvuus aiheuttavat suurempia vaihteluita sähkön tuotantomäärissä. Sähköverkon taajuus pyritään pitämään 50 Hz:ssä, mutta tuotannon ja kulutuksen epätasapaino aiheuttaa siihen vaihtelua. Tuotannon ollessa kulutusta suurempi, taajuus nousee yli 50 Hz. Vastaavasti taajuus laskee alle 50 Hz, kun kulutus ylittää tuotannon. Suomessa sähköjärjestelmän tasapainosta vastaa Fingrid, joka varaa reservejä, aktivoi säätösähkömarkkinoita ja käyttää tehoreservijärjestelmiä. (Fingrid, 2017)

Tutkittu tehdas tarvitsee höyryä kuivaamoon, kuorimoon, kaukolämpöön, lauhdesäiliöön ja syöttövesisäiliöön. Höyry tuotetaan tällä hetkellä kiinteän polttoaineen kattilalla, jauhauksen hukkalämmöllä, kemikaalien talteenottolaitoksella sekä varakattilana toimivalla raskasöljykattilalla. Höyryverkkoa tasapainotetaan höyryakulla, joka tasaa höyryn tuotannon ja kulutuksen välisiä vaihteluita. Tehtaalla suunnitellaan sähkövastusten integroimista olemassa olevaan höyryakkuun, jolloin osa prosessihöyrystä voidaan tuottaa sähköllä. Tavoitteena on luopua vanhasta öljykattilasta ja siirtyä vähäpäästöisempään höyryntuotantoon. Lisäksi sähkövastuksellinen höyryakku mahdollistaa osallistumisen sähkömarkkinoille ja sähköverkon taajuuden tasapainotuksen.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, kuinka sähkövastukset voidaan integroida höyryakkuun ja hyödyntää niitä sähkömarkkinoilla ilman höyryverkon toiminnan häiritsemistä. Työhön sisältyy myös kokeellinen osuus, jossa selvitetään leijupetikattilan minimikuorma ja säätövaste. Leijupetikattilan ja höyryakun tekniset rajoitteet sekä sähkömarkkinoiden vaatimukset määrittävät ne rajat, joiden perusteella sähkövastuksia voidaan ohjata vuorokausi- ja reservimarkkinoilla. Lisäksi tarkastellaan, miten höyryverkko reagoi tuotannon

ja kulutuksen suunniteltuihin muutoksiin eri ohjaustilanteissa. Työssä ei käsitellä päästövähennyksiä, rakennuspuolta tai turvallisuusnäkökulmia. Työn tavoitteen mukaisesti on määritelty seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Mitä tekijöitä tulee huomioida, kun höyryakku ja vastussähkökattila yhdistetään yhdeksi kokonaisuudeksi?
2. Miten leijupetikattilan säätönopeus ja minimikuorma rajoittavat sähkövastuksellisen höyryakun toimintaa, kun ne operoivat samassa höyryverkossa?

Tutkimustehtävä: höyryverkon ja siihen liittyvän vastuksellisen höyryakun sekä leijupedin toiminnan mallinnus ja ajomallin verifiointi.

3. Miten tarkasteltu höyryverkko reagoi suunniteltuihin tuotannon ja kulutuksen muutoksia?
4. Millä ajomallilla saadaan suurimmat tuotot vuorokausi- ja reservimarkkinoilla?

Aihe on muodostunut energiamurroksen myötä, joten tutkimusta ei ole vielä paljon. Samankaltaisin tutkimus on Aleksejevin (2024) diplomityö sähkökattilan ja höyryakun muodostaman systeemin hyödyntämisestä reservimarkkinoilla. Tamminen (2022) tutki höyryverkon energiatehokkuuden analysointia ja kehitystä sellutehtaalla sekä sen integraateissa. Herre et al. (2020) tutkivat sähkökattilan hyödyntämistä energia- ja reservimarkkinoilla sellu- ja paperitehtailla. Aiempaa tutkimusta sähkövastusten liittämisestä höyryakkuun ja sen hyödyntämisestä leijupetikattilan kanssa vuorokausi- ja reservimarkkinoilla ei vielä ole. Tutkimus on tärkeä, koska uusiutuvien energianlähteiden tuotannon kasvaessa tarvitaan kysyntäjoustoa, johon sähkövastuksellinen höyryakku tarjoaa potentiaalisen ratkaisun.

Työn 2. luvussa muodostetaan kokonaisvaltainen kuva leijupetikattiloista, sähkökattiloista ja höyryakusta sekä niiden yhteistoiminnasta samassa höyryverkossa. Tämän avulla vastataan ensimmäiseen ja toiseen tutkimuskysymykseen. Työn 3. luvussa perehdytään sähkömarkkinoiden toimintaan ja syvennytään reservimarkkinoihin. Työn 4. luvussa esitellään työn toteuttamisprosessi siten, että se olisi toistettavissa samoilla lähtötiedoilla. Tässä vaiheessa suoritetaan myös työn tutkimustehtävä. Lisäksi kuvataan tehtaan höyryverkon toiminta, jolloin vastataan tutkimuskysymykseen kolme.

Työn 5. luvussa esitellään leijupetikattilan minimikuorman- ja säätövastekokeen tulokset, ajomallin verifiointi, eri ajomallien säästöt höyryntuotannossa ja uudet säätöparametrit höyryverkon ohjaukseen. Näin vastataan neljänteen tutkimuskysymykseen. Työn 5. lu-

vussa pohditaan myös työn tulosten oikeellisuutta ja arvioidaan, miten tehdyt yksinkertaistukset ja oletukset vaikuttivat lopputuloksiin. Lisäksi esitetään parannusehdotuksia mahdolliseen lisätutkimukseen. Luku 6 esittää työn keskeiset johtopäätökset.

## 2. SÄHKÖISEN HÖYRYNTUOTANNON JA LEIJUPETIKATTILAN YHTEISKÄYTTÖ HÖYRVERKOSSA

Tässä luvussa tarkastellaan sähköistä höyryntuotantoa ja -varastointia sekä leijupetikattilan roolia höyryverkossa. Aluksi esitellään perinteinen höyryntuotanto leijupetikattiloilla. Tämän jälkeen syvennyttään höyryakun ja sähkökattiloiden toimintaan erillisinä laitteina ja tarkastellaan höyryakun sähköistämistä sähkövastuksilla. Lopuksi tarkastellaan kaikkien yhdistämistä höyryverkossa ja höyryverkon toimintaa.

### 2.1 Leijupetikattilat ja niiden ominaisuudet

Leijupetikattilat voidaan jakaa kierto- ja kuplaleijupetikattiloihin. Leijupetikattilassa peti koostuu pienistä jyvistä, kuten piioksidihiekasta tai granulista. Peti on aluksi paikallaan, kunnes pohjasta aletaan syöttämään ilmaa. Tätä ilmaa kutsutaan primääri-ilmaksi. Ilman syöttäminen pedin pohjaan aiheuttaa petimateriaalin leijumisen. (Khan ym., 2009.) Leijuvan petimateriaalin päälle syötetään polttoaine. Palaminen johtuu kontaktista kuumiin petimateriaalin jyviin ja tasainen palaminen saadaan aikaiseksi polttoaineen tehokkaalla sekoittumisella. Ilmaa syötetään myös tulipesän eri vaiheissa palamisen tehostamiseksi. Näitä kutsutaan sekundääri- ja tertiääri-ilmoiksi. (Vakkilainen, 2017b)

Leijupetikattiloita käytettiin jo 1930-luvulla hiilen kaasutukseen. 1970-luvulla leijupetikattilat alkoivat yleistyä, koska ne mahdollistivat huonolaatuisten polttoaineiden tehokkaan polttamisen. Huonolaatuiseksi polttoaineiksi luokitellaan polttoaineet, joilla on alhainen lämpöarvo sekä korkea tuhka- ja kosteuspitoisuus. (Koornneef ym., 2007; Vakkilainen, 2017b) Leijupoltto on suosittu polttotekniikka, koska se mahdollistaa monipuolisen polttoaineiden käytön, tarjoaa korkean hyötysuhteen ja tuottaa vähemmän ympäristöpäästöjä verrattuna perinteisiin polttomenetelmiin. (Khan ym., 2009)

Mahdollisuus käyttää monenlaisia polttoaineita johtuu polttoaineen pienestä massaosuudesta koko pedin massa suhteutettuna. Vain 1–3 % pedin massasta on polttoainetta, jolloin polttoaineen vaihtaminen ei aiheuta suurta muutosta petilämpötilaan. Suuri pedin massaosuus aiheuttaa myös sen, että leijupetikattilan tehoa on hidasta muuttaa. Korkea polton hyötysuhde saavutetaan suurella palamisnopeudella, joka johtuu kaasun ja kiinteän aineen tehokkaasta sekoittumisesta. Pienemmät ympäristövaikutukset johtuvat ma-

talasta polttolämpötilasta, joka on noin 700–1000 °C. Alhaisempi palamislämpötila vähentää NO<sub>x</sub>-päästöjä, koska typen ja hapen välinen reaktio vaatii korkean lämpötilan. (Basu & Bhattacharya, 2006)

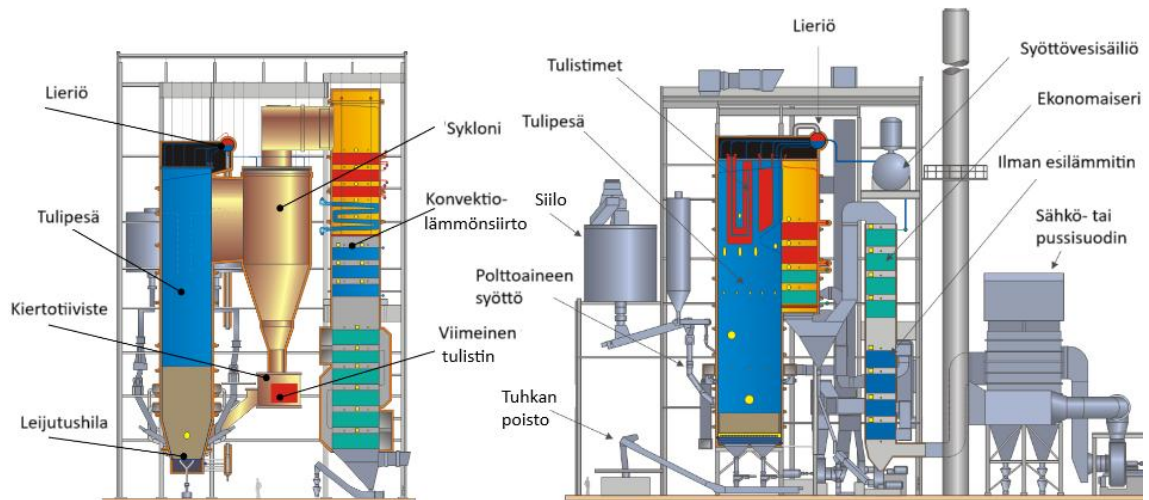
Biopolttoaineita käyttävän leijupetikattilan poltosta syntyy päästöjä. Päästöjen tarkkailusuunnitelma ja päästölupa vaaditaan polttolaitoksilta, joiden nimellisteho on yli 20 MW (Energiavirasto, ei pvm.). Päästöt, joille on asetettu rajoitukset ympäristöluvissa ovat typioksidit (NO<sub>x</sub>), rikkioksidit (SO<sub>x</sub>) ja hiukkaspäästöt. Muita syntyviä ja mitattavia päästöjä ovat hiilimonoksidi (CO), hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja suolahappo (HCl). Näiden päästöjen määrille ei ole asetettu ympäristöluvissa suoria rajoituksia, mutta hiilidioksidipäästöjä aiheuttavan toimijan on hankittava päästöoikeuksia. Päästöoikeuksia jaetaan maksutta tietyille toimijoille sekä niitä voidaan ostaa ja myydä Euroopan Unionin (EU) laajuisilla päästökaupparmarkkinoilla. Päästöoikeuksien avulla yritykset voivat kattaa hiilidioksidipäästönsä ja välttää niistä aiheutuvat seuraamukset. (Työ- ja elinkeinoministeriö, ei pvm)

Leijupetikattiloiden haasteena on, että ne vaativat tehokkaan järjestelmän kaasun ja kiinteän aineen erottamiseen toisistaan. Lisäksi kattilan sisäosat kuluvat nopeasti, varsinkin kiertoleijukattilassa. Tämä johtuu petimateriaalin suuresta nopeudesta osuessaan kattilan seinämiin. (Khan ym., 2009)

Ero leijupetikattilatyyppeiden välillä on syötetyn ilman nopeus. Kun syötetyn ilman nopeutta petimateriaalin läpi kasvatetaan, painehäviö pedissä kasvaa. Nopeutta, jolla petimateriaali alkaa leijua, kutsutaan minimileijutusnopeudeksi. Tällöin petihiukkasiin kohdistuva painovoima on yhtä suuri kuin ilmavirran nostava voima ja kattilaa kutsutaan kuplaleijupetikattilaksi. Pedin painehäviön suuruus pysyy tällöin lähes vakiona ilmansyöttönopeuden kasvaessa. Kun syöttönopeus kasvaa riittävästi, osa petimateriaalista kulkeutuu ulos polttokammioista, jolloin sitä kutsutaan kiertoleijupetikattilaksi. Tällöin painehäviö pedin läpi alkaa laskea. Polttokammioista poistuneet hiukkaset erotetaan savukaasun joukosta ja kierrätetään takaisin polttokammioon. (Vakkilainen, 2017b) Tässä työssä tarkasteltava kattila on kuplaleijupetikattila.

Leijupetikattilat koostuvat tulipesästä, jonka sivuilla on höyrystimet. Tulistimet ovat kattilan yläosassa ja niiden päällä on lieriö. Savukaasut luovuttavat ensin lämpöä tulistimille ja lieriölle, minkä jälkeen ne ohjataan virtaamaan alaspäin lämmittämään ekonomaiseria ja ilman esilämmittämiä. Viimeiseksi savukaasu puhdistetaan sähkösuotimilla tai pussisuotimilla ennen kuin se päästetään ulos. Polttoainetta varastoidaan siiloon tulipesän

läheisyyteen, jotta polttoaineen jatkuva syöttö saadaan varmistettua. Polttoaineesta syntyvä tuhka poistetaan tulipesän alla olevalla tuhkanpoistojärjestelmällä sekä sähkö- tai pussisuotimilla. (Vakkilainen, 2017b) Kuvassa 1 esitettynä kierto- ja kuplaleijupetikattilat.



Kuva 1. Vasemmalla on esitettynä kiertoleijupetikattila, oikealla kuplaleijupetikattila. Muokattu lähteestä (Parkkila, 2024).

Kuplaleijupetikattiloita käytetään yleensä alle 100 MW laitoksissa. Tehot vaihtelevat 20–200 MW välillä (Oakey, 2015). Petimateriaalin korkeus on 0,4–0,8 metriä, jolloin painehäviö pedin yli on 6–12 kPa ja petimateriaalin koko on 0,5–1,5 mm (Vakkilainen, 2017b). Pedin lämpötila on 700–1000 °C riippuen polttoaineesta ja kattilan tehosta (Basu & Bhattacharya, 2006; Khan ym., 2009; Koornneef ym., 2007). Leijutusilmanopeus on 1–3 m/s (Khan ym., 2009; Koornneef ym., 2007) ja yli-ilman määrä 10–40 % (Basu & Bhattacharya, 2006; Vakkilainen, 2017b). Kuplaleijupetikattilan minimikuorma on tyypillisesti 30–40% maksimitehosta (Vakkilainen, 2017b) ja kuormanmuutosnopeus on 2–10 % maksimitehosta (Kallio ym., 2016).

Kiertoleijupetikattiloiden tehot ovat yleensä 50–500 MW, mutta suurimmat voivat olla jopa 1000 MW (Oakey, 2015). Pedin lämpötila on 800–950 °C, leijutusilman nopeus 3–10 m/s ja petimateriaalin koko 0,1–0,5 mm (Koornneef ym., 2007; Vakkilainen, 2017b). Kokonaispainehäviö kattilassa on 10–15 kPa, minimikuorma maksimitehosta 25–30 % ja yli-ilman määrä 10–30% (Vakkilainen, 2017b). Kiertoleijupetikattilan tehonmuutosnopeus maksimitehosta on noin 4–7 % (Peters ym., 2021). Taulukossa 1 on esitettynä kierto- ja kuplaleijupetikattilan tyypillisiä arvoja.

Taulukko 1. Kierto- ja kuplaleijupetikattilan tyypillisiä arvoja.

	Kiertoleijupetikattila	Kuplaleijupetikattila
Tehoalue [MW]	50–1000	20–200
Petimateriaalin korkeus [m]	Koko kattilan korkeudessa	0,4–0,8
Petimateriaalin koko [mm]	0,1–0,5	0,5–1,5
Pedin lämpötila [°C]	800–950	700–1000
Leijutusilman nopeus [m/s]	3–10	1–3
Yli-ilman määrä [%]	10–30	10–40
Minimikuorma maksimitehosta [%]	25–30	30–40
Kuormanmuutosnopeus maksimitehosta [%]	4–7	2–10

Kuplaleijukattilan minimikuorman rajoitteena on petilämpötila, jonka tulisi pysyä vähintään 700 °C:ssa polttoaineen palamisen varmistamiseksi. Pienemmän kuorman saavuttaminen vaatii avustusta öljy- tai kaasupolttimilla. Myös polttoaineen kosteudella on suuri vaikutus minikuorman saavuttamiseen ilman avustavaa polttoa. Lisäksi NO<sub>x</sub>-päästöjen kasvu lämpötilan laskiessa on rajoittava tekijä. Maksimikuormassa rajoittavia tekijöitä ovat pedin lämpötilan ja päästöjen nousu. Korkeissa lämpötiloissa petimateriaalin partikkelit alkavat sintraantua, eli niiden reunat pehmenevät ja tarttuvat toisiinsa muodostaen suurempia kiinteitä rakenteita. (Vakkilainen, 2017b)

Kiertoleijupetikattilassa kiinteä petimateriaali täytyy erottaa savukaasun joukosta syklo-nilla ja palauttaa takaisin tulipesän alaosaan. Syklonin alaosassa oleva kiertotiiviste päästää petimateriaalin ja palamattoman polttoaineen takaisin tulipesään, mutta estää savukaasun pääsyn. Kiertoleijukattilan keskimääräinen lämpötila on pienempi kuin kuplaleijupetikattilan, jolloin NO<sub>x</sub>-päästöt ovat pienempiä. (Vakkilainen, 2017b)

Höyryntuotantoprosessi leijupetikattiloissa alkaa syöttöveden paineistamisella, jossa pumppu nostaa veden paineen lieriön paineen tasolle. Paine voi vaihdella 41–165 bar välillä. Paineistettu vesi lämmitetään savukaasuilla ekonomaisierissa 10–15 °C alle kiehumispisteen, minkä jälkeen se virtaa lieriölle. Lieriössä neste ja höyry ovat kylläisessä tilassa, jolloin ne voidaan erottaa toisistaan tiheyseron avulla. Nestemäinen vesi lähtee lieriön pohjasta kiertämään tulipesän seinämiä pitkin takaisin lieriölle, jolloin se höyrystyy. Höyry lähtee lieriön yläosasta tulistimille. Tulistimilla höyryn lämpötila nostetaan yli kiehumispisteen, minkä jälkeen se hyödynnetään lämmön tai sähköntuotannossa. Tulis-

taminen vähentää höyryn ennenaikaista lauhtumisen riskiä, joka johtuu paine- ja lämpöhäviöistä. Lauhtuminen aiheuttaa veden muodostumista putkistoihin ja heikentää hyötysuhdetta (Kitto & Stultz, 2005)

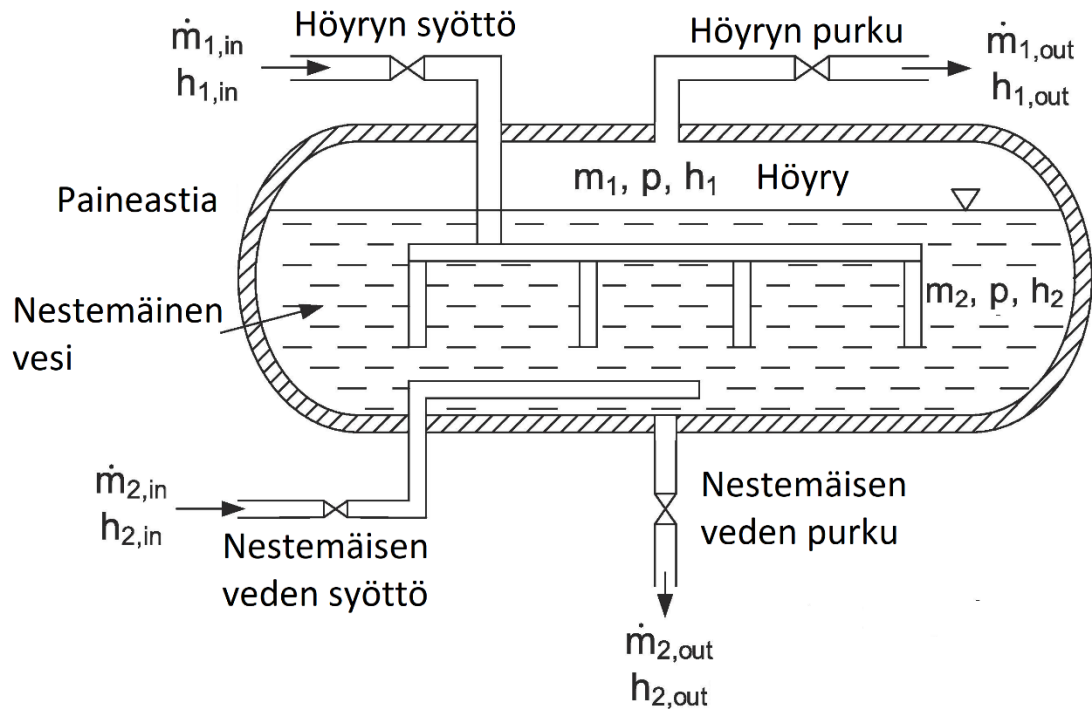
## 2.2 Höyryakku

Höyryakut ovat laitteita, joilla varastoidaan lämpöenergiaa teollisuudessa ja voimalaitoksilla. Höyryakut toimivat puskurina höyryn tuotannon ja kulutuksen välillä, tasaten niiden välistä eroa. Höyryakkujen erikoisuutena on veden käyttö sekä lämmönsiirtoaineena (höyry) että varastointiaineena (nestemäinen vesi). (Ilic ym., 2024)

Höyryakkuja on olemassa kolmenlaisia: Liukuvan paineen eli Ruthin höyryakkuja, paisuntahöyryakkuja ja syrjäytyshöyryakkuja (Ilic ym., 2024). Tässä työssä käytetty höyryakku on liukuvan paineen höyryakku.

Höyryakku on paineastia, joka sisältää vettä ja höyryä kylläisessä tilassa. Akkua ladataan, kun höyryntuotanto ylittää höyrynkulutuksen. Tällöin höyryakun paine ja lämpötila nousevat ja osa höyrystä tiivistyy vedeksi. Höyrynkulutuksen ylittäessä höyryntuotannon, höyryakkua puretaan. Tällöin höyryakun paine ja lämpötila laskevat sekä vettä alkaa höyrystyä. (Ilic ym., 2024)

Ilman höyryakkua höyryntuotannon ja -kulutuksen tulisi olla yhtä suuri joka hetki. Tällöin höyryntuotantolaitos täytyisi mitoittaa suurimman kulutuksen mukaan. Höyryntuotantolaitos ei yleensä kykene reagoimaan nopeasti muuttuviin kulutustarpeisiin. Kulutuksen laskiessa ylimääräinen höyry menisi hukkaan ja kulutuksen kasvaessa tarvittaisiin nopeasti reagoivia aputuotantolaitoksia. Näin ollen höyryakku nostaa prosessin hyötysuhdetta ja vähentää höyryntuotantolaitoksen räsitusta. (Biglia ym., 2017; Stevanovic ym., 2012) Kuvassa 2 on esitetty höyryakun toimintaperiaate.



Kuva 2. Ruthin höyryakun toimintaperiaate. Muokattu lähteestä (Stevanovic ym., 2012).

Höyryakun latausvaiheessa akun nestemäiseen osaan syötetään höyryvirta  $\dot{m}_{1, in}$ , jonka ominaisentalpia on  $h_{1, in}$ . Höyryn lämpöenergia siirtyy tiivistymisen kautta veteen kasvattaen akun energiatiheyttä. Nestemäisen veden massan  $m_2$  tulisi olla suuri, jotta energiaa pystyttäisiin varastoimaan mahdollisimman paljon. Nestemäisen veden massa voikin olla jopa 90 % höyryakun kokonaistilavuudesta. Varastoidun höyryn purkamisessa höyryakusta vapautetaan höyryvirta  $\dot{m}_{1, out}$ , jolla on ominaisentalpia  $h_{1, out}$ . Purkamisen seurauksena höyryakun paine laskee aiheuttaen veden höyrystymisen. Nestemäistä vettä lisätään nestepinnan laskiessa halutun tason alle. Nestemäisen veden poistoputkea käytetään höyryakun tyhjentämiseen huoltotilanteissa. (Ilic ym., 2024)

Höyryakun latausta ja purkamista voidaan mallintaa tasapaino- ja epätasapainomalleilla. Tasapainomallissa nesteen ja höyryn oletetaan olevan termodynaamisessa tasapainossa. Tällöin höyryllä ja nesteellä on sama lämpötila, joka on yhtä kuin paineen määräämä kyllästyslämpötila. Lisäksi oletetaan, että höyrystyminen ja tiivistyminen tapahtuvat äärettömän nopeasti. Oletuksen seurauksena uusi termodynaaminen tasapainotila saavutetaan välittömästi muutoksen tapahtuessa. Todellisuudessa nopeat lataukset ja purkamiset aiheuttavat tähän epätasapainotilan, jossa neste ja höyry ovat eri lämpötiloissa. Epätasapainomallissa huomioidaan tämä sekä oletetaan höyrystymiselle ja tiivistymiselle äärellinen lukuarvo. Höyryakun ja sen automaatiojärjestelmän suunnittelussa käytetään usein tasapainomallia, vaikka se aiheuttaakin ongelmia höyryakun ohjauksessa. (Stevanovic ym., 2015) Tässä työssä käytetään tasapainomallia.

Tasapainomallissa nesteen ja höyryn massataseet höyryakussa voidaan esittää yhtälön (1) mukaisesti.

$$\dot{m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (1)$$

, jossa  $\dot{m}_{in}$  on veden massavirta höyryakkuun ja  $\dot{m}_{out}$  on veden massavirta ulos höyryakusta (Stevanovic ym., 2015).

Koko höyryakun massan muutos kuvataan yhtälöllä (2).

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (2)$$

, jossa  $m$  on koko höyryakun nesteen ja höyryn massa,  $\dot{m}_1$  on höyryakun höyryn massatase yhtälön (1) mukaisesti ja  $\dot{m}_2$  on höyryakun nesteen massatase yhtälön (Error! Reference source not found.) mukaisesti.

Höyryn osuus höyryakussa voidaan laskea yhtälöllä (3).

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} \quad (3)$$

, jossa  $v$  on koko höyryakun höyry-vesi seoksen ominaistilavuus,  $v'$  on höyryakun nesteen ominaistilavuus ja  $v''$  on höyryakun höyryn ominaistilavuus. (Ilic ym., 2024; Stevanovic ym., 2015)

Höyryn osuuden avulla pystytään laskemaan ominaisentalpia höyryakun höyry-vesi seokselle yhtälöllä (4).

$$h = h' + xr \quad (4)$$

, jossa  $h'$  on kylläisen nesteen entalpia ja  $r$  on veden höyrystymislämpö. Ominaisentalpian yksikkö on kJ/kg, joten höyryakun kokonaismassalla  $m$  kertomalla saadaan höyryakun kokonaisentalpia  $H$ . (Stevanovic ym., 2015)

Höyryakun energiatase on esitetty yhtälössä (5).

$$\frac{dmh}{dt} = (\dot{m}_1 h_1) + (\dot{m}_2 h_2) + V \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

, jossa  $V$  on höyryakun tilavuus ja  $\frac{dp}{dt}$  on höyryakun paineenmuutosnopeus. (Stevanovic ym., 2015)

Höyryakun energiatase (5) voidaan differentioida yhtälön (6) mukaisesti (Stevanovic ym., 2015).

$$\frac{dH}{dt} = M \frac{dh}{dt} + h \frac{dM}{dt} \quad (6)$$

Koko höryrakun massan muutos on esitetty yhtälössä (2). Avataan ominaisentalpian derivaatta yhtälössä (7) (Stevanovic ym., 2015).

$$\frac{dh}{dt} = \left( \frac{dh'}{dp} + x \frac{dr}{dp} \right) \frac{dp}{dt} + r \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

Höyryn osuuden derivaatta on esitetty yhtälössä (8) (Stevanovic ym., 2015).

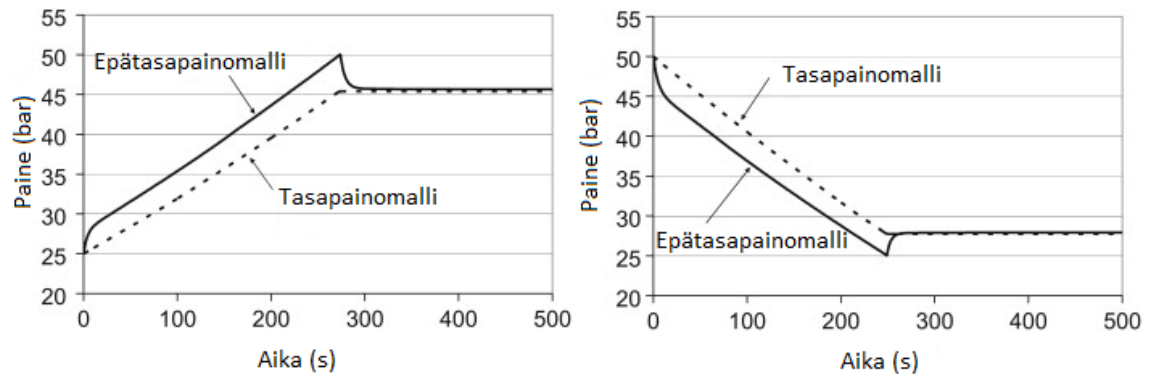
$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{M} \frac{v}{v'' - v'} \frac{dM}{dt} - \left( \frac{1}{v'' - v'} \frac{dv'}{dp} + \frac{v - v'}{(v'' - v')^2} \frac{d(v'' - v')}{dp} \right) \frac{dp}{dt} \quad (8)$$

Koska tasapainomallissa oletetaan termodynaaminen tasapaino, veden ja höyryn ominaisilavuudet, kyllästysentalpia sekä höyrystymislämpö riippuvat ainoastaan paineesta. Sijoittamalla yhtälöt (6), (7) ja (8) yhtälöön (5) saadaan uusi yhtälö (9) differentiaalilaskentaan paineelle. (Ilic ym., 2024; Stevanovic ym., 2015)

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(\dot{m}_1 h_1) * (\dot{m}_2 h_2) + \left( \frac{rV}{v'' - v'} - h \right) (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)}{M \left( \frac{dh'}{dp} + \frac{V}{M} \frac{v'}{v'' - v'} \frac{dr}{dp} - \frac{r}{v'' - v'} \frac{dv'}{dp} - r \frac{V}{(v'' - v')^2} \frac{d(v'' - v')}{dp} \right) - V} \quad (9)$$

Tärkeimmät yhtälöt tasapainomallissa ovat (9) ja (2). Selvittämällä näiden yhtälöiden arvot ajanhetkellä nolla, voidaan numeerisesti laskea höryrakun höyryn osuus  $x$  kokonaisuksen massan  $M$  avulla. Selvittämällä paineen arvon, saadaan selville kaikki tarpeelliset kylläisen höyryn arvot: lämpötila, ominaisentalpia ja ominaistilavuus. (Ilic ym., 2024)

Ero lataus- ja purkutilanteessa tasapaino- ja epätasapainomallien välillä on esitetty Stevanovic ym. (2012) tutkimuksessa. Tutkimuksessa  $64 \text{ m}^3$  höryrakun nestetilavuus on alkutilanteessa  $32 \text{ m}^3$ . Neste ja höyry ovat termodynaamisessa tasapainotilassa. Ensin höryakkua ladataan höyryvirralla  $10 \text{ kg/s}$ , jolloin paine nousi  $25 \text{ bar}$  alkupaineesta  $50 \text{ bar}$ . Tämän jälkeen höryakkua purettiin  $50 \text{ bar}$  paineesta  $25 \text{ bar}$  samalla massavirralla. Tilannetta mallinnettiin tasapaino- ja epätasapainomalleilla. Tasapainomallissa höyrystyminen ja tiivistyminen oletettiin tuhat kertaa nopeammaksi sekä lämmönsiirtokerroin tuhat kertaa suuremmaksi. Höryrakun paineen ennusteet ovat esitettynä kuvassa 3.



Kuva 3. Höyryakun paineen ennustaminen tasapaino- ja epätasapainomallilla. Vasemmalla latausvaiheen ja oikealla purkuvaiheen aikana. Muokattu lähteestä (Stevanovic ym., 2012).

Latausvaiheen kuvasta nähdään, että lataus lopetetaan 50 bar paineessa, mutta paine laskee lopulta 45,6 bar. Purkuvaiheesta huomataan, että purkaminen lopetetaan 25 bar paineessa, mutta lopullinen paine on 27,7 bar. Tasapainomalli aliarvio paineen nousun latausvaiheessa ja yliarvio purkuvaiheessa. Jotta haluttu painetaso saavutetaan, paineen on käytävä tavoitetason yläpuolella latauksessa ja alapuolella purussa. Tämä on tärkeää huomioida höyryakun ohjausjärjestelmän suunnittelussa, jos siinä käytetään tasapainomallia. (Stevanovic ym., 2012)

Höyryakun käyttöikään vaikuttaa merkittävästi sen paineenvaihteluväli. Käyttöikää arvioidaan usein väsymisanalyysin avulla. Basquinin laki kuvaa, miten kuormituksen amplitudi vaikuttaa väsymismurtumaan johtavien syklien määrään (Kun ym., 2008) Tämä on esitettyä yhtälössä 10.

$$N_f = N_g * \left( \frac{\Delta p_g}{\Delta p_f} \right)^\alpha \quad (10)$$

, jossa  $N_g$  on alkuperäinen väsymiskesto sykleinä painevaihtelulla  $\Delta p_g$ ,  $N_f$  on uusi väsymissyklien kestonmäärä painevaihtelulla  $\Delta p_f$  ja  $\alpha$  on materiaalikohtainen eksponentti, tyypillisesti 3–5 teräkselle.

## 2.3 Sähkökattilat

Sähkökattilat ovat usean MW:n tehoisia laitteita, jotka käyttävät sähköä kuumaa vettä tai höyryä tuottamiseksi teollisuuteen tai kaukolämpöverkkoon (Danish Energy Agency, 2016).

Sähkökattiloilla tuotetun lämmön määrä Suomessa vuonna 2022 oli 58 GWh ja vuonna 2023 se oli noussut 746 GWh. Syynä sähkökattiloiden yleistymiselle on tavoite fossiilis-

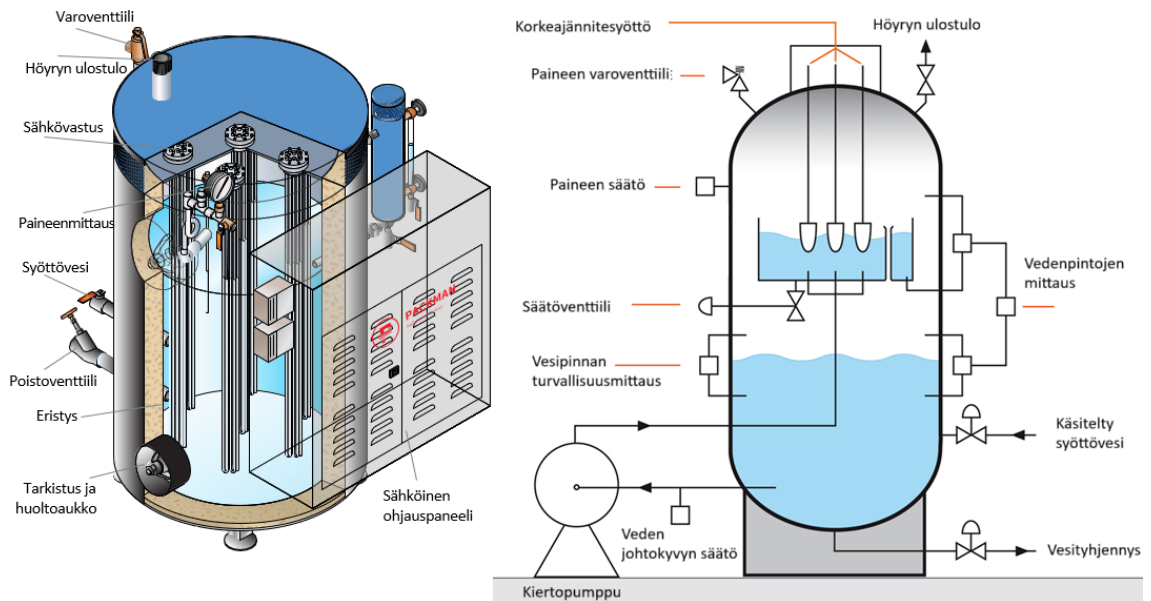
ten polttoaineiden ja biomassan kulutuksen vähentämiseksi lämmöntuotannossa. Sähkökattiloita ajetaan yleensä silloin, kun sähkö on halpaa ja tuotettu uusiutuvalla energialla. (Hiltunen, 2025)

Sähkökattiloiden etu muihin lämmöntuotantotapoihin verrattuna on niiden yksinkertainen rakenne, minkä ansiosta ne ovat luotettavia ja helppoja huoltaa. Lisäksi ne käynnistyvät alle sekunnissa, mukautuvat hyvin kuormanmuutoksiin, eivätkä vaadi polttoaineensyöttöjärjestelmää. (Danish Energy Agency, 2016)

Sähkökattiloiden heikkoutena ja vahvuutena on riippuvuus sähkönhinnasta. Tämä rajoittaa sähkökattiloiden käytön ajankohtiin, jolloin sähkö on edullista. Tämän vuoksi sähkökattilat eivät sovellu jatkuvaan peruskuorman tuotantoon. Toisaalta matalat sähkönhinnat mahdollistavat kustannustehokkaan höyryntuotannon. (Danish Energy Agency, 2016)

Sähkökattiloiden määrän lisääntyminen aiheuttaa sähkönsyönnän kasvua, josta seuraa sähkönsyönnän nousu ja sähkökattiloiden kannattavuuden heikkeneminen. Toisaalta korkeammat sähkönhinnat parantavat uusiutuvan energiantuotannon kannattavuutta, mikä voi lisätä investointeja tuotantokapasiteettiin ja johtaa sähkönsyönnän laskuun.

Sähkökattilat voidaan jakaa kahteen tyyppiin: vastuskattilat ja elektrodikattilat. Vastuskattiloita käytetään yleensä pienemmissä alle 5 MW toteutuksissa ja ne ovat yhdistettynä 400 tai 690 V pienjänniteverkkoon. Elektrodikattiloita käytetään yleensä suuremmissa 3–70 MW kokoluokissa ja ne ovat yhdistettynä 10–15 kV keskijänniteverkkoon. Molempien sähkökattilatyyppeiden hyötysuhteet vaihtelevat 95–99,9 % välillä. (Danish Energy Agency, 2016; Maruf ym., 2022) Tässä työssä käytetty sähkökattilatyypin on vastussähkökattila. Kuvassa 4 on esitetty sähkökattilatyypit.



Kuva 4. Sähkökattilatyypit. Vasemmalla vastuskattila. Muokattu lähteestä (Packman Industrial Group, ei pvm.). Oikealla elektrodikattila. Muokattu lähteestä (PARAT IEH, ei pvm.).

Vastuskattilassa kuuma vesi tai höyry tuotetaan sähkövastusten avulla. Vastukset sijaitsevat vesipinnan alapuolella ja kytkettäessä jännitteiksi ne lämpenevät. Lämpeneminen aiheutuu elektronien törmäyksistä vastusmateriaalin seinämiin. (Maruf ym., 2022) Vastusten lämpöenergia siirtyy johtumalla veteen ja näin lämmittää sitä. Lämpötehoa siirtyy veteen vastusten hyötysuhteen verran. Muodostunut höyry tai lämmennyt vesi poistetaan kattilan yläosasta ja kylmä vesi tuodaan tilalle alaosaan. (Wallace & Spielvogel, 1974) Vastusten tuottama lämpöteho veteen voidaan laskea yhtälöllä 11.

$$P = \eta_e RI^2 \quad (11)$$

, jossa  $I$  on sähkövirta,  $R$  on resistanssi ja  $\eta_e$  on sähkövastusten hyötysuhde.

Elektrodikattilan yläosasta on ripustettu metalliset korkeajännitteiset elektrodit. Elektrodit ovat upotettuna osittain tai kokonaan veteen. Elektrodien välillä on jännite-ero, jolloin sähkövirta kulkee veden läpi elektrodilta toiselle. Koska vesi toimii sähköä johtavana väliaineena, sen resistanssin ansiosta syntyy lämpöenergiaa yhtälön 11 mukaisesti. Höyrystynyt vesi poistetaan kattilan yläosasta ja uusi syöttövesi tulee kattilan alaosaan (Merritt, 2016)

Vastuskattilan tehonsäätö voidaan yksinkertaisimmillaan toteuttaa sähkökontaktoreiden avulla siten, että jokaiselle vastukselle on oma releohjattu kontaktori. Releiden avulla yksittäisten vastusten sähköpiiri voidaan avata tai sulkea, jolloin kattilan kokonaistehoa voidaan säätää askeleissa. (Wallace & Spielvogel, 1974)

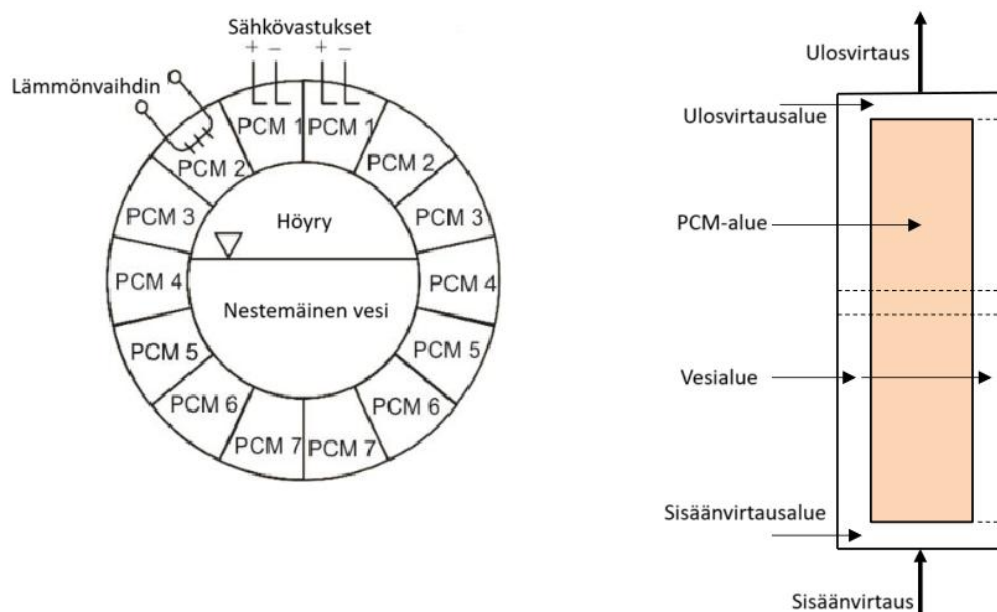
Toinen vaihtoehto tehonsäädölle ovat tyristorit. Tyristorit eivät johda sähköä ennen kuin hilalle annetaan ohjausimpulssi. Ohjausimpulssin ajoitusta muuttamalla voidaan ohjata, kuinka suuren osan ajasta tyristori on johtavassa tilassa. Näin ollen sähkövirran suuruutta vastuksen läpi saadaan muutettua liukuvasti. (Lutz ym., 2018)

Elektrodikattilassa vesi on kahdessa eri nestetilavuudessa, joista ylemmässä sijaitsevat elektrodit. Tehonsäätö tapahtuu lisäämällä tai poistamalla vettä ylätilavuudesta, jolloin elektrodien kosketuspinta-ala veden kanssa muuttuu. (Wallace & Spielvogel, 1974) Suuremmalla kosketuspinta-alalla veden läpi kulkee suurempi sähkövirta, jolloin yhtälön 11 mukaisesti teho kasvaa.

## 2.4 Höryakun sähköistäminen

Aikaisemmissa luvuissa esiteltiin höryakku ja sähkökattila erillisinä laitteina. Tässä luvussa on tarkoitus käydä läpi niiden yhdistelmän mahdollisuuksia.

Vaikka aikaisempaa tutkimusta höryakun muuntamisesta sähkökattilaksi ei ole, erilaisia höryakun sähkölämmitys mahdollisuuksia on tutkittu. Dusek & Hofmann, (2018) ja Dusek ym. (2019) ovat tutkineet höryakun ympäröimistä faasimuutosmateriaalilla (PCM, Phase Change Material) ja sähkövastusten lisäämistä materiaalin sisälle. Abdel-salam ym. (2017) ja Underwood ym. (2018) ovat tutkineet sähkövastusten ja faasimuutosmateriaalin lisäämistä vesienenergiavaraston sisälle. Kuvassa 5 on esitettyinä nämä energiavarastot.



Kuva 5. Vasemmalla höryakku ympäröitynä faasimuutosmateriaalilla. Muokattu lähteestä (Dusek & Hofmann, 2018). Oikealla vastuksellinen faasimuutosmateriaali vesienenergiavaraston sisällä. Muokattu lähteestä (Underwood ym., 2018).

Sähkövastusten asentaminen höyryakkuun mahdollistaa höyryn tuotannon ja varastoinnin yhdessä kokonaisuudessa. Höyryakkuun sijoitetaan sähkövastukset nestepinnan alapuolelle samalla tavalla kuin vastussähkökattilassa. Näin vältetään mahdollinen vastusten ylikuumentuminen, koska nestemäisen veden lämmönsiirtokerroin on suurempi kuin vesihöyryn. (Wagner & Ranta, 1994).

Sähkökattilat ovat useimmiten pystysuuntaisia ja höyryakut vaakasuuntaisia paineastioita. Pystysuuntaisella paineastilla saadaan pienennettyä tarvittavaa lattiatilaa ja kasvatettua luonnollisen konvektion lämmönsiirtoa (Fangkuai, 2023). Vaakasuuntaisella paineastialla saadaan maksimoitua höyryn ja nesteen kosketuspinta-ala, joka nopeuttaa höyrystymistä (Biglia ym., 2017).

Luonnollisen konvektion suuruutta voidaan kasvattaa vaakatasossa olevassa sähköistetyssä höyryakussa asettamalla vastukset samalle sivulle, jolloin lämpötilaero saadaan kasvamaan akun sisällä. Näin virtaukset höyryakun sisällä kasvavat ja vesi saadaan tasaisemmin lämmitettyä. Syy tasaisemmalle lämpenemiselle johtuu konvektion lämmönsiirron tehokkuudesta verrattuna johtumiseen. (Kapjor ym., 2020)

Sähkövastusten asentaminen höyryakkuun edellyttää höyryakun alaosan eristeiden purkamisen sekä reikien poraamista teräsrunkoon. Rei'istä sähkövastukset asennetaan siten, että vastuslanka sijoittuu höyryakun sisäpuolelle ja jännitekytkennät jäävät ulkopuolelle. Tällä ratkaisulla sähkövastukset voidaan liittää matalajänniteverkkoon höyryakun ulkopuolelta. Ulkopuolelle jäävät kytkennät suojataan erillisellä rakenteella, jotta ne eivät altistu sääolosuhteille.

Höyryakun ja sähkökattilan yhdistelmällä voidaan reagoida nopeasti sähkön hinnan vaihteluihin ja muuttaa vastusten tehoa sen mukaisesti. Samalla höyryakku toimii puskurina, joka tasaa tuotannon ja kulutuksen eroja. Yhdistetyllä kokonaisuudella pystytään yksinkertaistamaan putkistoja ja vähentämään tarvittavan materiaalin määrää. Näin saadaan pienennettyä investointikustannuksia ja tilantarvetta.

## **2.5 Leijupetikattila ja sähkövastuksellinen höyryakku osana höyryverkkoa**

Höyryverkko koostuu höyryakusta, höyrylinjoista, ruiskutusvesistä, syöttövesisäiliöstä sekä reduktio-, sulku-, säätö- ja varoventtiileistä. Lisäksi höyryverkkoon kuuluu höyryn tuottajat ja -kuluttajat.

## **Reduktio-, sulku-, säätö-, ja varoventtiilit**

Venttiileitä käytetään teollisuuden prosessinohjausjärjestelmissä. Niiden tehtävänä on säätää prosessimuuttujia: painetta, lämpötilaa ja virtausta. Ne reagoivat ohjausjärjestelmän käskyihin minimoiden häiriöiden vaikutukset lopputuotteessa. (Emerson Automation Solutions, 2019)

Höyryntuotantolaitoksissa tuotetun höyryn paine on usein korkeampi kuin yksittäisten kulutuskohteiden vaatima paine. Ennen höyryn ohjaamista käyttöpaikalle paine täytyy alentaa sopivalle tasolle. Tähän käytetään reductioventtiilejä eli paineenalennusventtiilejä, jotka alentavat höyryn paineen halutulle tasolle. Venttiilin toiminta perustuu virtauspaineiden seurantaan, jonka perusteella venttiilien avausta säädetään. (TLV, 2022.) Entalpia ei muutu venttiilin läpi, joten paineen alentuessa höyry tulistuu.

Sulkuventtiilit ovat mekaanisia venttiilejä, joiden tarkoituksena on joko täysin sallia tai estää höyryn virtaus putkistossa. Ne eivät siis sovellu virtauksen liukuvaan säätöön. Sulkuventtiilityypit ovat pallo- ja porttiventtiilit, jotka valitaan käyttökohteen mukaan. (Kolstad, 2024)

Säätöventtiilien päätarkoituksena on muuttaa virtauksen määrää putkessa. Kun kohteen kulutus muuttuu, säätöventtiili säätelee höyryn virtausta muuttamalla virtauskanavan poikkipinta-alaa. (Emerson Automation Solutions, 2019)

Varoventtiilit ovat turvallisuuskomponentteja, jotka suojaavat paineastioita ja putkistoja ylipaineelta. Varoventtiilit koostuvat yleensä jousikuormitteisesta mekanismista, joka pitää venttiilin suljettuna normaalissa paineessa. Kun paine nousee asetetulle rajalle, venttiili avautuu ja vapauttaa ylimääräisen paineen. Kun paine palautuu normaalille tasolle, venttiili sulkeutuu itsestään. (Antaki, 2023)

## **Höyrylinjat**

Höyrylinjat ovat eri painetasoissa höyryä kuljettavia putkistoja. Höyrylinjat muodostavat höyryverkon perustan, johon kaikki muut komponentit ovat yhteydessä. Höyryputkiston päätehtävänä on kuljettaa höyryä höyryntuottajilta höyrynkuluttajille. Höyryn ominaistilavuus muuttuu merkittävästi paineen mukaan, joka vaikuttaa vaadittavaan putkistojen poikkipinta-alaan. Paine kannattaa pitää mahdollisimman korkealla, jolloin tarvittava putkikoko on pienempi. (Spirax-sarco, 2007)

Höyryputkissa tapahtuu kitkasta aiheutuvia painehäviötä sekä lämmön johtumisesta aiheutuvia lämpöhäviötä. Tämän seurauksena osa höyrystä lauhtuu putkilinjan pohjalle. Lauhdevesi voi aiheuttaa vesivasaran, jolloin höyry törmää lauhteeseen ja tiivistyy nope-

asti. Tästä seuraa äkillinen paineenmuutos, jolloin vesi lähtee liikkeelle suurella nopeudella aiheuttaen vahinkoa putkistolle. Siksi höyrylinjat tulee rakentaa siten, että vesi voidaan poistaa tehokkaasti. (Spirax-sarco, 2007)

Höyryverkon runkolinjaa kutsutaan myös höyrynjakotukiksi. Tähän linjaan höyryn kulutuskohteet liittyvät pienempi paineisilla höyrylinjoilla. Runkolinjasta höyry otetaan aina putken yläosasta, jotta lauhtunut vesi ei tule mukaan. (Spirax-sarco, 2007)

### **Syöttövesisäiliö**

Syöttövesisäiliön keskeisinä tehtävinä ovat veden varastointi, esilämmitys ja liuenneiden kaasujen poistaminen ennen veden johtamista höyrykattilaan. Säiliö toimii puskurina höyrynkulutuksen vaihteluille mahdollistaen tasaisemman syötön kattilalle. Syöttövesisäiliöön johdetaan menetetyn veden tilalle kylmää lisävettä sekä lämmönlähteinä lauhtevettä ja höyryä. Näin syöttöveden lämpötilaa saadaan nostettua, mikä pienentää kattilalta tarvitsemaa lämpötehoa ja parantaa prosessin kokonaishyötysuhdetta. (Vakkilainen, 2017a)

Veteen liuenneet happi ja hiilidioksidin poistetaan, koska nämä kaasut aiheuttavat korroosiota höyryjärjestelmässä. Ne poistetaan ilmastuksen avulla, jossa säiliöön johdetaan höyryä, joka syrjäyttää veteen liuenneet kaasut poistaen ne säiliön yläosassa olevasta ilmanpoistimesta. (Vakkilainen, 2017a)

Rakenteellisesti syöttövesisäiliö on yleensä vaakasuuntainen paineastia. Säiliö mitoiteetaan niin, että sen tilavuus riittää tyypillisesti 15–45 minuutin vesivirrälle kattilan maksimiteholla. Säiliön vesitilavuus ei saa laskea alle 500–600 mm pohjasta mitattuna, jotta höyry ei pääse syöttövesipumpuille. Vastaavasti yläosasta jätetään tyhjää tilaa 400–600 mm kaasujen poistamista varten. (Vakkilainen, 2017a)

Syöttöveden lämpötila säiliössä pidetään tyypillisesti noin 105–130 °C välillä. Tällöin vesi ei vielä höyrysty, mutta se on riittävän kuumaa syötettäväksi kattilaan. Veden lämpötilan ja pinnankorkeuden hallinta tapahtuu automaattisesti säätöjärjestelmien avulla, jotka seuraavat virtaamia, lämpötilaa ja painetta säiliössä. (Vakkilainen, 2017a)

### **Ruiskutusvesi**

Höyryn tulistusasteen kasvaessa reduktioventtiileissä, höyryn lämpötila saattaa olla halutun tason yläpuolella. Tyypillisesti lämpötilaa alennetaan ruiskutusveden avulla. Ruiskutusvesi syötetään höyryn joukkoon pieninä pisaroina. Höyryn ja veden seos lähestyy tasapainotilaa vesipisaroiden lämmitessä ja höyryn jäähtyessä. Vesi höyrystyy saavuttaessaan kyllästyslämpötilan, jolloin höyry jäähtyy entisestään. Lopulta kaikki vesi on

höyrystynyt muutaman metrin päässä ruiskutuksen syöttökohdasta ja höyryn lämpötila on laskenut. (Vakkilainen, 2017c)

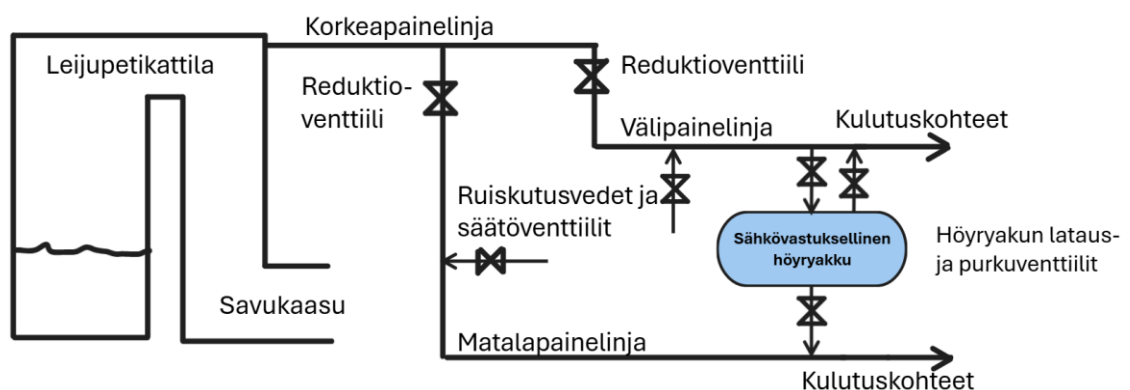
Ruiskutusvesi otetaan yleensä syöttövesisäiliöstä, joten sen lämpötila vastaa säiliön lämpötilaa. Ruiskutusveden määrää säädetään säätöventtiilillä seuraten höyryn lämpötilaa. Liiallinen ruiskutusveden määrä johtaa höyryn ylijäähtymiseen ja sen osittaiseen lauhtumiseen nesteeksi. (Vakkilainen, 2017c)

### Voimalaitoksen höyryverkko

Leijupetikattilalla tuotetaan korkeapaineista höyryä, jonka painetta voidaan laskea reduktioventtiilien avulla välipaine- ja matalapainelinjoihin. Toinen vaihtoehto on johtaa korkeapaineinen höyry turbiinin läpi, jolloin voidaan tuottaa sähköä. Tässä työssä keskitytään turbiinittomaan laitokseen. Höyryakku toimii yleensä tuotannon ja kulutuksen tasapainottajana välipaine- ja matalapainelinjojen välillä. (Stevanovic ym., 2015).

Tavallisesti höyryakkua ladataan välipainelinjasta ja puretaan matalapainelinjaan, jotta välipaine- ja matalapainelinjojen paineet saadaan pidettyä mahdollisimman tasaisina (Stevanovic ym., 2015). Kulutuksen laskiessa paine lähtee kasvamaan höyrylinjoissa. Leijupetikattilalla kestää reagoida tuotannon pienentämiseen, joten höyryakkua ladataan ylimääräisellä höyryllä ja paineenmuutos saadaan stabiloitua. Kulutuksen kasvaessa höyryakusta puretaan höyryä, jotta leijupetikattila ehtii reagoimaan höyrytehon muutokseen ja liiallinen paineenmuutos höyryverkossa saadaan estettyä.

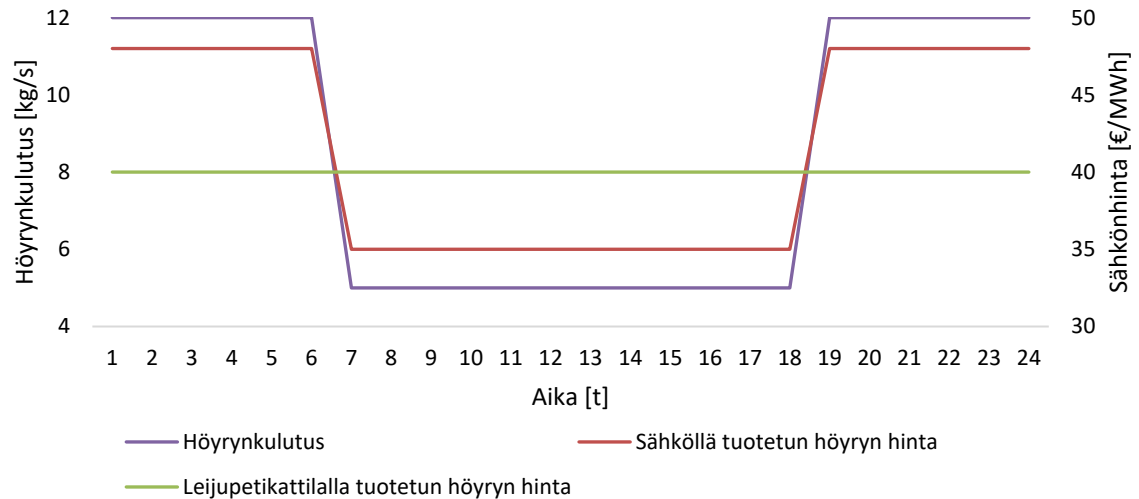
Höyryakun sähköistämällä mahdollistetaan höyryakun paineen kasvattaminen yli välipainelinjan painetason ja purkaminen välipainelinjaan. Kuvassa 6 on esitettyä esimerkki voimalaitoksen höyryverkosta, jossa on sähköistetty höyryakku.



Kuva 6. Leijupetikattilan ja sähköistetyn höyryakun muodostama höyryverkko.

Höyryakun sähköistäminen luo uusia tilanteita, joissa leijupetikattilalta vaaditaan säätökykyä. Esimerkiksi voi esiintyä tilanteita, jolloin sähkönhinta ja höyrynkulutus laskevat

samanaikaisesti, joten sähkövastukset käynnistyvät ja kattilan tehoa täytyy laskea. Toisaalta sähkön hinnan nousu samanaikaisesti höyrynkulutuksen kasvun kanssa edellyttää, että kattila pystyy nopeasti lisäämään tuotantoaan. Nämä tilanteet ovat esitettyinä kuvassa 7.



Kuva 7. Ensin sähköhinnan ja höyrynkulutuksen samanaikainen laskeminen. Sitten sähköhinnan ja höyrynkulutuksen samanaikainen nouseminen.

Sähkövastusten aktivoituessa höyryakun purkua höyrylinjoihin on lisättävä, jotta sen paine ei kasva liikaa. Höyrynkulutuksen laskiessa nopeammin kuin leijupetikattila pystyy nostamaan tehoaan, ylimääräinen höyry on puhallettava ulos tai syötettävä höyryakkuun, mikäli höyryakun paine on alle välipainelinjan. Kolmas vaihtoehto on rajoittaa sähkövastusten tehoa, jotta höyryakun paineen nousu saadaan rajoitettua. Leijupetikattilan teho höyryakkuun purettaessa on esitettyinä yhtälössä 12.

$$P_{FB} = P_C - P_{SA} \quad (12)$$

, jossa  $P_{FB}$  on leijupetikattilan höyryntuotanto,  $P_C$  on tuotantolaitoksen höyrynkulutus ja  $P_{SA}$  on höyryakun syöttämä höyry höyryverkkoon.

Pienellä sähköhinnalla ja kokonaiskulutuksella voi syntyä tilanteita, jolloin leijupetikattilan minimikuorma voi rajoittaa höyryakun purkutehoa. Jos leijupetikattilan teho on minimirajalla, höyryakun purkutehoa on pienennettävä, jotta höyrylinjojen paine ei nouse liikaa. Purkutehon rajoituksessa höyryakun paine alkaa nousta, ja sen lähestyessä ylärajaa joudutaan sähkövastusten tehoa rajoittamaan tai ulospuhaltamaan ylimääräinen höyry.

Höyrynkulutuksen ja sähköhinnan kasvaessa samanaikaisesti, sähkövastukset sammutetaan ja höyryakun paine lähtee laskemaan. Leijupetikattilan täytyy nostaa tehonsa tasolle  $P_{FB} = P_C$  ennen kuin höyryakun varaus laskee alle paineen alarajan. Oletetaan tässä tarkastelussa, että höyrynkulutus ja höyryakun purkuteho muuttuvat lineaarisesti

aikavälillä  $\Delta t$ . Leijupetikattilalta vaadittava tehonmuutosnopeus voidaan esittää yhtälön 13 mukaisesti.

$$\frac{P_{FB}}{\Delta t} = \frac{(P_{1,C} - P_{1,SA}) - (P_{a,C} - P_{a,SA})}{\Delta t} \quad (13)$$

, jossa  $P_{1,C}$  on höyryn kokonaiskulutus loppuhetkellä ja  $P_{a,C}$  alkuhetkellä sekä  $P_{1,SA}$  höyryakun syöttämä höyryteho loppuhetkellä ja  $P_{a,SA}$  alkuhetkellä.

Yhtälöstä 13 nähdään, että tehonmuutosnopeuteen voidaan vaikuttaa ainoastaan muuttamalla höyryakun purkutehoa loppuhetkellä. Kulutuksen muutokseen ei voida vaikuttaa, eikä höyryakun purkutehoon aloitushetkellä.

Höyrynkulutuksen ja sähkönhinnan samanaikaisessa laskemisessa leijupetikattilalta vaadittava tehonmuutosnopeus on negatiivinen. Yhtälön 13 perusteella voimme vähentää tehonmuutostarvetta pienentämällä höyryakun purkutehoa loppuhetkellä. Tällöin höyryakun paine nousee nopeammin, mikä voi johtaa sähkövastusten tehon rajoittamiseen tai ylimääräisen höyryn ulospuhallukseen. Höyryakun täyttymisnopeus saadaan yhtälöllä 14.

$$t_{SA} = \frac{E(p_{max}) - E(p)}{P_e \eta_e - P_{avg,SA}} \quad (14)$$

, jossa  $P_e$  on sähkövastusten teho,  $\eta_e$  on sähkövastusten hyötysuhde,  $E(p_{max})$  on höyryakun energiasisältö suurimmassa sallitussa paineessa,  $E(p)$  on höyryakun energiasisältö aloituspaineessa,  $P_{avg,SA}$  on höyryakun höyryverkkoon syöttämän höyryn määrän keskiarvo kyseisellä aikavälillä.

Höyryakun täyttymisnopeutta voidaan siis hidastaa kasvattamalla höyryakun maksimienergiasisältöä, pitämällä aloitusenergiasisältö mahdollisimman alhaisena, pienentämällä sähkövastusten tehoa tai kasvattamalla keskimääräistä purkutehoa aikavälillä.

Kun höyrynkulutus ja sähkönhinta kasvavat samanaikaisesti, leijupetikattilalta vaadittava tuotannonmuutosnopeus on positiivinen. Yhtälön 13 mukaisesti tätä muutostarvetta voidaan vähentää kasvattamalla höyryakun purkutehoa loppuhetkellä. Suurempi purkuteho nopeuttaa höyryakun paineen laskua ja voi johtaa tilanteeseen, jossa höyrynkulutus on suurempi kuin höyryntuotanto. Tämä tapahtuu, jos höyryakun energiasisältö saavuttaa alarajansa ennen kuin leijupetikattila ehtii nostaa tuotantoaan kulutuksen tasolle. Höyryakun tyhjenemisnopeus saadaan yhtälöllä 15.

$$t_{SA} = \frac{E(p) - E(p_{min})}{P_{avg,SA}} \quad (15)$$

, jossa  $E(p_{min})$  on höyryakun energiasisältö pienimmässä sallitussa paineessa.

Höyryakun purkunopeutta voidaan siis hidastaa pienentämällä höyryakun minimienergiasisältöä, pitämällä aloitusenergiasisältö mahdollisimman korkeana tai pienentämällä keskimääräistä purkutehoa. Käytännössä yhtälöissä 14 ja 15 höyryakun keskimääräistä purkutehoa rajoittaa leijupetikattilan maksimi tehonmuutosnopeus, joten sitä ei voida muuttaa. Höyryakun energiasisällön maksimiarvoa  $E(p_{\max})$  voidaan kasvattaa nostamalla höyryakun nestetilavuuden osuutta kokonaistilavuudesta.

Leijupetikattilan tehonmuutosnopeus ja minimikuorma sekä höyryakun maksimi- ja minimienergiasisältö määrittävät yhdessä, miten sähkövastuksia voidaan hyödyntää. Lisäksi on huomioitava, että höyryakun aloitusenergiasisältöön liittyvät tavoitteet ovat keskenään ristiriidassa. Yhtälössä 14 halutaan pitää energiasisältö mahdollisimman alhaisena ja yhtälössä 15 mahdollisimman korkeana. Tavoitteena onkin pitää höyryakun energiasisältö suunnilleen puolivälissä sallitun minimi- ja maksimiarvon välillä. Tämä mahdollistaa parhaan valmiuden kuormituksen kasvuun ja laskuun.

Höyryakun tehonmuutosnopeus määräytyy ensisijaisesti purku- ja latausventtiilien säätönopeuden mukaan. Tässä työssä tarkastellut venttiilit reagoivat nopeasti, joten niistä ei aiheudu merkittäviä rajoitetta höyryakun toimintaan. Purkutilanteessa höyryakun paine laskee ja nestettä höyrystyy. Höyrystymisprosessi on niin nopea, että sen vaikutus voidaan laskennassa sivuuttaa. Vastaavasti latauksessa höyryn tiivistyminen nesteeksi voidaan olettaa nopeaksi. Sähkövastusten kytkentänopeus on alle sekunnin, joten sitä ei tarvitse huomioida työn laskentaosuudessa.

### 3. SÄHKÖVASTUKSELLISEN HÖYRYAKUN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖMARKKINOILLA

Tässä luvussa esitellään sähkömarkkinoiden rakenne ja eri kaupankäyntipaikat, joista reservimarkkinat käsitellään tarkemmin. Lisäksi kuvataan, miten reservimarkkinoille voidaan osallistua. Lopuksi tarkastellaan sähkövastuksellisen höyryakun hyödyntämistä vuorokausi- ja reservimarkkinoilla.

#### 3.1 Sähkömarkkinoiden esittely

Sähkömarkkinoiden toimivuus on tärkeää yhteiskunnan sähkösaannin varmistamiseksi. Toimivat sähkömarkkinat ovat kustannustehokkain tapa toteuttaa sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapaino. Markkinoilla muodostuva hinta ohjaa tuotanto- ja kuluuspäätöksiä lyhyellä aikavälillä, mutta toimii myös pitkän aikavälin investointien suunnannäyttäjänä. (Fingrid, 2019)

Sähkön kysyntä ja tarjonta määräytyvät kuluttajien käyttämän ja tuottajien tarjoaman sähkön mukaan. Sähköverkkoyhtiöiden tehtävänä on mahdollistaa markkinoiden toiminta yhdistämällä tuotanto ja kulutus fyysisesti sähköverkon kautta. Kantaverkkoyhtiöt vastaavat sähkön siirrosta voimalaitoksilta suurkuluttajille ja jakeluverkkoyhtiöille, jotka puolestaan toimittavat sähkön loppuasiakkaille. (Fingrid, 2019)

Hajautetun sähköntuotannon lisääntyessä osa sähköntuotannosta tapahtuu jakeluverkoissa, jolloin myös tavalliset kuluttajat voivat osallistua sähkön tuotantoon ja myyntiin sähkömarkkinoilla. Suomi on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää sekä laajempia eurooppalaisia tukkumarkkinoita, mikä mahdollistaa laajemman markkinatoiminnan ja sähköjärjestelmän vakauden. (Fingrid, 2019) Kuvassa 1 on esitettyä sähkömarkkinoiden rakenne ja markkinapaikat.

Johdannaismarkkinat	Vuorokausimarkkinat	Reservikapasiteettimarkkinat	Päivänsisäiset markkinat	Reservienergia-markkinat	Toimitus	Taseselvitys	
Kaupankäynti							
10 vuotta - päivä eteenpäin	Huutokauppa: Huominen	Huutokauppa: Huominen	Huutokauppa ja jatkuva kaupankäynti	Reaaliaika			Toimituksen jälkeen
Ajanjaksot							
Vuosi, kvartaali, kuukausi ja viikko	Tunti	Tunti	15 min	15-60 min		Tasesähkö	

Kuva 1. Sähkömarkkinoiden rakenne ja markkinapaikat. Muokattu lähteestä (Fingrid, 2019).

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid vastaa reservikapasiteetti- ja reservienergiamarkkinoista sekä taseselvityksestä (eSett, 2022; Fingrid, 2024f). Nord Poolin, eli eurooppalaisen sähkömarkkinapaikan, vastuulla ovat vuorokausi- ja päivänsisäiset markkinat. (Nord Pool, ei pvm.). Nasdaq Commodities vastaa johdannaismarkkinoista (Nasdaq Commodities, ei pvm.).

### **Johdannaismarkkinat**

Sähkön johdannaismarkkinoilla käydään kauppaa sähkön hintaan liittyvillä johdannaistuotteilla, kuten futuureilla ja optioilla. Näiden tuotteiden avulla markkinoilla toimivat yritykset voivat suojautua sähkön hinnan vaihteluilta. Johdannaisten avulla sähkön tuottaja voi varmistaa tietyn minimihinnan myymälleen sähkölle, jos hinnat laskevat yllättäen. Vastaavasti sähkön jälleenmyyjä voi pyrkiä turvaamaan toimintansa korkeiden hintojen varalta, etenkin jos sen asiakkaiden kanssa solmitut sopimukset ovat kiinteähintaisia. Näitä johdannaista voi ostaa tai myydä pörssissä. Lisäksi voi tehdä suoraan sopimuksia toisen osapuolen kanssa. (Fingrid, 2019)

### **Vuorokausimarkkinat**

Vuorokausimarkkinoilla käydään kauppaa joka päivä seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Sähkömarkkinoilla toimivat sähköntuottajat ja -kuluttajat arvioivat kulutetun ja tuotetun sähkön määrän. Sitten he asettavat omat tarjouksensa viimeistään klo. 13:00 Suomen aikaa. Sähkön hinnan muodostus tapahtuu EUPHEMIA-algoritmin (Pan-European Hybrid Electricity Market Integration Algorithm) avulla, joka pyrkii maksimoimaan kuluttajien, tuottajien ja siirtoverkon ylijäämän. Kuluttajien ylijäämää syntyy, kun sähkö maksaa vähemmän kuin kuluttajien ostotarjoukset. Tuottajien ylijäämää syntyy, kun sähkön hinta on enemmän kuin tuottajan pyyntihinta. Siirtoverkon ylijäämää syntyy alueiden välisistä siirtokapasiteettirajoituksista, jolloin alueiden välille syntyy hintaeroja (PCR PXs & All NEMO Committee, 2024). Seuraavan päivän hinnat ovat tiedossa noin klo. 14:15. Suomi toimii omana tarjousalueenaan Euroopan sähkömarkkinalla, jolloin sähkön hinta on koko Suomessa sama. (Fingrid, 2019)

Vuorokausimarkkinoille voidaan jättää myös blokkitarjouksia. Tavalliset blokkitarjoukset kattavat vähintään kaksi peräkkäistä tuntia ja ne hyväksytään tai hylätään kokonaisuudessaan. Tarjoukset sisältävät tehon, ajan ja hinnan suuruuden. Sähkön myynnissä vuorokausimarkkinoiden hinnan keskiarvon ylittäessä blokkitarjouksen hinnan, tarjous hyväksytään kokonaisuudessaan. Hinnan keskiarvon ollessa alle blokkitarjouksen hinnan, se hylätään kokonaisuudessaan. Blokkitarjouksen ollessa sama kuin keskiarvohinta voidaan se hyväksyä tai hylätä tarjous kokonaisuudessaan. Sähkön ostossa tilanne on päinvastainen. (Nord Pool, ei pvm.-b)

Blokkitarjouksia voidaan linkittää toisiinsa, jolloin yksittäisten tarjousten hyväksyminen on riippuvainen muiden tarjousten hyväksymisestä. Blokkitarjoukset voidaan myös määrittellä osittain hyväksyttäväiksi, jolloin tarjouksen hyväksymisen suuruuden määrittelee EUPHEMIA-algoritmi ja ostajan määrittelemä hyväksymisalue. Blokkitarjous voi olla myös muotoiltu, jolloin tarjottu tehonsuuruus voi vaihdella tuntien välillä. (Nord Pool, ei pvm.-b)

Viimeisenä ovat eksklusiiviset blokkitarjoukset, joissa tarjotaan useampi blokkitarjous, mutta vain yksi voidaan hyväksyä. Jos tarjous sisältää osittain hyväksyttäviä blokkitarjouksia, hyväksyttävien tarjousten summa voi olla maksimissaan yksi. Hyväksyttävä tarjous valitaan EUPHEMIA-algoritmin avulla maksimoiden ylijäämä. (PCR PXs & All NEMO Committee, 2024)

### **Päivänsisäiset markkinat**

Lähempänä toimitushetkeä tapahtuvat muutokset vaikuttavat siihen, paljonko sähköä lopulta käytetään ja tuotetaan. Sään muutos, laitevika, kuluttajien päätökset tai siirtoyhteyden vaurioituminen voivat muuttaa kulutuksen ja tuotannon suuruutta. Tällaisissa tilanteissa syntyy tarve tasapainottaa sähköntuotanto ja -kulutus uudelleen. (Fingrid, 2019)

Päivänsisäisten markkinoiden avulla sähkömarkkinoiden osapuolet voivat tehdä tarkennuksia alkuperäisiin suunnitelmiinsa vielä ennen sähkön toimitusta. Päivänsisäiset markkinat toimivat tuntitasolla ja ne avautuvat vuorokausimarkkinan jälkeen. Suomessa päivänsisäinen kaupankäynti voi jatkua aina toimitushetkeen asti. Virossa kaupankäynti suljetaan 30 minuuttia ja Ruotsissa 60 minuuttia ennen toimitusajankohtaa. (Fingrid, 2019)

### **Taseselvitys**

Taseselvityksen tavoitteena on varmistaa, että sähkömarkkinoilla saavutetaan taloudellinen tasapaino jokaisen käyttöjakson jälkeen. Tasevastaavan sähköntase lasketaan sen perusteella, miten ilmoitettu sähkön osto ja myynti vastaavat todellista kulutusta ja tuotantoa. Tasevastaava on taloudellisessa vastuussa tasepoikkeamistaan. Näitä poikkeamia korjataan ostamalla tai myymällä tasesähköä kantaverkkoyhtiön järjestämiltä tasesähkömarkkinoilta. (eSett, 2022)

Pohjoismaissa on käytössä yhteinen yhden taseen malli, jossa kaikki tasepoikkeamat lasketaan ja selvitetään samalla tavalla. Tästä mallista vastaa eSett-niminen palveluyhtiö, joka hoitaa taseselvitystä Suomen, Ruotsin, Norjan ja Tanskan kantaverkkoyhtiöiden puolesta. (eSett, 2022)

Taseselvityksessä noudatetaan erillistä sopimusta, jossa määritellään eSettin ja tasevastaavien oikeudet, velvollisuudet, vakuusvaatimukset ja toimintatavat. Mallissa on mukana useita osapuolia, kuten sähkön myyjät, tasevastaavat, verkonhaltijat, kantaverkko-yhtiöt ja markkinaoperaattorit. (eSett, 2022)

Taseselvityksen maksut koostuvat viikkomaksusta, tasepoikkeaman myynnistä ja ostopista, kokonaiskulutuksen ja -tuotannon volyymimaksusta sekä tasepoikkeaman volyymimaksusta. (eSett, 2022)

Viikkomaksu peritään jokaiselta viikolta, jolloin tasevastaava on ollut aktiivinen. Tasepoikkeaman ollessa ylijäämäinen tasevastaava myy ylijäämän eSett:ille ja saa siitä tasepoikkeaman hintaan perustuvan korvauksen. Jos tase on alijäämäinen, tasevastaava ostaa eSetiltä puuttuvan määrän sähköä ja maksaa siitä vastaavan korvauksen. Tasepoikkeaman hinta määräytyy aina kyseisen taseselvitysjakson mukaan. (eSett, 2022)

Toteutuneesta kulutuksesta ja tuotannosta maksetaan erillinen volyymimaksu. Tasepoikkeaman volyymilasku lasketaan tasepoikkeaman itseisarvon perusteella. (eSett, 2022) Taulukossa 1 on esitettyinä nämä hinnat.

Taulukko 1. Taseselvityksen hinnat (Fingrid, 2017b)

Tasepalvelumaksut	Maksut 1.6.2025 alkaen
Tasepoikkeaman hinta [€/MWh]	Taseselvitysjakson mukaan
Kiinteä viikkomaksu [€/vko]	30
Tuotannon ja kulutuksen volyymimaksu [€/MWh]	1,66
Tasepoikkeaman volyymimaksu [€/MWh]	1,15

Otetaan esimerkkitilanne, jossa tasevastaava ostaa 15 MWh sähköä tasejaksolle, mutta kuluttaa vain 10 MWh. Tasevastaavalle syntyy 5 MWh ylijäämä, jonka se myy eSettille. Oletetaan tasepoikkeaman hinnaksi 50 €/MWh. Alla olevassa taulukossa 2 on laskettuna tasemaksut yhteensä.

Taulukko 2. Tasepoikkeaman hinnoittelun esimerkki.

	Määrä [MWh]	Hinta [€/MWh]	Yhteensä [€]
Tasepoikkeaman myynti	-5	50	-250
Tasepoikkeaman osto	0	50	0
Tuotannon ja kulutuksen volyymimaksu	10	1,66	16,6
Tasepoikkeaman volyymimaksu	5	1,15	11,5
Yhteensä			-221,9

Laskun loppusumma on negatiivinen, jolloin eSett maksaa tasevastaavalle 221,9 euroa.

### Sähkömarkkinoiden ajanjaksojen muutokset

Eurooppalaiset kantaverkkoyhtiöt ja sähköpörssit siirtyvät vuorokausimarkkinoilla 15 minuuttiin kaupankäyntijaksoon 30. syyskuuta 2025. Tämä tarkoittaa, että jatkossa sähkönhinta määritellään jokaiselle 15 minuutin ajanjaksolle. (Fingrid, 2024i) Päivänsisäisessä kaupankäynnissä siirryttiin 15 minuutin kaupankäyntijaksoon 18. maaliskuuta 2025. (Fingrid, 2024h). Taseselvityksessä siirryttiin 22. toukokuuta 2023, mutta tasesähköhinnoittelu siirtyi 19. maaliskuuta 2025 (Fingrid, 2025a). Energiamarkkina siirtyi 4. maaliskuuta 2025 (Fingrid, 2025d). Taulukossa 3 on esitettyinä nämä muutospäivät.

Taulukko 3. Sähkömarkkinapaikkojen kaupankäyntijakson muutospäivä 15 minuuttiin.

Sähkömarkkinapaikka	Muutospäivä
Vuorokausimarkkina	30.9.2025
Tasesähköhinnoittelu	19.3.2025
Päivänsisäinen kaupankäynti	18.3.2025
Energiamarkkina	4.3.2025

Siirtymät ovat siis aikataulutettu siten, että ensin siirryttiin 15 minuutin kaupankäyntijaksoon energiamarkkinalla, sitten päivänsisäisessä kaupankäynnissä, ja sen jälkeen tasesähköhinnoittelussa. Viimeisenä siirrytään vuorokausimarkkinoilla.

## 3.2 Reservimarkkinatuotteet

Sähköjärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen on oltava jatkuvasti tasapainossa. Tasapainotilanteessa sähköverkon taajuus on 50 Hz. Tuotannon ylittäessä kulutuksen taajuus nousee yli 50Hz ja kulutuksen ylittäessä tuotannon, se laskee alle 50 Hz. (Fingrid, 2024f)

Sähkömarkkinoilla sähkön tuottajilla ja kuluttajilla on kannustin tasapainottaa sähkötaaseensa, jotta tasepoikkeamaa ei syntyisi. Tasevastaavat tai sähkön myyjät joko ostavat etukäteen tarvitsemansa tai myyvät tuottamansa sähkön. Sähkömarkkinoilla toimivat yritykset hoitavat siis sähköjärjestelmän tasapainotuksen suurimmaksi osaksi. (Fingrid, 2024f)

Sähköntuotanto ja -kulutus voivat poiketa ennusteista, mikä aiheuttaa tasevirheitä. Päivänsisäistä kaupankäyntiä voidaan käyttää tasevirheen pienentämiseen. Lopullinen tuotannon ja kulutuksen epätasapaino korjataan reaaliaikaisesti sähköjärjestelmän reservieillä. (Fingrid, 2024f)

Sähköjärjestelmän tasapainottamiseen tarvittavat reservit hankitaan markkinaehtoisesti Fingridin ylläpitämiltä reservimarkkinoilta. Fingrid ostaa reservit yrityksiltä, jotka voivat säätää sähkön tuotantoaan tai kulutustaan järjestelmän tarpeiden mukaan. Reservikohteina toimivat tuotantolaitokset, kulutuskohteet ja sähkövarastot. (Fingrid, 2024f)

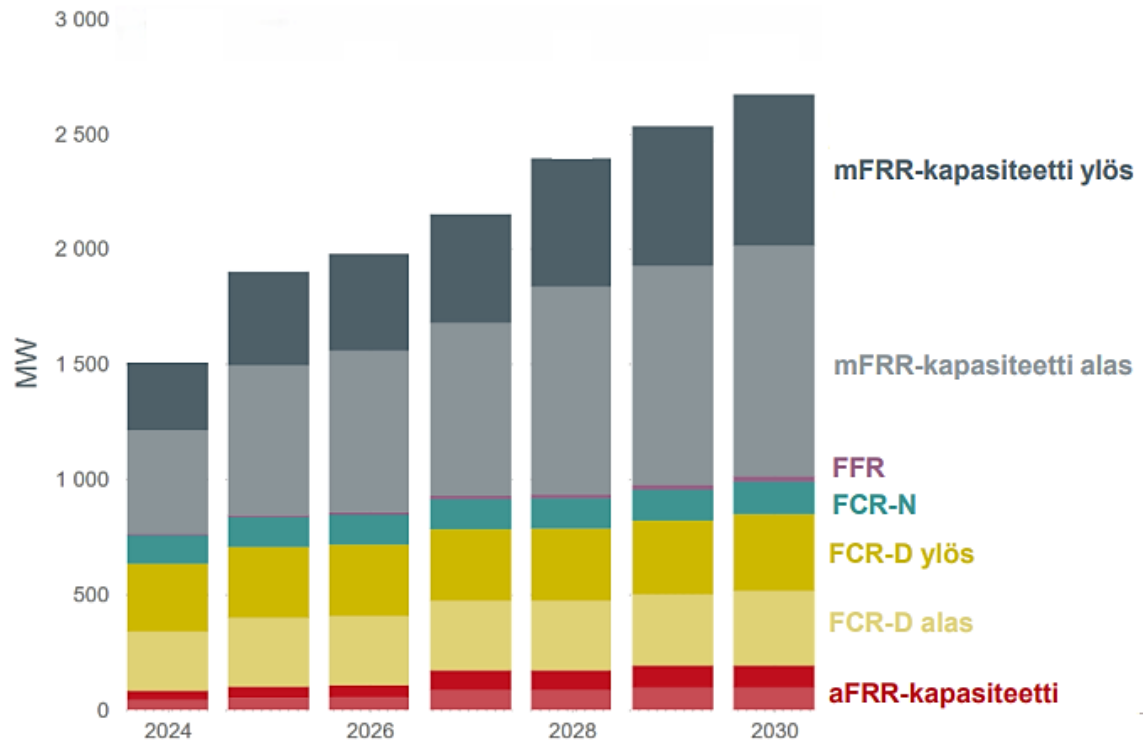
Tasapainon ylläpitämiseksi käytetään erityyppisiä reservituotteita, jotka yhdessä muodostavat kattavan järjestelmän. Osa reserveista reagoi automaattisesti alle sekunnissa, kun taas toiset soveltuvat pidempiaikaiseen, jopa tuntikausia kestävään tasapainottamiseen. Reservejä tarvitaan vuoden jokaisena tuntina. (Fingrid, 2024f) Kuvassa 2 esitettyinä reservituotteet.

					
	Nopea taajuus-reservi,	Taajuusohjattu häiriöreservi,	Taajuusohjattu käyttöreservi,	Automaattinen taajuudenhallinta-reservi,	Säätösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat,
Aktivointi	Suurissa taajuuspoikkeamissa, käytössä pienen inertian tilanteissa	Suurissa taajuuspoikkeamissa	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Parissa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa

Kuva 2. Erityyppiset reservituotteet. Muokattu lähteestä (Frantti, 2020).

Reservimarkkinoille osallistuminen ei estä toimijaa osallistumasta samanaikaisesti myös sähkön vuorokausimarkkinoille (Fingrid, 2024f).

Reservikapasiteetin tarve kasvaa vuosittain, kun sähköntuotannossa tuuli- ja aurinkoenergian osuus lisääntyy ja perusvoiman, kuten polttolaitosten, osuus vähenee. Fingridin selvityksen mukaan reservikapasiteetin määrät tulevat lähes tuplaantumaan vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoteen 2024. (Jukka Kakkonen, 2024) Kuvassa 3 on esitettyinä reservikapasiteetin ennustetut hankintamäärät.



Kuva 3. Reservikapasiteetin hankintaennusteet tuotteittain. Muokattu lähteestä (Jukka Kakkonen, 2024).

Kuvasta nähdään, että mFRR- ja FCR-D-markkinoiden osuudet reservimarkkinoista ovat suurimmat tällä hetkellä ja mFRR-markkinan osuus kasvaa tulevaisuudessa eniten.

### FFR (Fast Frequency Reserve), nopea taajuusreservi

Nopea taajuusreservi hankitaan sähköjärjestelmän pienen inertian tilanteiden hallintaan. Inertia tarkoittaa sähköverkkoon kytkettyjen pyörivien massojen liike-energiaa ja kuvaa järjestelmän kykyä vastustaa taajuusmuutoksia. Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä sovelletaan mitoitusperiaatetta, jonka mukaan yksittäisen tuotantoyksikön tai siirtoyhteyden vika ei saa pudottaa taajuutta alle 49,0 Hz. (Fingrid, 2024c)

Häiriön aiheuttaman hetkellisen taajuusmuutoksen suuruus riippuu häiriön tehomuutoksesta, järjestelmän inertian määrästä ja reservien aktivointinopeudesta. Tarvittavan FFR-reservin määrä määräytyy aina sen hetkisen inertian ja mitoittavan vian suuruuden perusteella. (Fingrid, 2024c)

Reservikohteen tulee aktivoitua automaattisesti taajuusmittauksen perusteella. (Fingrid, 2024c) Taulukossa 4 on esitettyä aika ja taajuusrajat, joilla reservin on aktivoiduttava kokonaan.

Taulukko 4. Maksimiaktivointiajat eri taajuuspoikkeamille, joiden aikana reservin tulee olla täysin aktivoitunut. (Fingrid, 2024c).

Aktivoointitaajuus [Hz]	Maksimi aktivoointiaika [s]
49,7	1,3
49,6	1,0
49,5	0,7

Aktivoinnin vähimmäiskesto on 5 sekuntia, jos deaktivoointinopeus on enintään 20 % FFR-kapasiteetista sekunnissa. Jos deaktivoointinopeus ylittää tämän, aktivoinnin keston on oltava vähintään 30 sekuntia. Lisäksi reservikohteen on kyettävä uuteen aktivointiin 15 minuutin kuluessa edellisestä aktivoinnista. (Fingrid, 2024c)

#### **FCR-D ja FCR-N (Frequency Containment Reserve for Disturbances / Normal operation), taajuusohjatut käyttö- ja häiriöreservit**

Taajuusohjatulla häiriöreservillä pyritään pitämään taajuus 49,5–50,5 Hz välillä. Taajuusohjatulla käyttöreservillä pyritään pitämään taajuus 49,9–50,1 Hz välillä. FCR-N on symmetrinen tuote, jolloin reservikohteen on pystyttävä ylös- ja alassäätöön. FCR-D on lineaarinen tuote, jolloin se on jaettu erillisiin ylös- ja alassäätötuotteisiin (Fingrid, 2024b)

FCR-D ylössäätö aktivoituu taajuusvälillä 49,9–49,5 Hz ja taajuuden säätö tehdään kulutusta pienentämällä tai tuotantoa kasvattamalla. Reservin aktivoituminen tapahtuu lineaarisesti taajuudenmuutoksen kasvaessa, jolloin taajuudella 49,9 Hz reservistä on 0 % aktivoitunut ja taajuudella 49,5 Hz reservistä on 100 % aktivoitunut. FCR-D alassäätö aktivoituu taajuuspoikkeamalla 50,1–50,5 Hz ja taajuuden säätö tehdään kulutusta kasvattamalla tai tuotantoa pienentämällä. Reservin aktivoituminen tapahtuu lineaarisesti taajuudenmuutoksen kasvaessa, jolloin taajuudella 50,1 Hz reservistä on 0 % aktivoitunut ja taajuudella 50,5 Hz reservistä on 100 % aktivoitunut. Toteutuva reservi kaikissa FCR-tuotteissa saa olla enintään 5 % alle tai 20 % yli laskennallisen reservikapasiteetin. (Fingrid, 2024b)

Reservikohteiden tulee aktivoitua automaattisesti taajuusmittauksen perusteella. Kohteessa tulee olla säätäjä, joka ohjaa tehoa taajuuden rikkoessa aktivointirajan. Taulukossa 5 on esitettyä FCR-D tuotteiden vaatimuksista. (Fingrid, 2024b)

Taulukko 5. FCR-D ja FCR-N reservituotteiden vaatimukset (Fingrid, 2024b).

Reservituote	Tarjouksen minimikoko [MW]	Aktivoitumisnopeus	Tarjousten tarkkuus [MW]
FCR-D alassäätö	1	Teho: 86 % / 7,5 s Energia: 3,2 x kapasiteetti* / 7,5 s	0,1
FCR-D ylössäätö	1	Teho: 86 % / 7,5 s Energia: 3,2 x kapasiteetti* / 7,5 s	0,1
FCR-N	0,1	n. 63 % / 1 min n. 95 % / 3 min	0,1

\*FCR-D-reservi voi olla joko dynaaminen tai staattinen. Dynaaminen FCR-D säätelee tehoa jatkuvasti ajan funktiona ja pystyy nopeasti vähentämään aktivoitua reservitehoa taajuuspoikkeaman pienentyessä. Staattinen FCR-D ei kykene jatkuvaan säätöön ja sen palautuminen aktivoinnin jälkeen vie enemmän aikaa. (Fingrid, 2024b)

FCR-markkinoilla Fingrid maksaa reservitoimittajalle energiamaksun. Ylössäädössä maksu perustuu aktivoinnissa siirtyneeseen energiamäärään sekä taseselvitysjakson markkinahintaan. Energiamaksu lasketaan kertomalla siirtynyt energia tasepoikkeaman hinnalla, kuitenkin vähintään kyseisen markkina-ajanjakson Suomen tarjousalueen hinnalla. (Fingrid, 2024b)

Allassäädön osalta reservitoimittaja maksaa energiamaksun Fingridille. Maksu perustuu siirtyneeseen energiamäärään ja tasepoikkeaman hintaan, mutta on enintään kyseisen markkina-ajanjakson Suomen tarjousalueen hinta. (Fingrid, 2024b)

### **aFRR (automatic Frequency Restoration Reserve), automaattinen taajuuden palautusreservi**

Automaattinen taajuuden palautusreservi palauttaa taajuuden nimellisarvoon 50,0 Hz. aFRR on automaattisesti aktivoituva reservi, joka perustuu taajuuspoikkeamaan ja aktivoituu Fingridin lähettämän tehonmuutossignaalin perusteella. (Fingrid, 2024a) Taulukossa 6 on esitettyä aFRR vaatimukset.

Taulukko 6. aFRR-reservituotteen vaatimukset (Fingrid, 2024a)

Reservituote	Säädön minimikoko [MW]	Aktivoitumisnopeus	Tarjousten tarkkuus [MW]
aFRR	1	90–110 % / 5 min	1

Suomi osallistuu pohjoismaiseen aFRR-kapasiteettimarkkinaan, jossa Fingrid hankkii osuutensa pohjoismaalaisesta kapasiteetista. Reservitoimittajat tekevät tarjouksia ylös- ja alassäätökykyisestä kapasiteetistaan ja saavat kapasiteettikorvauksen marginaalihinnon mukaan. Säädöstä aiheutunut aFRR-energia korvataan taseselvityksen yhteydessä reservitoimittajalle markkina-aikajakson marginaalihinnalla. (Fingrid, 2024a)

## mFRR (manual Frequency Restoration Reserve), manuaalisen taajuuden palautusreservi

Manuaalisen taajuuden palautusreservin tehtävänä on palauttaa taajuus 50,0 Hz:iin. Sitä käytetään myös siirtoverkon käyttövarmuuden turvaamiseen. Fingrid ylläpitää mFRR-energiamarkkinaa yhdessä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Reservitoimittajat voivat tarjota säätökykyistä kapasiteettia markkinalle ja kantaverkkoyhtiöt aktivoivat tarvittavan määrän tarjouksia kattaakseen tasevirheen.

mFRR-kapasiteettimarkkinalla reservitoimittaja sitoutuu tarjoamaan mFRR-energiamarkkinalle vähintään tarjouskilpailussa hyväksytyä kapasiteettimäärää vastaavan energiamäärän ja saa ylläpidetystä kapasiteetista kapasiteettikorvauksen. mFRR-energiamarkkinalla aktivoitua energiasta Fingrid maksaa energiakorvauksen reservitoimittajalle ylösäädön tapauksessa. Alassäädön tapauksessa reservitoimittaja maksaa Fingridille. Taulukossa 7 on esitetynä mFRR-reservituotteen vaatimukset.

Taulukko 7. mFRR-reservituotteen vaatimukset.

Reservituote	Säädön minimikoko [MW]	Aktivoitumisnopeus	Tarjousten tarkkuus [MW]
mFRR	1	12,5 min	1

Tarjoukset energia- ja kapasiteettimarkkinoille tulee jättää ennen aikarajan sulkeutusta (Fingrid, 2024f). Aikarajat eri markkinoille ovat esitetynä taulukossa 8.

Taulukko 8. Kapasiteetti- ja energiamarkkinoiden aikarajat tarjousten jättämiselle (Fingrid, 2024f).

Markkinapaikka	Tarjousten jättörajat
mFRR-kapasiteettimarkkina	klo 8:30 seuraavalle vuorokaudelle
mFRR-energiamarkkina	45 minuuttia ennen käyttöhetkeä
aFRR-kapasiteettimarkkina	klo 8:30 seuraavalle vuorokaudelle
aFRR-energiamarkkina	25 minuuttia ennen käyttöhetkeä
FCR-markkina	klo 18.30 seuraavalle vuorokaudelle
FRR-markkina	klo 18.00 seuraavalle vuorokaudelle

Kaikissa muissa paitsi mFRR- ja aFRR-kapasiteettimarkkinoilla tiedetään vuorokausimarkkinoiden hinta ennen kuin tarjoukset jätetään. Tämä luo epävarmuutta näille markkinoille osallistumiseen.

### 3.3 Reservimarkkinoille osallistuminen

Reservimarkkinoille osallistuminen alkaa perehtymisellä sähköjärjestelmän reservitoimintaan ja reservimarkkinoiden rakenteeseen sekä yhteydenotolla Fingridin reservimarkkinapalvelun yhteyshenkilöihin. Myöhemmässä vaiheessa osallistumisprosessia ollaan yhteydessä myös Fingridin teknisiin asiantuntijoihin. (Fingrid, 2024d) Kuvassa 4 esitettyä osallistumisen vaiheet.



Kuva 4. Reservimarkkinoille osallistumisen vaiheet. Muokattu lähteestä (Fingrid, 2024d).

Reservimarkkinoille osallistuvan toimijan tulee omistaa säätökykyinen resurssi tai olla sähkömarkkinatoimija, kuten sähkönmyyjänä tai tasevastaavana. Myös sähkön toimitusketjun ulkopuoliset osapuolet voivat tietyin ehdoin toimia reservitoimittajina, esimerkiksi itsenäisinä aggregaattoreina FFR-, aFRR-, FCR-D- ja FCR-N-reserveissä. (Fingrid, 2024d)

Itsenäinen aggregaattori tarkoittaa toimijaa, joka kokoaa useita pieniä sähkönkäyttö- tai tuotantokohteita yhteen ja myy niiden yhteenlaskettua säätökapasiteettia reservimarkkinoille. (Fingrid, 2023)

Mikäli reservitoimittaja ei omista resurssia, on sen hankittava omistajan lupa reservikäyttöön. Jos reservitoimittaja ei ole myöskään resurssin tasevastaava, on sen tietyissä tapauksissa sovittava reservikäytöstä tasevastaavan kanssa tai ilmoitettava käytöstä tasevastaavalle. Erityisesti aFRR- ja mFRR-markkinoilla tasevastaavan kanssa tehty sopimus on pakollinen ja sen olemassaolosta on ilmoitettava Fingridille kirjallisesti. (Fingrid, 2023)

Reservimarkkinoille osallistuminen edellyttää Fingridin kanssa tehtävää reservituotekohtaista sopimusta, joiden ehdot ja sisältö ovat yhtenäiset ja julkisesti saatavilla. Lisäksi FCR-N-, aFRR- ja mFRR-markkinoilla osallistujan on tarvittaessa tehtävä erillinen selvityssopimus eSettin kanssa, ellei toimija jo ole tasevastaava ja siten tehnyt taseselvitys-sopimusta. (Fingrid, 2024d)

Osana reservimarkkinoille osallistumista testataan automaattisten reservien (FFR-, FCR- ja aFRR-reservikohteiden) säätöominaisuudet ja tekninen suorituskyky säätökokeilla. Sen sijaan mFRR-reservikohteille säätökoetta ei vaadita. Kokeen tarkoituksena on varmistaa, että kohteen toiminta vastaa reservituotteen teknisiä vaatimuksia. Näihin vaatimuksiin kuuluu muun muassa aktivointinopeus, kyky ylläpitää säätöä vaaditun ajan sekä mahdollinen palautumisaika. (Fingrid, 2024d)

aFRR-reservikohteiden säätökoe eroaa muista tuotteista. aFRR-kohteet aktivoituvat Fingridin reaaliaikaisen aktivointisignaalin perusteella, joten reservitoimittajan on ensin rakennettava reaaliaikainen tiedonsiirtoyhteys Fingridin kanssa. Vasta tämän jälkeen voidaan suorittaa säätökoe. (Fingrid, 2024d)

Reservimarkkinoille osallistuminen edellyttää Fingridin ja reservitoimittajan välistä reaaliaikaista tiedonvaihtoa, jonka tarkemmat vaatimukset vaihtelevat reservituotekohtaisesti (Fingrid, 2024e).

Reservimarkkinoilla käytetään kahta kaupankäyntialustaa. Vaksi on Fingridin oma alusta, jota käytetään FCR- ja FFR-tuntimarkkinoilla sekä mFRR- ja aFRR-energiamarkkinoilla. FIFTY NMMS on pohjoismainen alusta, jota käytetään mFRR- ja aFRR-kapasiteettimarkkinoilla. (Fingrid, 2024e)

### 3.4 Tuottomahdollisuudet vuorokausi- ja reservimarkkinoilta sähkövastuksellisella höyryakulla

Sähkövastuksellista höyryakkua voidaan hyödyntää vuorokausi- ja reservimarkkinoilla. Vuorokausimarkkinoille voidaan osallistua hintakäyrätarjouksella tai useamman markkina-ajanjakson kattavilla blokkitarjouksilla. Hintakäyrätarjouksessa osallistutaan kaikille vuorokausimarkkinoiden tarjousaikajaksoille yksilöllisellä tehotarjouksella. Sähkönoston hintarajaksi asetetaan biopolttoaineella tuotetun höyryn hinta, jolloin höyry saadaan tuotettua aina halvemmalla tavalla. Yhtälössä 16 on esitettynä sähkönoston hintaraja.

$$C_E = \frac{\eta_{BFB} C_B}{\eta_e} \quad (16)$$

, jossa  $C_E$  on sähkön oston hintaraja,  $\eta_{BFB}$  on leijupetikattilan hyötysuhde,  $C_B$  on biomassan hinta ja  $\eta_e$  sähkövastusten hyötysuhde.

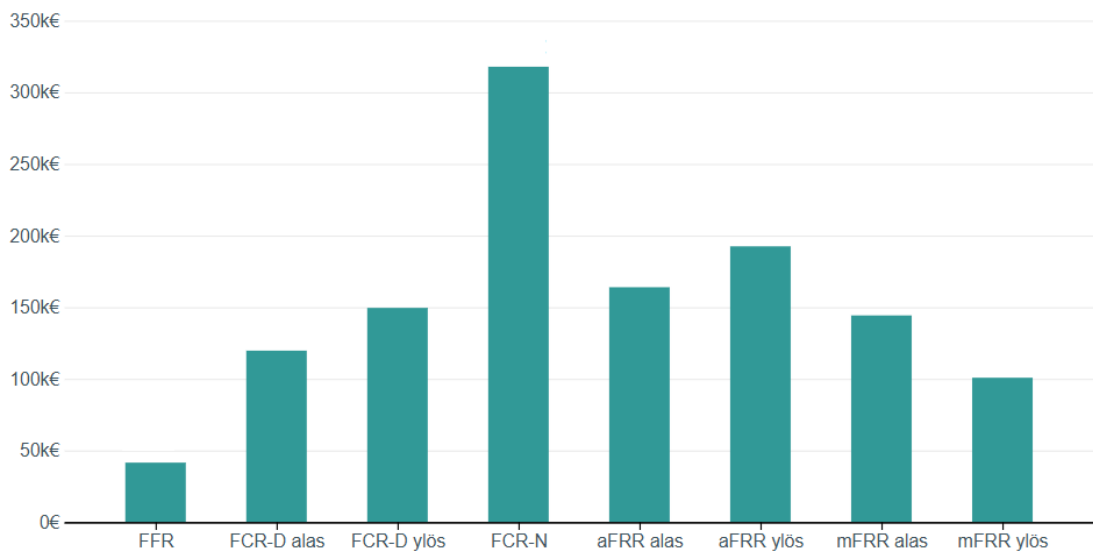
Vuorokausimarkkinoilta saatu tuotto (€/MWh) lasketaan blokkitarjouksen ajanjakson sähkön keskihinnan tai hintakäyrätarjouksen hinnan sekä kiinteällä polttoaineella tuotetun höyrynhinnan erotuksena. Tämä on esitettyä yhtälössä 17.

$$C = C_{\text{BFB}} - C_{\text{spot,avg}} \quad (17)$$

, jossa  $C_{\text{FB}}$  on kiinteällä polttoaineella tuotetun höyrynhinta ja  $C_{\text{spot,avg}}$  on sähkömarkkinoiden keskiarvohinta blokkitarjouksen ajanjaksona tai vuorokausimarkkinoiden hinta ajanjaksolta.

$C$  ei voi olla koskaan negatiivinen, koska blokkitarjouksen tai hintakäyrätarjouksen hyväksymisen rajahintana on  $C_{\text{BFB}}$ . Blokkitarjouksen etuna on sähkövastusten aktivointien ja pois kytkentöjen määrän väheneminen. Toisaalta hintakäyrätarjouksella osallistuttaessa saadaan hyödynnettyä kaikki sähköhinnat, jolloin biokattilalla tuotettu höyry on kalliimpaa.

Sähkövastuksilla voidaan osallistua myös reservimarkkinoille. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki reservituloista vuoden ajalta, kun tarjotaan 1 MW säätötehoa jokaiselle tunnille.



Kuva 5. Tuotot reservimarkkinoilta ajanjaksolta 6.5.2024-5.5.2025 tarjoten jokaiselle vuoden tunnille 1 MW säätötehoa. Muokattu lähteestä (Fingrid, 2025b).

Vastusten ollessa jännitteisiä, voidaan osallistua mFRR- ja FCR-D-ylössäätömarkkinoille. Vastaavasti vastusten ollessa pois päältä voidaan osallistua alassäätömarkkinoille. Tarjottavan säätötehon suuruus määräytyy tällöin sähkövastusten käytettävissä olevan tehonmuutoskapasiteetin mukaan. Jos vastuksia käytetään osateholla, voidaan osallistua myös FCR-N, FFR ja aFRR-markkinoille, joissa vaaditaan kykyä säätää tehoa molempiin suuntiin.

Osateholla toimiessa menetetään osa tuotoista vuorokausimarkkinoilla. Halvan sähkön aikana höyryä ei voida tuottaa täysimääräisesti sähköllä ja korkean hinnan aikana joudutaan ylläpitämään tehoa reservimarkkinoiden vaatimusten vuoksi.

Kuvasta nähdään 3, että mFRR- ja FCR-D-markkinat muodostavat suurimman osan reservimarkkinoista nyt ja tulevaisuudessa. Suuri kysyntä näillä markkinoilla voi luoda mahdollisuuden hintojen nousulle. FRR-markkinoiden osuus on sen sijaan pieni, joten suuren sähkövastuksellinen höyryakun tarjoaminen voisi aiheuttaa ylitarjontaa ja laskea hintoja.

Kuvasta 5 nähdään myös, että FRR-markkinoilla odotetut tuotot ovat pienempiä kuin mFRR- ja FCR-D-markkinoilla. aFRR- ja varsinkin FCR-N- markkinoilla tuotot voisivat olla korkeampia, mutta niiden vaatimukset osakuormalla toimimiselle rajoittavat sähkövastusten hyödyntämistä vuorokausimarkkinoilla. Näiden perusteella sähkövastuksellinen höyryakku soveltuisi parhaiten mFRR- ja FCR-D-markkinoille.

mFRR-markkinoiden riski verrattuna FCR-D-markkinoihin on tarjouksen jättöaika. mFRR-markkinoilla kapasiteettitarjoukset seuraavalle päivälle tulee jättää ennen kuin seuraavan päivän sähköhinnat ovat tiedossa. Tarjoukset tulee siis jättää sähköhinnan ennusteiden perusteella. Jätettäessä tarjoukset FCR-D-markkinoille tiedetään seuraavan päivän hinnat.

Jos reservitoimittajalla on ylläpitämätöntä kapasiteettia, se joutuu maksamaan Fingridille sanktioita. Reservitoimittajalla on ylläpitämätöntä kapasiteettia, mikäli ylläpidetyn reservin suuruus on pienempi kuin reservimarkkinoille tarjotun kapasiteetin suuruus. (Fingrid, 2024g) Sanktion suuruus mFRR-kapasiteettimarkkinoilla on esitettyä yhtälöissä 18 ja 19.

$$\text{Sanktio (€)} = \text{toimittamaton reservikapasiteetti (MW, h)} * 3 * \text{säätökapasiteettimarkkinoiden hinta kyseisellä ajanjaksolla (€/MW, h)} \quad (18)$$

tai

$$\text{Sanktio (€)} = \text{toimittamaton reservikapasiteetti (MW, h)} * 3 * \text{vuorokausimarkkinoiden Suomen tarjousalueen hinta kyseisellä ajanjaksolla (€/MW, h)} \quad (19)$$

Näistä suurempi on sanktion hinta (Fingrid, 2024g).

Sanktion suuruus FCR-markkinoilla on esitettyä yhtälössä 20 (Fingrid, 2025c).

$$\text{Sanktio} = \text{toimittamaton reservikapasiteetti (MW, h)} * 3 * \text{FCR – tuntimarkkinahinta kyseisellä ajanjaksolla (€/MW, h)} \quad (20)$$

Sanktion suuruus on siis vähintään kolminkertainen verrattuna kapasiteettimarkkinoilta saatavaan tuottoon.

Tilanteessa, jossa sähköllä tuotetun höyryn hinta on alempi kuin biokattilalla tuotetun höyryn hinta ja laitoksen kokonaiskulutus on pieni, höyryakkuun syötetään enemmän energiaa kuin puretaan. Tällöin höyryakun paine alkaa nousta, ja lähestyessä maksimipainetta sähkövastusten toiminnalle on kaksi vaihtoehtoa:

1. Rajoittaa sähkövastusten tehoa, jolloin reservimarkkinoilta aiheutuu sanktioita, mutta samalla tasesähkömarkkinoilta voi syntyä tuottoa ylijäämäisen sähkön myynnistä.
2. Jatkaa sähkövastusten käyttöä ilman rajoituksia ja puhaltaa ylimääräinen höyry ulos, jotta höyryakun paine pysyy sallituissa rajoissa. Tällöin tasesähkömarkkinoilta ei saada tuottoa, mutta vältetään sanktioilta reservikapasiteetin puutteellisesta ylläpidosta.

Näistä vaihtoehdoista kannattavampi strategia voidaan arvioida vertaamalla aikaisempien vuosien FCR-D- ja mFRR-kapasiteettimarkkinoiden sekä tasesähkön keskiarvohintoja. Arviossa lasketaan, ylittävätkö tasesähkömarkkinoilta saatavat tuotot ylläpitämättömästä reservikapasiteetista aiheutuvat kustannukset.

## 4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTOT

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää sähkövastuksellisen höyryakun hyödyntämismahdollisuuksia laitoksen höyryverkossa, jossa toimii myös leijupetikattila. Tutkimuksessa tarkastellaan, miten sähkövastusten lisääminen vaikuttaa höyryverkon toimintaan. Työssä kehitetään MATLAB (MATrix LABoratory) -pohjainen simulaatio, jonka avulla analysoidaan sähkövastusten ohjausta vuorokausi- ja reservimarkkinoiden hintojen perusteella. Tavoitteena on tutkia erilaisia ohjausstrategioita siten, että sähkövastuksia voidaan hyödyntää kustannustehokkaasti sähkömarkkinoilla ilman höyryverkon painetasojen liiallisia muutoksia.

### 4.1 Tutkimusstrategia ja tutkimuskohde

Tutkimuskohteena on tehdas, joka valmistaa BCTMP:tä (Bleached Chemi-Thermo-Mechanical Pulp) eli valkaistua kemihierrettä. BCTMP:tä käytetään tyypillisesti lopputuotteissa, joissa mekaanisen massan laatu ei ole riittävä, mutta sellu on liian korkealaatuista ja kallista. Yleisimmin BCTMP-massaa hyödynnetään taivekartongin keskikerroksessa.

Tutkimusstrategia esitellään kuvassa 6. Turkoosinsinisellä on tavoite ja tulos, punaisella kirjallisuuskatsaus, violetilla tarkastellun laitoksen empiirinen analyysi ja keltaisella mallinnus ja optimointi. Suluissa olevat lyhenteet kertovat mihin tutkimuskysymykseen (TK) vastataan ja missä vaiheessa tutkimustehtävä (TT) tehdään.



Kuva 6. Tutkimusstrategia.

Aiheeseen perehtyminen aloitettiin tutustumalla leijupeti- ja sähkökattiloihin, höyryakkuun sekä sähkömarkkinoihin. Tämän jälkeen syvennyttiin Ruthin-höyryakkuun ja vastussähkökattilaan. Tarkoituksena oli löytää vastaukset ensimmäisiin tutkimuskysymyksiin: mitä tulee huomioida höyryakun ja vastussähkökattilan yhdistämisessä sekä miten höyryakun tekniset rajoitteet vaikuttavat sähkövastuksellisen höyryakun toimintaan.

Leijupetikattiloissa osalta tarkastelu kohdennettiin kuplaleijupetikattilaan ja sen yhteistoimintaan sähkövastuksellisen höyryakun kanssa. Tavoitteena oli vastata toiseen tutkimuskysymykseen, joka koski leijupetikattilan minimikuorman ja säätönopeuden vaikutusta sähkövastuksellisen höyryakun toimintaan, kun ne operoivat samassa höyryverkossa. Aikaisempaa tutkimusta höyryakun ja sähkökattilan yhteiskäytöstä on olemassa, mutta höyryakun ja vastussähkökattilan yhdistämistä ei ole aiemmin tutkittu.

Kirjallisuuskatsauksen ohella perehdyttiin tarkastellun tehtaan höyryverkkoon luvussa 4.2. ja pyrittiin vastaamaan kolmanteen tutkimuskysymykseen: miten tarkasteltu höyryverkko reagoi suunniteltuihin tuotannon ja kulutuksen muutoksiin. Lisäksi leijupetikattilalle suoritettiin minimikuorma- ja säätövastekoe, joiden avulla määritettiin tutkitun laitoksen leijupetikattilan säätöä rajoittavat tekijät. Minimikuorman- ja säätövastekokeen toteutus on esitelty luvussa 4.3.

Työn tavoitteena oli vertailla sähköistetyn höyryakun ajomallien tuottoja ja löytää ajomalli, joka maksimoi tuotot vuorokausi- ja reservimarkkinoilla. Tämän takia sähkömarkkinoilla perehdyttiin tarkemmin reservimarkkinoihin ja vuorokausimarkkinoihin. Tehtaan höyryverkon aikaisempia mallinuksia ei ollut saatavilla, joten mallinnustyö aloitettiin tyhjästä. Koko höyryverkon mallinnus olisi vaatinut enemmän aikaa, joten höyryverkkoon tehtiin oletuksia ja yksinkertaistuksia. Tutkimustehtävä suoritettiin mallintamalla ja validoimalla MATLAB-sovelluksella tehtaan höyryverkko luvussa 4.4. Höyryverkon mallintamisen jälkeen luvussa 4.4 laskettiin erilaisten ajomallien tuottoja vuorokausi- ja reservimarkkinoilta sekä millaisilla automaatiojärjestelmän säädöillä näihin päästäisiin.

Työn tulokset esitellään luvussa 5. Alaluvussa 5.1 esitellään minimikuorman- ja säätövastekokeen tulokset. Alaluvussa 5.2 esitellään MATLAB-mallinnuksen verifiointin tulokset ja alaluvussa 5.3 eri ajomallien tuottojen tulokset. Tulosten avulla vastattiin viimeiseen tutkimuskysymykseen, joka koski ajomallin luotettavuuden arviointia sekä vuorokausi- ja reservimarkkinoilla tuottojen maksimoimiseksi tarvittavia säätöjä. Viimeisenä alaluvussa 5.4 esitellään uudet säätöparametrit sähkövastukselliselle höyryakulle.

Luvussa 6 esitetään pohdintaa ajomallien toiminnasta ja tarkkuudesta sekä parannusehdotuksia sähkövastuksellisen höyryakun toiminnan tehostamiseksi tulevaisuudessa. Luku 7 kokoaa työn päätelmät yhteen ja esittää yhteenvedon keskeisistä havainnoista.

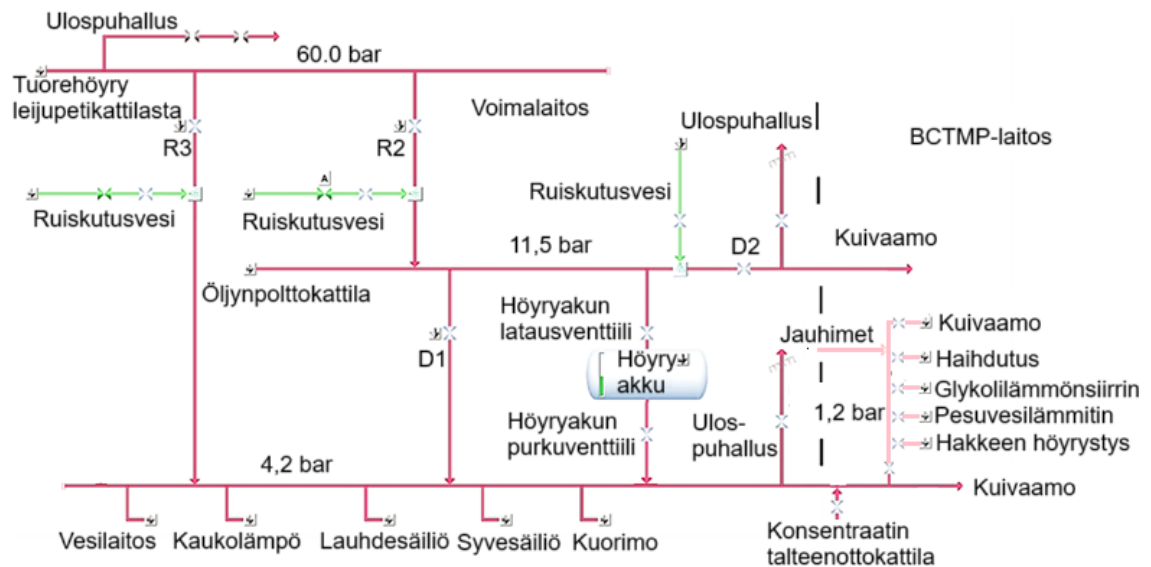
## **4.2 Tarkastellun tehtaan höyryverkko**

Tarkastellun tehtaan höyryntuottajat ovat konsentraatin talteenottokattila, leijupetikattila, jauhimet ja raskasöljyä käyttävä varakattila. Kuplaleijupetikattilalla tuotetaan suurin osa höyrystä ja se tuottaa höyryä 60 bar linjaan. Konsentraatin talteenottokattilalla tuotetaan höyryä 4,2 bar höyrylinjaan ja jauhimilla 1,2 bar linjaan. Varakattilalla käyttöä on vain leijupetikattilan seisokkien aikana ja sillä voidaan tuottaa 11,5 bar höyryä.

Höyrynkuluttaja 11,5 bar linjassa on kuivaamo. Höyrynkuluttajat 4,2 bar linjassa ovat vesilaitos, kaukolämpö, lauhdesäiliö, syöttövesisäiliö, kuorimo ja kuivaamo. Höyrynkuluttajat 1,2 bar linjassa ovat haihduttamo, glykolilämmösiirrin, pesuvesilämmitin, hakkeen höyrystys ja kuivaamo.

Kuivaamolla kuivatusilma lämmitetään lämmönvaihtimessa ensin 1,2 bar höyryllä, sitten 4,2 bar ja lopuksi 11,5 bar. Ilman lopullisen lämpötilan määrää suurimmaksi osaksi 11,5 bar höyry, koska sillä on korkein lämpötila. Kuivatusilman lämpötilan tasaisuus on tärkeää, jotta lopputuotteen kosteuspitoisuus pysyy tasaisena. Tämän vuoksi välipainelinjan paineen tulee olla mahdollisimman tasainen. Sen sijaan 1,2 ja 4,2 bar höyryn painevaihtelut eivät merkittävästi vaikuta lopputulokseen, koska niiden rooli kuivatusilman lämpötilan säätelyssä on vähäisempi.

Kuvassa 7 on esitetty tarkastellun tehtaan höyryverkko. Kuvassa vihreällä on esitetty ruiskutusvedet, punaisella 60; 11,5 ja 4,2 bar linjat ja vaaleanpunaisella 1,2 bar linja. Musta katkoviiva jakaa tehtaan voimalaitokseen ja BCTMP-laitokseen. Venttiilit ovat esitettyä tiimalaseilla. Kaikki muut venttiilit ovat säätöventtiilejä paitsi R2, R3, D1 ja D2 ovat reduktioventtiilejä. Voimalaitoksen leijupetikattila tuottaa 60 bar verkkoon höyryä, joka redusoidaan R2 ja R3 reduktioventtiilien avulla 11,5 ja 4,2 bar. Höyryn painetta voidaan alentaa D1 venttiilin avulla 11,5 bar linjasta 4,2 bar sekä D2 venttiilin avulla 11,5 bar linjassa.



Kuva 7. Tarkastellun tehtaan höyryverkko.

Leijupetikattilan tuottama höyrymäärä säätyy 60 bar linjan paineen mukaan, joka puolestaan reagoi höyrynkulutuksen muutoksiin. Kulutuksen kasvaessa paine laskee, jolloin kattilalle biopolttoainetta syöttävien ruuvien nopeus kasvaa. Vastaavasti kulutuksen laskeessa paine nousee ja syöttöruuvien nopeus pienenee.

Höyryverkon automaatiojärjestelmä tasapainottaa höyrylinjojen paineita säätämällä venttiilien avautumia paineanturien mittaustietojen perusteella. Paineen säätö tehdään

ensisijaisesti reductioventtiileillä R2, R3, D1, D2, höyryakulla tai leijupetikattilalla. Paineen ollessa liian korkea säädöistä huolimatta, joudutaan käyttämään ulospuhallusventtiilejä.

Hallitseva säätö tarkoittaa sitä, että useamman painetason vaikuttaessa venttiili ohjaukseen, hallitseva säätö lopulta päättää venttiilin avauksen riippumatta muiden säätöjen arvoista. Automaatiojärjestelmässä säädön hallitseva painemittaus D1-venttiilillä on 11,5 bar linjan paine ja R3-venttiilillä 60 bar linjan paine. R2 venttiilillä 60 bar ja 11,5 bar linjojen paineet vaikuttavat molemmat samanarvoisesti. Reduktioventtiileille on asetettu minimiavaus liian suurten virtausnopeuksien estämiseksi. Minimivaauksen ja 0 % välille venttiili ei voi säätää.

Höyryakun nestetilavuus pidetään nykyisellään noin 50 %:ssa. Höyryakun latausventtiilin avauma seuraa höyryakun ja 11,5 bar linjan painetta. Höyryakun minimipaineena pyritään pitämään 8 bar. 11,5 bar linjan paineen arvo hallitsee tätä säätöä. Höyryakun purkuventtiilin avaus määräytyy höyryakun ja 4,2 bar linjan mukaan, jossa lopullinen säätö valitaan suuremman avautuman tarpeen mukaan. 4,2 bar linjan paineen noustessa yli 4,9 bar höyryakun purkuventtiili pakotetaan sulkeutumaan. Höyryakun maksimipaineena pyritään pitämään 10 bar.

Venttiilit voidaan myös asettaa manuaaliasentoon, jolloin operaattorit voivat säätää niiden avauksen suuruutta haluamallaan tavalla. Kaikkia venttiilejä ei voida asettaa samanaikaisesti manuaaliasentoon, jotta paineet eivät pääse muuttumaan liikaa.

### **Höyryverkkoon tulevat muutokset**

Höyryakun sähköistämisen seurauksena höyryverkon rakennetta ja säätöjä täytyy muuttaa. Raskasöljyä käyttävä varakattila korvataan höyryakun sähköistämällä, jolloin höyryakusta täytyy rakentaa uusi höyryputki 11,5 bar linjaan. Näin voidaan tuottaa tarvittava välipainelinjan höyry ilman leijupetikattilaa ja pitää tuotantoprosessia osittain yllä.

Nykyisellään höyryakun latausvirtaa säätää myös höyryakunpaine, mutta muutoksen jälkeen höyryakkua ei tarvitse ladata 11,5 bar linjasta kuin välipainelinjan paineen noustessa liian korkeaksi.

Suuren kulutuksen aikana höyryakkua voidaan pitää painevälillä 8–10 bar ja purkaa höyryä matalapainelinjaan. Matalapainelinjan kulutuksen laskiessa R3 reductioventtiilin avaumaa pienennetään, jotta höyryakusta voidaan syöttää mahdollisimman suuri höyryvirta. Mikäli kulutus edelleen pienenee ja R3-venttiili saavuttaa minimiavaumansa, joudutaan höyryvirtaa höyryakusta matalapainelinjaan rajoittamaan, jotta paine ei nousisi liikaa verkossa. Tämän seurauksena höyryakun paine alkaa nousta.

Höyryakun paineen noustessa välipainelinjan tasolle, höyryakun latausventtiili täytyy sulkea. Höyryakun uutta purkulinjaa voidaan hyödyntää, kun painetaso höyryakussa nousee korkeammalle kuin välipainelinjan paine lisättynä putkista aiheutuvat paine- ja lämpöhäviöt. Näin varmistetaan, että höyryä lauhtuu mahdollisimman vähän ja höyryvirran suunta on oikea. Välipainelinjan painehäviöstä on tehty laskelma eri massavirroilla Eломaticin toimesta. Höyryakun purussa 11,5 bar linjaan täytyy huomioida välipainelinjan painetaso, joka lähtee nousemaan kulutuksen laskiessa. R2-venttiilin ollessa minimi-  
aukeamallaan ja välipainelinjan kulutuksen laskiessa lisää, joudutaan höyryakun purkuventtiiliä välipainelinjaan rajoittamaan. Höyryakun molempien purkuventtiilien rajoituksessa höyrynkulutuksen laskun seurauksena joudutaan sähkövastusten tehoa rajoittamaan tai ulospuhaltamaan ylimääräinen höyry.

### **4.3 Leijupetikattilan minimikuorma- ja säätövastekoe**

Luvussa 2.5 esitettiin leijupetikattilan minimikuorman ja säätövasteen vaikutus sähkövastusten hyödyntämiseen. Tämän takia tarkastellun tehtaan kuplaleijupetikattilalle suoritettiin minimikuorma- ja säätövastekoe.

Minimikuormatestin tavoitteena oli selvittää alin mahdollinen leijupetikattilan teho, joka ei riko asetettuja rajoituksia. Nämä rajoitukset ovat esitettynä taulukossa 9. Päästörajoitteet ovat tehtaan ympäristöluvista. Päästöissä huomioitiin 20 % mittausepävarmuus, jolloin päästöt saavat olla 20 % korkeammat kuin ympäristöluvissa mainitut. Tavoitteena oli pitää päästöt ympäristölupien rajoitteiden sisäpuolella ennen mittausepävarmuutta. Leijupedin minimilämpötila ja höyryn minimipaine ovat laitoksen itse määrittelemiä valmistajien kanssa.

Päästöarvot ovat redusoitu tiettyyn O<sub>2</sub>-pitoisuuteen, mikä tarkoittaa mittaustulosten oikaisua vastaamaan standardoitua hapen määrää savukaasuissa. Tämä mahdollistaa vertailukelpoisen raportoinnin eri polttolaitosten välillä.

Säätövastekokeen avulla saatiin selville, kuinka nopeasti leijupetikattila pystyy muuttamaan tuotetun höyryn määrää. Säätövastekokeessa rajoitteena olivat taulukossa 9 esitetyt petilämpötila, höyrynpaine ja tulistimien lämpötila.

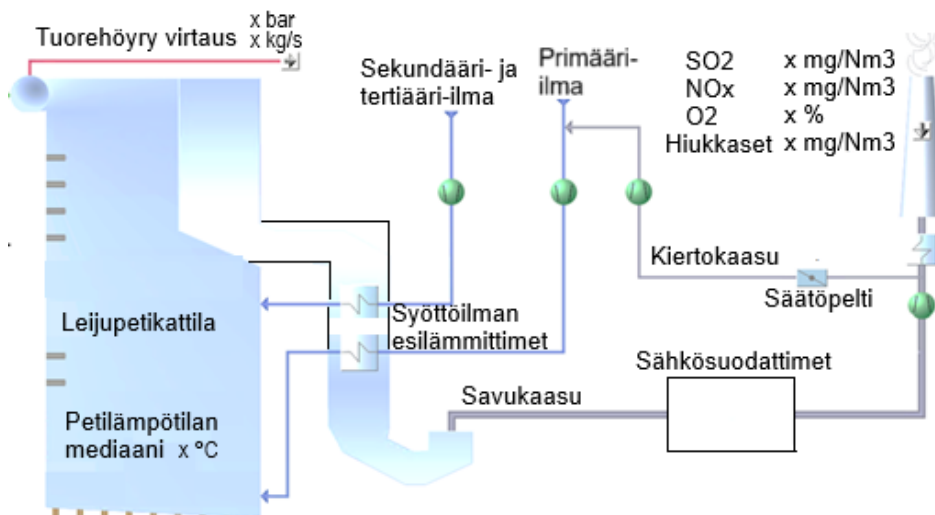
Taulukko 9. Rajoitteet minimikuorman ja säätövasteen testauksessa.

Rajoitustyyppi	Sallitut arvot
NO <sub>x</sub> -päästöt maksimissaan [mg/Nm <sup>3</sup> ]	360
SO <sub>2</sub> - päästöt maksimissaan [mg/Nm <sup>3</sup> ]	240
Hiukkaspäästöt maksimissaan [mg/Nm <sup>3</sup> ]	36
Leijupedin mediaani lämpötila minimissään [°C]	700
Höyrynpaine minimissään [bar]	55
Tulistimien lämpötila maksimissaan [°C]	500

### Mitta- ja säätölaitteet

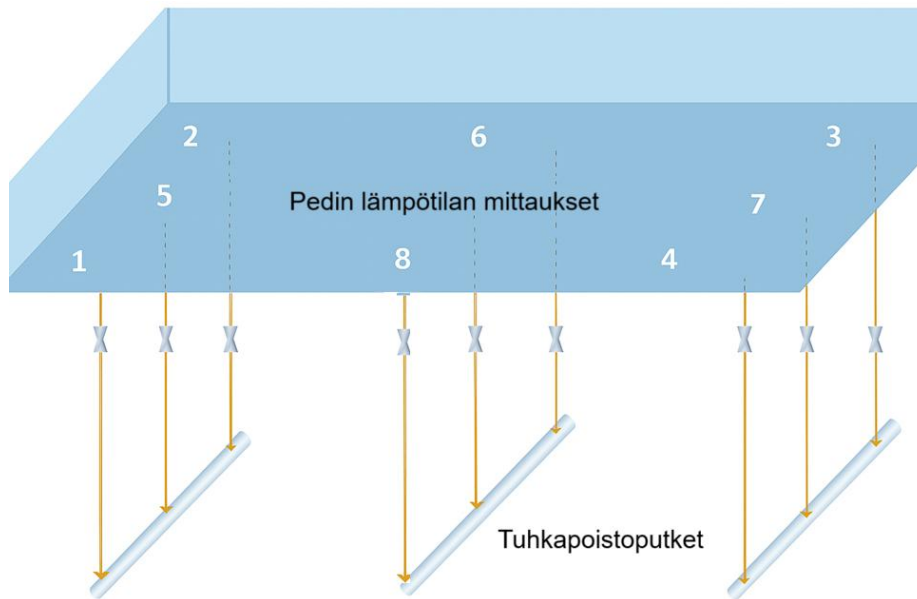
Mittausten seuraamiseen ja säätöparametrien muuttamiseen käytettiin automaatiojärjestelmän sovellusta ja mittaustulosten analysointiin käytettiin Wedge-sovellusta.

Kuvassa 8 näkyvät vihreät ympyrät ovat puhaltimia, joilla voitiin säädellä virtauksien suuruuksia. Säätöpeltiä käytettiin puhaltimen ohella säätämään kiertokaasun suuruutta. Seurasimme lisäksi päästöasoja, savukaasujen happipitoisuutta sekä petilämpötilan mediaania. Tuorehöyryn virtauksesta nähtiin höyryn paine ja massavirta. Tulistimien lämpötila oli tarkasteltavissa erillisestä näkymästä.



Kuva 8. Leijupetikattilan savukaasujen, ilman ja petilämpötilan säätö- ja mittausjärjestelmät.

Leijupedin lämpötilanmittaus on jaettu 8 eri mittauspisteeseen. Kuvassa 9 on esitettyinä pedin mittauskohdat.



Kuva 9. Leijupedin lämpötilan mittauspisteet.

Petilämpötilan mediaani muodostetaan viiden korkeimman lämpötilan mittauksen keskiarvosta. Kokeiden aikana seurattiin myös mahdollisia muutoksia petilämpötilan mittausten välillä.

### Koesuunnitelmat

Kokeet toteutetaan ajankohtana, jolloin laitos ei ole käynnissä. Tällöin ei ole mahdollisuutta aiheuttaa ongelmia tuotantoprosessiin.

Höyrynkulutus laitoksen ollessa pois käytöstä on keskimäärin 6,6 kg/s. Höyrynkuluttajia ovat kaukolämpö, lauhdesäiliö, syöttövesisäiliö, glykolilämmönsiirrin ja pesuvedenlämmitin. Pesuvedenlämmitin on paras höyrynkulutuksen säätämiseen, koska höyrymäärän muuttaminen ei aiheuta merkitseviä muutoksia pesuveden lämpötilaan lyhyellä aikavälillä. Muiden höyrynkuluttajien säätöihin ei tarvitse koskea, koska niiden höyrynkulutuksen arvot vaihtelevat vähän lyhyellä aikavälillä. Höyrynkulutusta muutetaan myös ulospuhalluksilla. Polttoaineen laatu pyritään pitämään tasaisena pitämällä polttoainekoostumus vakiona.

### Minimikuorman koesuunnitelma

Minimikuorman testaukselle optimaalista on mahdollisimman tasainen tuotanto, joka saavutettiin tasaisella höyrynkulutuksella, polttoaineen laadulla ja polttoaineen syöttönopeudella. Minimikuorman testaus suoritetaan pudottaen kulutusta askeleissa.

Aloittaessa höyrynkulutus on noin 6,6 kg/s eli noin 21,5 MW. Tavoitteena on pudottaa kulutus ensin noin 18 MW:iin pudottamalla pesuveden höyrynkulutusta 1,1 kg/s. Kulutuksen pudotuksen jälkeen seurataan taulukossa 9 esitettyjä arvoja kuvasta 8. Oletus

arvojen stabiloitumiseen on 3 tuntia. Jos arvot stabiloituvat, pudotetaan höyryteho 16 MW:iin, mikä vastaa noin 0,60 kg/s höyrymäärän pudotusta. Jatketaan 0,60 kg/s pudotuksia, kunnes taulukossa esitetyt rajoitteet rikkoutuvat. Rajojen rikkoutuessa pyritään säätöjä muuttamalla korjaamaan tilanne takaisin rajojen hyväksymiksi. Taulukossa 10 on esitettynä toimenpiteet rajojen rikkoutumistilanteissa.

Taulukko 10. Toimenpiteet minimikuormatestissä rajojen rikkoutuessa.

Rajarikkomus	Toimenpide
NO <sub>x</sub> -päästöjen ylitys	Vähennetään hapenmäärää leijutusilmassa
SO <sub>2</sub> -päästöt ylitys	Polttoteknisin keinoin ei voida vähentää
Hiukkaspäästöjen ylitys	Ilmakerrointa muuttamalla
Leijupedin mediaani lämpötilan alitus	Lisätään hapenmäärää leijutusilmassa
Tuorehöyryn paineen alitus	Lisätään hapenmäärää leijutusilmassa

### Säätövastekokeen suunnitelma

Säätövastekokeen aloituksessa säädetään tuorehöyryvirtaus noin 6 kg/s tasolle, mikä vastaa noin 20 MW tehoa. Tehoa nostetaan ja lasketaan yhteensä kymmenessä askeleessa, joissa yhden askeleen suuruus on 1 kg/s ja muutos tehdään minuutin välein. Kokonaismuutos tehotasossa on noin 33 MW.

Koe aloitetaan höyryvirran asteittaisella kasvattamisella. Aluksi höyryvirtaa kasvatetaan höyryakkuun ja pesuvedenlämmittimeen avaamalla niiden syöttöventtiilejä. Kun höyryakku on täyttynyt, höyrynkulutusta kasvatetaan 4,2 bar ulospuhalluksella. Painevaihte-luiden tasaamiseen käytetään R2-, R3- ja D1-venttiilejä.

Kun höyryvirta saavuttaa arvon 16 kg/s, annetaan järjestelmän stabiloitua ja samalla seurataan kattilan petilämpötilaa, paineita sekä tulistimien lämpötiloja. Päästörajoiden mahdollinen hetkellinen ylitys on hyväksyttävää, mikäli arvot palautuvat sallituille tasoille kokeen jälkeen. Stabiloitumisen jälkeen suoritetaan testi vastakkaiseen suuntaan. Höyryvirtaa vähennetään asteittain 1 kg/s askelin pienentämällä ulospuhalluksen ja pesuvedenlämmittimen höyryvirtaa. Kun 6 kg/s on saavutettu, seurataan järjestelmän stabiloitumista.

Mikäli kattilan säätönopeus ei riitä 1 kg/s muutosaskeliin minuutissa, koe toistetaan käyttäen pienempiä, 0,7 kg/s askelia. Askelkokoa pienennetään edelleen 0,2 kg/s välein, kunnes löydetään arvo, jolla leijupetikattila pysyy säätörajojen sisällä.

## 4.4 Sähköistetyn höyryakun ajomallin luominen, verifiointi ja kustannuslaskelma

Tässä luvussa esitellään ajomallien luomisen yleiset vaiheet ja kuvataan, miten ajomalli rakennettiin tässä työssä. Tämän jälkeen käsitellään ajomallin verifiointi askelvaste- ja sinikäyräkokeiden avulla. Lopuksi kuvataan, miten kustannuslaskelmat liitettiin ajomalliin.

### Sähköistetyn höyryakun ajomallin luominen ja verifiointi

Sähköistetyn höyryakun ajomalli luotiin MATLAB-ohjelmistolla. MATLAB on MathWorks-yhtiön kehittämä numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmointiympäristö. Se soveltuu erityisesti matemaattiseen mallinnukseen, datan analysointiin, simulointiin sekä algoritmien kehittämiseen. MATLABissa yhdistyvät matriisilaskentaan perustuva ohjelmointikieli ja graafinen työpöytäympäristö, minkä lisäksi sen Live Editor -ominaisuus mahdollistaa koodin, tulosten ja selitysten yhdistämisen yhteen dokumenttiin. (MATLAB, ei pvm.)

Kuvassa 10 on esitettyä tyypilliset vaiheet toimivan ajomallin luomiseksi. Ensin määritellään ajomallin tavoite. Luodaan sitten tavoitteen ympärille matemaattiset yhtälöt, joilla voidaan ratkaista tavoitteen ongelma. Tavoitteen ja matemaattisten yhtälöiden avulla voidaan luoda ajomalli MATLABiin. Ajomalli validoidaan testaamalla mallia yksinkertaisin esimerkkitalanteiden kautta. Validoinnissa verrataan mitattuja tuloksia mallin tuloksiin. Tämän avulla arvioidaan, onko mallin rakenne ja oletukset soveltuvia kyseisen ilmiön mallintamiseen. Kalibroinnin tarkoituksena on säätää mallin parametrejä niin, että simulaatiot vastaavat mahdollisimman lähelle todellista käyttäytymistä. Viimeisenä tehdään verifiointi, jossa testataan kalibroitujen arvojen toimivuutta uusissa tilanteissa, joita ei käytetty kalibroinnissa. Tämän jälkeen ajomallia voidaan käyttää uusien tilanteiden simulointiin. Lopuksi analysoidaan saatuja tuloksia ja mietitään niiden järkevyyttä. (Popescu, 2014)



Kuva 10. Ajomallin luomisen vaiheet. Muokattu lähteestä (Popescu, 2014).

Ajomalli jaettiin kolmeen osaan tarkastellun laitoksen kulutuksen perusteella. Ensimmäisessä tilanteessa kulutus oli yli leijupetikattilan minimitehon, sähkövastusten maksimitehon ja höyryakkuun lisätyn lisäveden tehojen summan. Tällöin sähkövastuksia ei tarvitse rajoittaa, eikä synny tarvetta ylimääräisen höyryn ulospuhallukseen.

Toisessa tilanteessa kulutus oli ensimmäisen tilanteen tehojen summan ja leijupetikattilan minimitehon välissä. Tällöin sähkövastusten käyttöä saatettiin joutua rajoittamaan tai ylimääräinen höyry oli puhallettava ulos, riippuen sähkön hinnasta ja höyrynkulutuksen suuruudesta.

Kolmannessa tilanteessa leijupetikattila ei tuottanut ollenkaan höyryä ja kaikki tuotettiin sähkövastuksilla. Kokonaiskulutus oli keskimäärin alle sähkövastusten tehon, jolloin sähkövastusten tehoa täytyi rajoittaa tai ulospuhaltaa ylimääräinen höyry.

Ajomallin luominen aloitettiin tyhjästä, koska valmista pohjaa ei ollut saatavilla. Ajomalliin liittyen kerättiin ensin lähtötietoja höyryakusta, sähkövastuksista ja leijupetikattilasta. Lähtötietojen lisäksi tehtiin oletuksia laskennan helpottamiseksi. Oletettiin, että höyryakussa neste ja höyry ovat aina kylläisiä, höyryakkuun syötetyn lisäveden lämpötila on vakio, höyryakussa oleva vesi on pelkästään nestettä ja höyryverkkoon syöttää höyryä pelkästään leijupetikattila sekä höyryakku. Lisäksi putkistojen häviöitä ja tilavuutta ei otettu huomioon.

Ajomallin luonti aloitettiin luomalla funktio höyryakun energiasisällön laskennalle. Funktioon syötettiin höyryakun paine ja nestetilavuus, jolloin saatiin kokonaisenergisältö. Laskennassa huomioitiin myös höyryakun teräsrunkoon varastoituva energia.

Höyryakulle luotiin massatase, jossa laskettiin höyryakkuun syötetty massavirta välipainelinjasta ja lauhdesäiliön lisävedestä sekä höyryn purkuvirta höyryakusta. Syötetyn

nesteen massa höyryakussa pidettiin mahdollisimman tasaisena, jolloin lisävettä syötiin vain höyryakun massan laskiessa. Höyryakun ulospurkuvirran suuruus riippui höyryakun painetasosta kasvaen paineen noustessa.

Sähköhintadatan käsittelyä varten luotiin oma funktio, johon voitiin syöttää Excel-tiedostot toteutuneista ja ennustetuista sähköhinnoista. Excel-tiedostot luotiin todellisilla toteutuneilla ja ennustetuilla hinnoilla muokaten ne vaihteleviksi sattumanvaraisesti 15 minuutin välein  $\pm 10\%$  alkuperäisestä tunnin sähköhinnasta. Näin saatiin luotua vektorit ennustetulla ja toteutuneelle sähköhinnalle. Alkuarvoissa oli laskettuna yhtälöllä 16 sähkönoston hintaraja, jonka avulla luotiin sähkövastusten ohjausvektori. Ohjausvektorissa arvo 1 tarkoitti, että sähkövastukset ovat jännitteisiä ja arvo 0, että niissä ei ollut jännitettä.

Massataseen ja sähkövastusten aktivointien avulla muodostettiin energiatase, jossa höyryakun edellisen ajanhetken energiasisältöä päivitettiin syötetyn veden, poistuvan höyryn ja sähkövastusten tuottaman energian perusteella.

Uusi höyryakun painetaso laskettiin hyödyntäen höyryakun energiasisällön funktiota sekä massa- ja energiataseita. Näin voitiin määrittää, millä painetasolla energiasisällön funktiosta saatu arvo vastaa energiataseesta laskettua arvoa. Uuden painetason avulla laskettiin höyryakun uusi nestetilavuus jakamalla veden kokonaisuudessa sen tiheydellä.

Höyryn kokonaiskulutukselle muodostettiin oma funktio, johon syötettiin Excel-tiedostoissa olevat höyrynkulutukset eri ajanhetkillä. Kulutusmäärät jaettiin aikaisemmin mainittuihin kolmeen luokkaan: 33,6 MW, 16,5–33,6 MW sekä tasainen kulutus leijupetikattilan ollessa pois käytöstä, jolloin kulutus oli lämpimimpinä kuukausina 0 MW ja kylmimpinä kuukausina 5 MW.

Näin saatiin yksinkertainen mallin leijupetikattilalle, höyryakulle ja sähkövastuksille. Sähkövastukset tuottivat halvalla sähköllä höyryä ja leijupetikattila tuotti kaiken lopun höyryn kokonaiskulutuksen täyttämiseksi.

Leijupetikattilalle, höyryakulle ja sähkövastuksille asetettiin rajoituksia niiden teknisten ominaisuuksien perusteella. Sähkövastusten tehoa rajoitettiin, kun höyryakun paine lähestyi maksimipainetta. Rajoitetun sähköenergian määrä kerrottuna sähkövastusten hyötysuhteella vastaa ulospuhalletun höyryn määrää tilanteessa, jossa vastuksia ei olisi rajoitettu.

Leijupetikattilalle luotiin minimikuormarajoitus, jonka alle sen tuotanto ei saa laskea. Leijupetikattilan minimikuorman tilanteessa höyryakun purkutehoa rajoitettiin. Leijupetikattilalle luotiin myös tehonmuutosrajoitus, jolloin höyryakun purku- ja latausvirtaa muutettiin pienentääkseen leijupetikattilan tehonmuutosnopeutta.

Kuvan 10 mukaan validointi suoritettiin tässä vaiheessa. Validointi tarkoittaa ajomallin tuottaman mallin vertaamista todelliseen referenssidataan. Sähkövastuksellisen höyryakun toiminnasta ei ole saatavilla mittaustuloksia, joten tässä työssä siirryttiin suoraan ajomallin verifiointiin askelvaste- ja sinikäyräkokeiden avulla.

Verifiointissa höyryakun aloituspaine oli 15 bar. Höyryakun purkuteho oli minimissään paineessa 8 bar ja maksimissaan 10 bar kasvaen lineaarisesti tällä välillä. Höyryakun purkutehon maksimi oli 25 MW, jos sen ei tarvinnut tukea leijupetikattilan tehonmuutosnopeutta. Sähkövastusten tehoa alettiin rajoittamaan, kun höyryakun paine saavutti 14,5 bar. Sähkövastusten tehoa laskettiin lineaarisesti 15 MW:sta nolnaan, paineen noustessa välillä 14,5–15,5 bar.

Askelvastekokeen tarkoituksen oli selvittää, miten simulaatio selviää äkillisistä jyrkistä muutoksista sähköhinnassa ja höyrynkulutuksessa. Luotiin viisi erilaista skenaariota, joissa arvot pidettiin samana 2 tuntia, joka vastasi blokkitarjouksen pituutta.

Koe aloitettiin sähköhinnalla 30 €/MWh, joka on alle biokattilalla tuotetun höyrynhinnan sekä matalalla höyrynkulutuksella 20 MW. Höyrynkulutus nostettiin kolmen minuutin aikana 50 MW:iin ja samalla sähkönhinta 50 €/MWh, joka on biokattilalla tuotetun höyrynhintaa korkeampi. Höyrynkulutus nostettiin kolmessa minuutissa 80 MW:iin ja sähkönhinta pudotettiin 30 €/MWh. Höyrynkulutus pudotettiin 50 MW:iin sähkönhinnan noustessa 50 €/MWh ja sitten höyrynkulutus pudotettiin 20 MW:iin sähkönhinnan pudotessa 30 €/MWh. Viimeisenä höyrynkulutus pidettiin 20 MW:ssa ja sähkönhinta nostettiin 50 €/MWh.

Sinikäyräkokeella simuloitiin mahdollisimman monta erilaista yhdistelmää sähkönhinnan ja höyrynkulutuksen välillä. Kulutus oli sinikäyrä, joka vaihteli 17–90 MW välillä. Sähkönhinta asetettiin aluksi 50 €/MWh ja kahden tunnin jälkeen se laskettiin 30 €/MWh:iin. Tämä suoritettiin kaksi kertaa, jolloin sähkönhinta nostettiin uudelleen 50 €/MWh ja pudotettiin 30 €/MWh. Tekemällä testi kaksi kertaa nähtiin, toimiiko malli höyryakun eri aloituspaineissa.

Ajomallien verifiointissa seurattiin höyryakun painetta, leijupetikattilan tehoa, leijupetikattilan tehonmuutosnopeutta ja energiatasetta. Näiden arvojen tuli pysyä asetettujen raja-arvojen sisällä.

## Sähköistetyn höyryakun kustannuslaskelmat

Höyryakun ajomallin verifiointin jälkeen laskettiin vuotuisia kokonaishöyryntuotannon kustannuksia. Tätä varten malliin lisättiin uudet funktiot blokkitarjousten ja hintakäyrätarjousten laskentaan.

Blokkitarjoukselle luotiin funktio, johon syötettiin toteutuneet sähköhinnat vuoden ajalta ja laskettiin keskiarvot jokaiselta kahden tunnin jaksolta verraten sitä biopolttoaineella tuotetun höyryn hintaan. Kun sähköhinnan keskiarvon oli alle biopolttoaineella tuotetun höyryn hinnan, sähköä ostettiin koko blokin ajalle. Hintakäyrätarjouksessa hyödynnettiin sähkövastusten ohjausvektoria.

Hintakäyrä- ja blokkitarjousten mahdolliset säästöt laskettiin vuosilta 2022–2024 eri kulutusmäärillä. Sitten ajomalliin lisättiin reservimarkkinoilta saatavat tuotot. mFRR-markkinoiden tuotot laskettiin vuorokausihintaennusteiden avulla ja FCR-D-markkinoiden blokkitarjousten avulla. Tämä siksi, koska taulukon 8 mukaisesti mFRR-kapasiteettimarkkinoilla tarjoukset jätetään ennen kuin vuorokausihinnat ovat tiedossa ja FCR-D-markkinoilla vasta hintojen tietämisen jälkeen.

mFRR- ja FCR-D-kapasiteettimarkkinoille osallistuttiin tarjoamalla ylössäätöä sähkövastusten ollessa jännitteisiä ja alassäätöä niiden ollessa jännitteettömiä. Kapasiteettimarkkinoilta saatiin korvaus tarjotun kapasiteetin ja kapasiteettimarkkinoiden hinnan perusteella. mFRR-energiamarkkinoille osallistuttiin ylös- ja alassäädön rajahinnoilla sekä höyryakun asettamilla painerajoituksilla. Jos nämä ehdot täyttyivät, energiemarkkinoilta saatiin tuottoa siirretyn energian ja energiamekinan hinnan tulona. mFRR-energiamarkkinoilla huomioitiin myös valtakunnallisesti aktivoitunut teho, jolloin sen oltua alle sähkövastusten tehon, sähkövastuksia ei voitu hyödyntää kokonaisuudessaan.

## 5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitetään työn tuloksia. Ensin tarkastellaan minimikuorma- ja säätövastekokeen tuloksia. Tämän jälkeen esitetään ajomallin verifiointin tulokset askelvaste- ja sinikäyräkokeella. Lisäksi vertaillaan eri ajostrategioiden taloudellisia tuloksia sähkömarkkinoilla. Lopuksi esitetään uusi suositeltu säätöstrategia höyryakun ohjaamiseen eri painetasoilla MATLAB-simulaatioiden ja laitoksen toiminnan perusteella.

### 5.1 Minimikuorma- ja säätövastekokeen tulokset

#### Minimikuorman testin tulokset ja analysointi

Minimikuorman testejä suoritettiin kolmena päivänä. Taulukossa 11 on esitettyä minimikuorman testin tulokset ensimmäisenä päivänä.

Taulukko 11. Minimikuorman testin tulokset ensimmäisenä päivänä.

	Keskiarvo	Vaihteluväli
Höyryntuotanto [kg/s]	5,4	5,1–5,7
NO <sub>x</sub> -päästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	382,8	287,4–422,7
SO <sub>2</sub> -päästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	70,3	44,3–131,4
Hiukkaspäästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	6,7	5,7–7,7
Petilämpötilan mediaani [°C]	782,4	768,8–794,9
Tuorehöyryn paine [bar]	60,0	59,0–60,8

Toisena päivänä suoritettujen minimikuormatestin tulokset ovat esitettyinä taulukossa 12.

Taulukko 12. Minimikuorman testitulokset toisena päivänä.

	Keskiarvo	Vaihteluväli
Höyryntuotanto [kg/s]	5,0	4,8–5,2
NO <sub>x</sub> -päästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	387,7	285,8–452,0
SO <sub>2</sub> -päästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	55,5	33,1–111,3
Hiukkaspäästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	6,1	4,1–8,2
Petilämpötilan mediaani [°C]	781,0	775,6–785,2
Tuorehöyryn paine [bar]	60,2	59,0–62,2

Taulukossa 13. on esitettyä kolmantena päivänä suoritettujen minimikuormatestin tulokset.

Taulukko 13. Minimikuorman testin tulokset kolmantena päivänä.

	Keskiarvo	Vaihteluväli
Höyryntuotanto [kg/s]	5,0	4,8–5,1
NO <sub>x</sub> -päästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	262,2	185,9–314,0
SO <sub>2</sub> -päästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	56,1	36,2–128,8
Hiukkaspäästöt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	3,4	2,7–5,5
Petilämpötilan mediaani [°C]	781,3	776,3–784,5
Tuorehöyryn paine [bar]	60,1	59,1–62,0

Ensimmäisen minimikuormatestauksen arvojen vaihteluväli oli suurin, koska kokeen aikana tehtiin useita muutoksia säätöparametreihin. Tuloksista nähdään, että NO<sub>x</sub>-päästöt ylittivät keskiarvollisesti raja-arvon ensimmäisen ja toisen kokeen aikana. Toisessa kokeessa höyryvirta onnistuttiin pudottamaan 5 kg/s samalla, kun NO<sub>x</sub>-päästöt pysyivät lähes samalla tasolla kuin ensimmäisessä kokeessa. Kolmannessa säätökokeessa höyrynkulutus pidettiin edelleen keskimäärin 5 kg/s, mutta NO<sub>x</sub>-päästöjen keskiarvo putosi selvästi alle luparajan, eikä yksittäisiä ylityksiä tullut. Kaikissa kolmessa kokeessa petilämpötilan mediaani, tuorehöyryn paine, SO<sub>2</sub>- ja hiukkaspäästöt pysyivät rajoitusten sisäpuolella koko testijakson ajan.

Ensimmäisessä kokeessa havaittiin vuoto syöttöilman esilämmittimessä, mikä ilmeni savukaasun kohonneena happipitoisuutena esilämmittimien jälkeen. Kiertokaasun happipitoisuuden havaittiin oletettavan vakio arvo 6 %, vaikka mitatut arvot vaihtelivat välillä 9,5–12,5 %. Tämä johti liian suureen hapen määrään primääri-ilmassa ja lisäsi NO<sub>x</sub>-päästöjä. Esilämmittimen vuotoa ei voida korjata ennen leijupetikattilan pysäytystä, mutta kierto-kaasun happipitoisuuden asetus päivitettiin vastaamaan todellista mitta-arvoa. Toisessa kokeessa korjaus näkyi NO<sub>x</sub>-päästöjen keskiarvon pienemisenä 5,1 mg/Nm<sup>3</sup>, vaikka höyryn kulutus oli keskimäärin 0,4 kg/s pienempi kuin ensimmäisessä kokeessa. Ilmanpäästömittarille tehtiin huolto toisen ja kolmannen mittauksen välissä. Huollon vaikutus näkyi kolmannessa testissä NO<sub>x</sub>-päästöjen keskiarvon pienentymisellä yli 100 mg/Nm<sup>3</sup> höyrynkulutuksen edelleen ollessa 5 kg/s. Minimikuorman testin tuloksena saatiin, että leijupetikattilalla voidaan tuottaa minimissään 5 kg/s tuorehöyryä.

Esilämmittimen vuoto aiheuttaa primääri-ilman sekoittumisen savukaasun joukkoon kasvattaen NO<sub>x</sub>-päästöjä. Koe olisi siis hyvä suorittaa uudelleen vuosihuollon jälkeen, jotta nähtäisiin vuodon vaikutus NO<sub>x</sub>-päästöjen suuruuteen.

### Säätövastekokeen tulokset ja analysointi

Säätövastekokeita suoritettiin kolmena päivänä. Ensimmäisenä päivänä saadut tulokset eivät olleet käyttökelpoisia automaatiojärjestelmän säätöjen virheellisyyden takia. Taulukossa 14 on esitetty toisena päivänä saadut tulokset.

Taulukko 14. Säätövastekokeen tulokset toisena päivänä.

min	Kasvun aloitus 6,2 kg/s		Pudotuksen aloitus 17,0 kg/s	
	Mitattu [kg/s]	Tavoite [kg/s]	Mitattu [kg/s]	Tavoite [kg/s]
1	6,8	7,0	16,0	16,0
2	8,6	8,0	15,1	15,0
3	9,0	9,0	14,0	14,0
4	11,0	10,0	13,0	13,0
5	12,0	11,0	12,0	12,0
6	12,3	12,0	11,0	11,0
7	13,3	13,0	10,1	10,0
8	14,2	14,0	8,9	9,0
9	15,3	15,0	8,1	8,0
10	16,2	16,0	7,2	7,0

Taulukossa 15 on esitetty säätövastekokeen tulokset kolmantena päivänä.

Taulukko 15. Säätövastekokeen tulokset kolmantena päivänä.

min	Kasvun aloitus 6,3 kg/s		Pudotuksen aloitus 17,0 kg/s	
	Mitattu [kg/s]	Tavoite [kg/s]	Mitattu [kg/s]	Tavoite [kg/s]
1	6,8	7,0	16,2	16,0
2	7,9	8,0	15,0	15,0
3	8,6	9,0	14,1	14,0
4	9,9	10,0	13,1	13,0
5	11,2	11,0	12,1	12,0
6	12,0	12,0	11,0	11,0
7	12,9	13,0	10,1	10,0
8	14,0	14,0	9,1	9,0
9	14,9	15,0	7,9	8,0
10	15,9	16,0	7,0	7,0

Säätövastekokeen rajoittavat tekijät olivat petilämpötilan putoaminen alle 700 °C, tulistimien lämpötilan nousu yli 500 °C tai tuorehöyryn paineen putoaminen alle 55 bar. Taulukossa 16 on esitettynä kokeiden aikana pienimmät arvot petilämpötilan mediaanille ja tuorehöyryn paineelle sekä suurimmat arvot tulistimien lämpötilalle.

Taulukko 16. Säätövastekokeen pienimmät arvot petilämpötilan mediaanille ja tuorehöyryn paineelle sekä suurin arvo tulistimien lämpötilalle.

	Tuorehöyryn paine [bar]	Petilämpötilan me- diaani [°C]	Tulistimien lämpötila [°C]
Toinen säätökoe	58,0	720	490
Kolmas säätökoe	57,5	745	495

Savukaasun päästöpitoisuudet nousivat kokeen aikana luparajojen yläpuolelle SO<sub>2</sub> ja NO<sub>x</sub>-päästöjen osalta, mutta laskivat takaisin sallitulle alueelle kokeen jälkeen. Säätövastekokeesta aiheutuvien päästöjen merkitys on pieni vuorokausitasolla.

Säätövastekokeessa tärkeintä on, että lopullinen höyryvirran arvo on mahdollisimman lähellä tavoitetta. Kokeen aikana olevat erot tavoitearvon välillä eivät haittaa, koska kuorikattilan täytyy tehdä yhtä suuri muutos kokonaisuudessaan. Taulukoista 15 ja 16 nähdään, että mitatut arvot ovat 0,2 kg/s alueen sisällä tavoitearvostaan molempien kokeiden lopussa. Säätövastekokeen tuloksena saadaan, että leijupetikattila pystyy muuttamaan höyryntuotantoaan nopeudella 1 kg/s per minuutti.

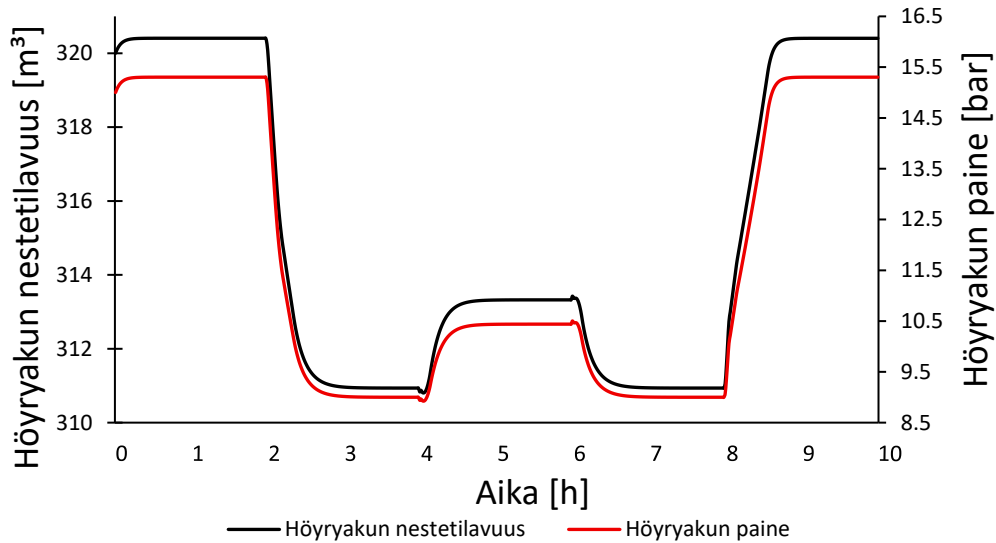
Säätövastekokeet aloitettiin pienellä höyryvirralla, vaikka todellisuudessa kuormanmuutoksia tapahtuu myös suuremmilla höyryntuotannon arvoilla. Pienellä aloitushöyryvirralla suhteellinen muutos on suurin, mikä tekee höyryvirran säätämisestä haastavampaa. Voidaan siis olettaa 1 kg/s per minuutti kuormanmuutoksen onnistuvan kaikilla höyryntuotannon lähtöarvoilla. Lisäksi säätövastekokeessa leijupetikattilan tehoa muutettiin kokonaisuudessaan 33 MW. Höyrynkulutuksen muutostarve on harvoin näin suuri 10 minuutin aikana normaalilla ajolla.

Tulistimien lämpötila nousi testien aikana lähelle sallittua ylärajaa, mutta ei ylittänyt sitä. Jatkossa on tärkeää seurata lämpötilaa, jotta raja-arvo ei ylity.

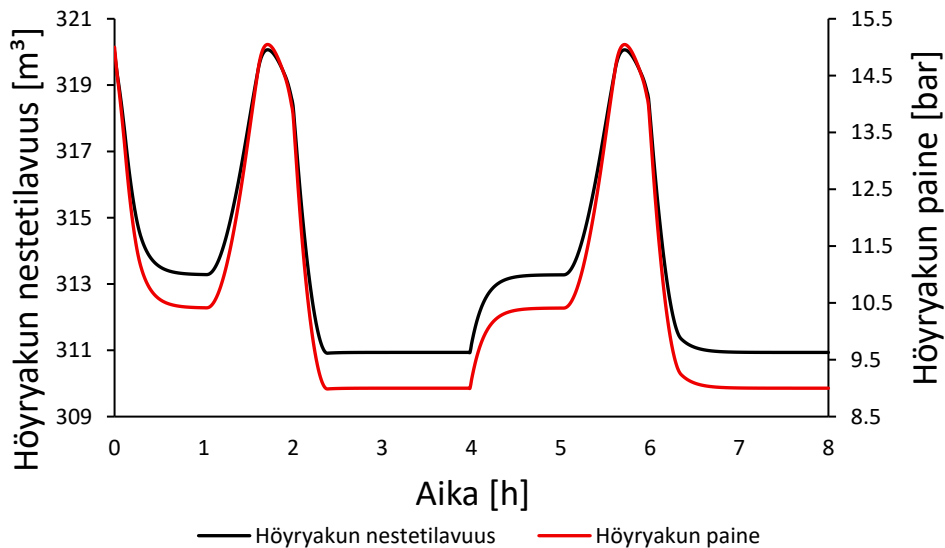
## 5.2 Ajomallin verifiointi

Tässä luvussa esitellään askelvaste- ja sinikäyräkokeiden tulokset. Kuvista 11 ja 12 nähdään höyryakun nestetilavuuden ja paineen välinen yhteys. Paineen kasvaessa myös lämpötila nousee, mikä lisää veden höyrystymistä. Samalla höyryn tiheys kasvaa, jolloin

se vie vähemmän tilavuutta. Tämän seurauksena höyryn tilavuusosuus pienenee ja nesteen osuus kasvaa. Sama ilmiö tapahtuu myös toisinpäin: paineen laskiessa höyry laajenee ja nestetilavuus pienenee.



Kuva 11. Höyryakun nestetilavuuden ja paineen välinen yhteys askelvastekokeessa.

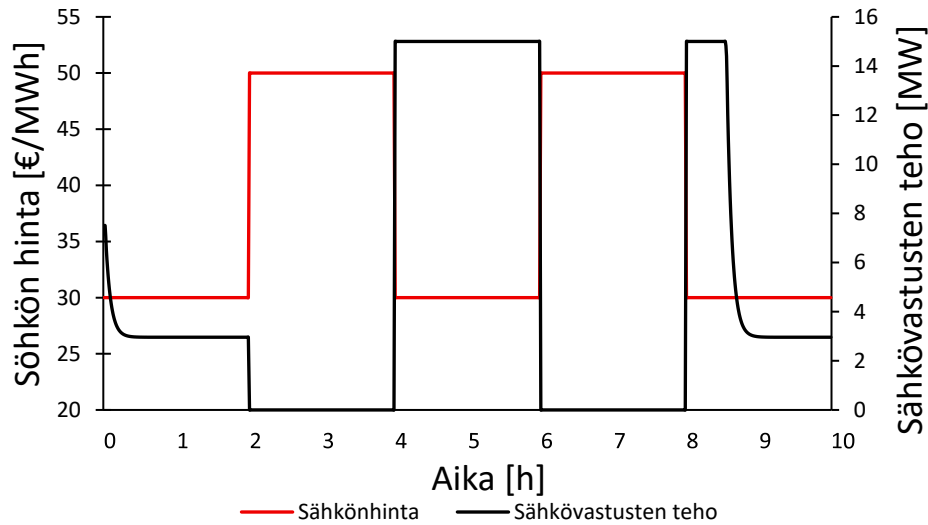


Kuva 12. Höyryakun nestetilavuuden ja paineen välinen yhteys sinikäyräkokeessa.

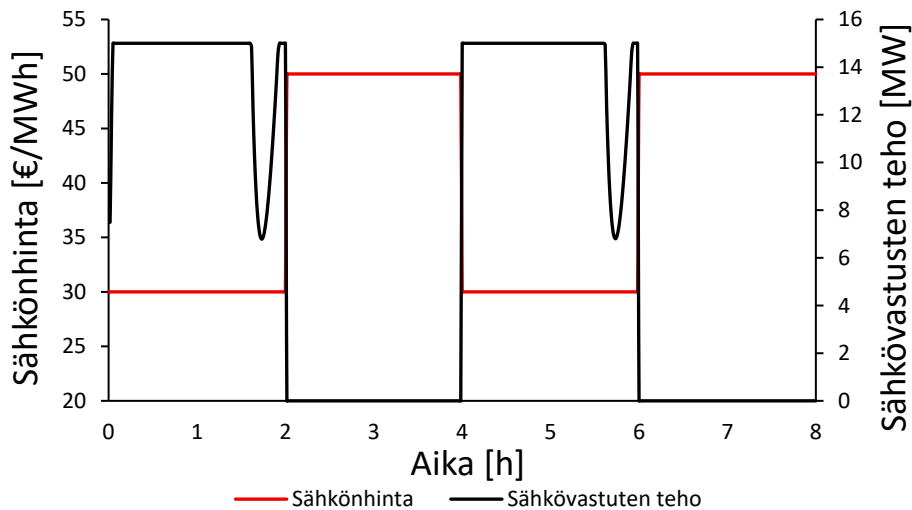
Kuvissa 13 ja 14 on sähkövastusten tehon ja sähköhinnan välinen yhteys. Nähdään, että sähköhinnan ollessa alle 40 €/MWh sähkövastukset aktivoituvat. Sähkövastusten tehoa rajoitetaan halvoilla sähköhinnoilla, kun höyryakun paine nousee yli 14,5 bar.

Askelvastekokeessa paine on ensimmäisen kahden tunnin ajan yli 14,5 bar, jolloin sähkövastuksia rajoitetaan. Paine nousee uudelleen samalle tasolle 8,5 tunnin kohdalla ja

rajoitus astuu jälleen voimaan. Sinikäyräkokeessa höryakun paine ylittää 14,5 bar aikaväleillä 1,6–1,9 h ja 5,6–5,9 h, jolloin sähkövastusten tehoa rajoitetaan.



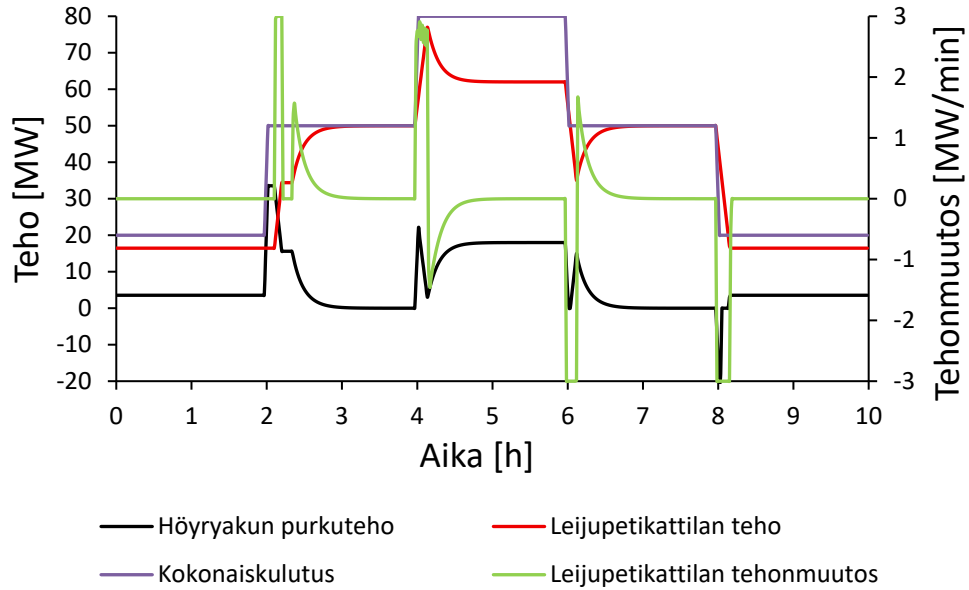
Kuva 13. Sähkövastusten ja sähkönhinnan välinen yhteys askelvastekokeessa.



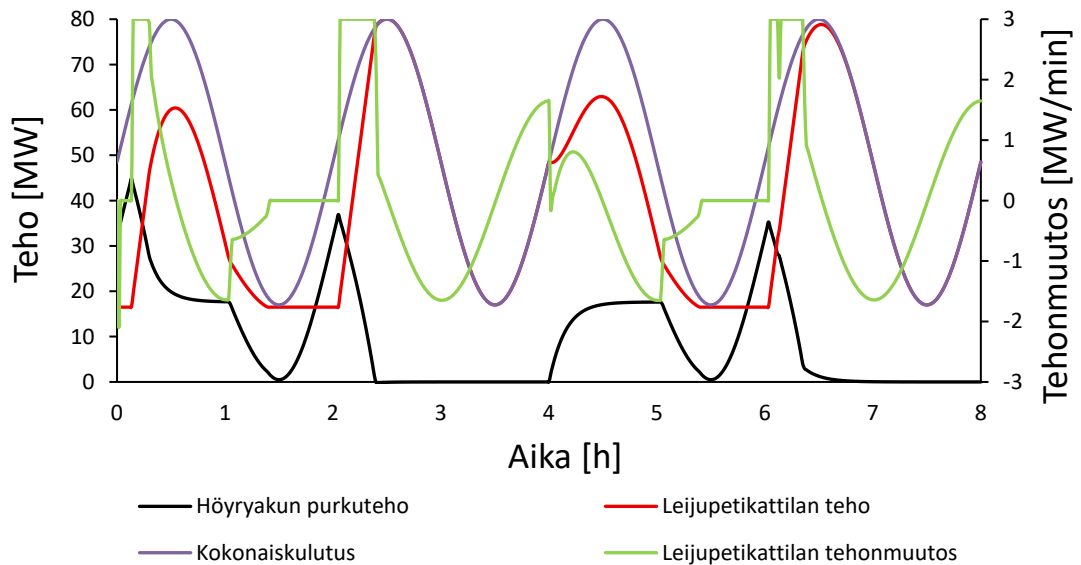
Kuva 14. Sähkövastusten ja sähkönhinnan välinen yhteys sinikäyräkokeessa.

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty leijupetikattilan teho, tehonmuutosnopeus, tuotantolaitoksen kokonaiskulutus ja höryakun purkuteho. Laskennasta ja kuvaajasta nähdään, että leijupetikattilan tehonmuutos ei ylitä rajoitusta 3 MW/min.

Energiataseen avulla laskettiin, että kokonaiskulutus on yhtä suuri kuin leijupetikattilan teho, höryakun purkuteho sekä ulospuhallettu höyry joka hetkellä. Höryakun purkuteho nousee yli 25 MW:iin, kun leijupetikattilan tehonmuutos olisi ylittänyt 3 MW/min. Vastaavasti höryakun teho laskee negatiiviseksi, kun sen alkuperäinen purkuteho on nolla ja leijupetikattilan tehonmuutos olisi alittanut -3 MW/min.



Kuva 15. Höryrakun purkuteho, tuotantolaitoksen kokonaiskulutus, leijupetikattilan teho ja leijupetikattilan tehonmuutosnopeus sinikäyräkokeessa.



Kuva 16. Höryrakun purkuteho, tuotantolaitoksen kokonaiskulutus, leijupetikattilan teho ja leijupetikattilan tehonmuutosnopeus sinikäyräkokeessa.

Taulukossa 17 on koottuna tärkeimmät ääriarvot askelvaste- ja sinikäyräkokeissa. Taulukko sisältää tietoa energiataseen toteutumisesta, höryrakun ääripaineista ja nestetilavuuksista sekä leijupetikattilan minimitehosta ja maksimitehonsäätönopeuksista.

Taulukko 17. Askelvaste- ja sinikäyräkokeen kriittisiä ääriarvoja.

	Askelvastekoe	Sinikäyräkoee
Kulutuksen ja tuotannon ero energiataseessa [MW]	0	0,0
Höyryakun suurin nestetilavuus [m <sup>3</sup> ]	320,4	320,1
Suurin paine höyryakussa [bar]	14,3	14,0
Pienin paine höyryakussa [bar]	7,9	8,0
Leijupetikattilan suurin tehon kasvatus [MW/min]	3.0	3,0
Leijupetikattilan suurin tehon pienennys [MW/min]	-3.0	-2.1
Leijupetikattilan pienin teho [MW]	16.5	16,5

Tuloksista nähdään, että energiatase pysyi nollassa molemmissa kokeissa. Lisäksi höyryakun paine ja nestetilavuus pysyivät sallituilla alueilla sekä leijupetikattilan minimiteho, ja tehonmuutokset eivät rikkoneet niille asetettuja rajoja. Tulosten perusteella ajomallia voidaan hyödyntää luotettavasti tuottojen arvioinnissa.

### 5.3 Tulokset eri ajomallien tuotoista

Sähkövastuksellisen höyryakun potentiaalisia tuottoja tarkasteltiin erilaisilla osallistumismalleilla vuorokausi- ja reservimarkkinoilla. Kun leijupetikattila ei ollut käytössä, höyryn kokonaiskulutus katettiin sähkövastuksilla. Ennen sähkövastuksellista höyryakkua höyryn tuotantokustannukset perustuivat varalla olevan öljykattilan käyttöön.

Höyrynkulutus jaettiin kolmeen eri kategoriaan. Taulukossa 18 on esitetty eri kulutustasojen osuudet vuoden kokonaishöyrynkulutuksen kustannuksista ennen sähkövastuksellista höyryakkua.

Taulukko 18. Höyrynkulutuskategorioiden osuudet vuotuisista kokonaishöyryntuotannon kustannuksista ennen sähkövastuksellista höyryakkua.

Vuosi	Suuri kulutus [%]	Pieni kulutus [%]	Leijupetikattila pois käytöstä [%]
2022	94,0	5,3	0,7
2023	83,5	6,7	9,8
2024	87,8	12,1	0,1

Taulukosta 18 nähdään, että tuotantolaitoksen höyrynkulutuksen kustannuksista suurin osa syntyy suuren kulutuksen aikana. Suuren kulutuksen kustannusten pienentämisellä on siis merkittävin vaikutus kokonaiskustannuksiin.

Taulukossa 19 on esitetty höyryntuotannon kustannukset eri markkinastrategioilla prosenttiosuutena alkuperäisistä kustannuksista. Mitä pienempi prosenttiluku, sitä suuremmat säästöt kyseisellä strategialla saavutetaan.

Taulukko 19. Eri markkinastrategioilla tuotetun höyryn kustannukset verrattuna alkuperäisiin kustannuksiin.

Sähkömarkkinoille osallistumisstrategia	Suuri kulutus	Pieni kulutus	Leijupetikattila pois käytöstä	Vuosi
Blokkitarjous [%]	97,0	96,4	213,1	2022
	93,4	99,1	32,9	2023
	88,4	90,0	29,1	2024
Hintakäyrätarjous [%]	96,7	95,7	213,1	2022
	93,3	97,9	32,9	2023
	88,2	89,1	29,1	2024
Hintakäyrätarjous ennuste [%]	99,0	99,2	213,1	2022
	95,6	96,0	32,9	2023
	90,0	91,5	29,1	2024
Blokkitarjous ja FCR-D-kapasiteettimarkkina [%]	86,9	73,0	-118,0	2022
	83,0	82,9	-67,7	2023
	80,0	74,8	-765,7	2024
Vuorokausihinta ennuste sekä mFRR-kapasiteetti- ja energiamarkkina [%]	97,2	97,6	165,3	2022
	84,2	68,8	-64,4	2023
	79,9	72,4	-2745,4	2024

Negatiiviset arvot tarkoittavat, että höyryntuotannosta on jääty voitolle kapasiteetti- ja energiamarkkinoilta saatujen tulojen ansiosta. Yli 100 %:n arvot puolestaan tarkoittavat, että sähköllä tuotettu höyry on ollut kalliimpaa kuin varakattilalla tuotettu höyry.

Taulukosta 19 nähdään, että hintakäyrätarjouksella säästöt ovat suuren ja pienen kulutuksen aikana olleet 2,4–11,9 % suuremmat kuin blokkitarjouksella. Ennusteeseen perustuva hintakäyrätarjous tuottaa keskimäärin pienimmät säästöt ennustevirheiden vuoksi. Vuonna 2023 ennustepohjainen tarjous tuotti kuitenkin suuremmat säästöt kuin blokki- ja hintakäyrätarjous, koska se onnistui ennustevirheen ansiosta välttämään ulospuhalluksia. Kun ei osallistuta reservimarkkinoille ja leijupetikattila on pois käytöstä, kustannukset pysyvät samoina, koska sähköä ostetaan joka tunnille riippumatta sen hinnasta.

mFRR-markkinoille osallistuessa joudutaan käyttämään sähkönhinnan ennustetta, joten vuorokausimarkkinoilta menetetyt tuotot täytyy korvata energia- ja kapasiteettimaksuilla, jotta se on kilpailukykyinen FCR-D-markkinan kanssa.

FCR-D ja mFRR-markkinoille osallistuttaessa nähdään, että vuonna 2022 FCR-D-markkina tuotti suuremmat säästöt kaikilla höyrynkulutustasoilla. Tämä johtui osittain siitä, että mFRR-markkinoilla ei vielä maksettu kapasiteetin ylläpidosta. Vuosina 2023 ja 2024 mFRR-markkinoilla otettiin käyttöön kapasiteettimaksut, ja ne tuottivat suuremmat säästöt suurimmassa osassa tarkastelujaksoista verrattuna FCR-D-markkinaan. mFRR-energiamarkkinoilla rajahintana oli tarkastelussa 100 €/MWh ylössäädössä ja 0 €/MWh alassäädössä suuren ja pienen kulutuksen aikana. Kun leijupetikattila on pois käytöstä, ylössäädön rajahinta on 150 €/MWh ja alassäädön 0 €/MWh.

mFRR-energiamarkkinan rajahintojen valinta vaikuttaa kokonaistuottojen ja markkinoilta tulevien aktivointikäskyjen määrään. Rajahintojen vaikutusta tuottojen suhteelliseen osuuteen ylös- ja alassäädössä on vertailtu taulukoissa 20 ja 21. Taulukko sisältää koko vuoden höyrynkulutuksen arvot ja pienempi luku tarkoittaa pienempiä tuottoja.

Taulukko 20. mFRR-energiamarkkinalta ylössäädön rajahintojen vaikutus tuottojen suhteeseen ja aktivointien lukumäärään.

Rajahinta ylössäädön aktivoitumiselle [€/MWh]	Tuotot mFRR-energiamarkkinalta [%]	mFRR-energia aktivointien lukumäärä	Vuosi
100	100	991	2022
	100	303	2023
	100	586	2024
150	94,2	633	2022
	95,5	169	2023
	93,5	360	2024
200	83,5	345	2022
	84,7	75	2023
	84,7	225	2024

Taulukko 21. mFRR-energiamarkkinalta alassäädön rajahintojen vaikutus tuottojen suhteeseen ja aktivointien lukumäärään.

Rajahinta alassäädön aktivoitumiselle [€/MWh]	Tuotot mFRR-energiamarkkinalta [%]	mFRR-energiamarkkinan aktivointien lukumäärä	Vuosi
0	100	704	2022
	100	332	2023
	100	22	2024
-5	35,0	199	2022
	60,6	159	2023
	69,6	14	2024
-10	10,6	64	2022
	46,8	101	2023
	0,0	0	2024

Taulukoista 20 ja 21 nähdään, että tuottojen suuruus ja aktivointien määrä laskevat, kun ylössäädön rajahintaa nostetaan tai alassäädön rajahintaa lasketaan.

mFRR-energiamarkkinoilta saatavien tuottojen havainnollistamiseksi taulukossa 23 on esitetty mFRR-kapasiteetti- ja energiamarkkinoiden prosentuaaliset osuudet vuotuisista säästöistä eri vuosina ja höyrynkulutuskategorioissa. Osuuksien summa on 100 %. Rajahinnat ylös- ja alassäädölle ovat samat kuin taulukon 19 laskennassa.

Taulukko 22. mFRR-kapasiteetti- ja energiamarkkinoiden osuudet vuotuisista säästöistä eri vuosina ja höyrynkulutuskategorioissa.

Markkinapaikka	Suuri kulutus	Pieni kulutus	Leijupetikattila pois käytöstä	Vuosi
Kapasiteettimarkkina [%]	89	97	89	2023
Energiamarkkina [%]	11	3	11	
Kapasiteettimarkkina [%]	77	81	90	2024
Energiamarkkina [%]	23	19	10	

Vuonna 2022 ei ollut mFRR-kapasiteettimarkkinaa, joten se on jätetty tarkastelusta pois. Taulukosta 22 nähdään, että kapasiteetti- ja energiamarkkinoilta saatujen säästöjen suhde vaihtelee eri vuosina. Keskimäärin kapasiteettimarkkinalta saadaan suuremmat

säästöt kuin energiamarkkinalta, joten energiamarkkinan rajahintojen muutoksilla ei ole niin suurta vaikutusta kokonaissäästöihin.

Koska höyrynkulutusta ei ennusteta, pienillä kulutustasoilla syntyy tilanteita, joissa sähkövastuksille on ostettu sähkötehoa, mutta tuotettua höyryä ei pystytä varastoimaan tai hyödyntämään. Tällöin ylimääräinen höyry joudutaan puhaltamaan ulos, mikä aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. Taulukossa 23 on esitetty, kuinka paljon enemmän säästöä olisi kertynyt prosentuaalisesti pienen kulutuksen aikana, jos sähköä olisi ostettu kulutuksen mukainen määrä ja ulospuhallusta ei olisi tapahtunut.

Taulukko 23. Prosentuaalinen tuottojen kasvu pienen kulutuksen aikana, jos sähköä olisi ostettu kulutuksen mukainen määrä.

Sähkömarkkinoille osallistumisstrategia	Prosentuaalinen säästöjen kasvu [%]	Vuosi
Blokkitarjous	36,0	2022
	890,1	2023
	40,0	2024
Hintakäyrätarjous	30,3	2022
	366,0	2023
	33,0	2024
Hintakäyrätarjous ennuste	166,8	2022
	90,4	2023
	46,3	2024
Blokkitarjous + FCR-D	4,7	2022
	47,3	2023
	15,8	2024
Vuorokausihinta ennuste + mFRR	52,7	2022
	11,8	2023
	12,2	2024

Taulukosta 23 nähdään, että keskimääräinen säästöprosentin kasvu on pienempi, kun mukaan lasketaan FCR-D- ja mFRR-markkinoilta saadut tuotot. Tämä johtuu siitä, että kokonaissäästöt kasvavat kapasiteetti- ja energiamarkkinoiden ansiosta, jolloin ulospuhalletun höyryn aiheuttama suhteellinen kustannusvaikutus pienenee. Kulutuksen ennustaminen ja FCR-D-markkinoille osallistuminen parantaa pienen kulutuksen aikana säästöjä keskimäärin 22,6 % ja mFRR-markkinoille osallistuminen 25,6 %. Taulukosta 23 käy myös ilmi, että säästöjen kasvu voi olla merkittävä riippuen sähkön hinnasta ja ulospuhalletun höyryn määrästä.

Taulukon 18 mukaisesti pienen kulutuksen höyryntuotanto vastaa noin 5–12 % kokonaishöyryntuotannon kustannuksista. Kokonaishöyryntuotannon kustannuksiin verrattuna säästöt ovat keskimäärin 2,1 % suuremmat FCR-D-markkinoilla ja 1,9 % suuremmat mFRR-markkinoilla, kun ei jouduta ulospuhaltamaan.

## 5.4 Uudet säätöparametrit sähkövastukselliselle höyryakulle

Tässä luvussa on esitettyä vaadittavat uudet säätöparametrit automaatiojärjestelmään, jotta päästään hyödyntämään sähkövastuksellista höyryakkua mahdollisimman kustannustehokkaasti, mutta nykyisiin säätöihin helposti integroitavasti. Muutokset ovat numeroitu jäsentämisen selkeyttämiseksi.

1. D1-venttiilin säätö pidetään ennallaan ja sen tarkoituksena on säätää välipaine- ja matalapainelinjojen paineita priorisoiden välipainelinjan paineen tasaisuus.

2. Sähkövastuksellisella höyryakulla voidaan osallistua vuorokausimarkkinoille blokki- tai hintakäyrätarjouksella. Taulukosta 19 huomattiin, että hintakäyrätarjouksella säästöt ovat hieman suuremmat kuin blokkitarjouksella. Lisäksi hintakäyrätarjouksella sähkövastusten aktivointeja esiintyy useammin, mikä aiheuttaa hieman lisäkustannuksia laitteiston kulumisen kautta. Taulukossa 24 on vertailtu vuorokausimarkkinoille osallistumisen vaikutuksia sähkövastusten aktivointien määrään eri tarjousstrategioilla. Aktivointien lukumäärä sisältää sekä suuren että pienen höyrynkulutuksen tilanteet.

Taulukko 24. Blokki- ja hintakäyrätarjouksen vaikutus sähkövastusten aktivointien määrään suuren ja pienen kulutuksen aikana eri vuosina.

	Blokkitarjous	Hintakäyrätarjous	Vuosi
Sähkövastusten	380	618	2022
päälle- ja poiskyt-	226	604	2023
kentöjen määrä	316	818	2024

Hintakäyrätarjouksella saavutetut säästöt ovat suuremmat kuin blokkitarjouksella, mutta sähkövastusten päälle- ja poiskyt kentöjen määrä on keskimäärin 130 % suurempi.

Lisäksi höyryakun paineenvaihtelut lyhentävät sen väsymiskestoja. Eri vuosien ja vuorokausimarkkinoiden tarjoustyyppien aiheuttamat painevaihtelut on jaoteltu neljään eri paineesykliin. Yksi sykli määritellään painetason muutoksena kahteen suuntaan eli joko nousu ja lasku tai lasku ja nousu. Sykliin määrät on esitetty taulukossa 25.

Taulukko 25. Paineenvaihtelusyklar lukumäärät painetasoittain blokkitarjoukselle ja hintakäyrätarjoukselle eri vuosina.

Sähkömarkkinoille osallistumisstrategia	0–2 bar	2–4 bar	4–6 bar	6–8 bar	Vuosi
Blokkitarjous	23724	64	1	0	2022
	31533	67	2	1	2023
	52619	129	7	7	2024
Hintakäyrätarjous	29222	68	4	0	2022
	30909	79	6	1	2023
	50311	156	10	0	2024

Höyryakun käyttöikä on mitoitettu 8 bar paineenvaihtelusyklar perusteella. Tämän vuoksi lasketut paineenvaihtelusyklar määrät suhteutetaan 8 bar sykleihin yhtälön 10 avulla. Taulukossa 26 on esitetty kokonaispaineenvaihtelusyklar määrä muunnettuna vastaamaan 8 bar kuormitustasoa.

Taulukko 26. Höyryakun paineenvaihteluiden kokonaismäärä suhteutettuna 8 bar paineenvaihteluun eri vuosina.

Sähkömarkkinoille osallistumisstrategia	Kokonaisten syklien määrä 8 bar suhteutettuna	Vuosi
Blokkitarjous	7,21	2022
	9,91	2023
	20,56	2024
Hintakäyrätarjous	9,09	2022
	10,6	2023
	16,9	2024

Yhden 8 bar paineenvaihtelusyklar hinnaksi on arvioitu noin 20 euroa. Eri tarjousstrategioiden aiheuttamat erot syklien määrässä taulukon 26 mukaan johtavat enimmillään noin 80 euron kustannuseroon vuositasolla. Kustannukset eivät siis eroa merkittävästi eri tarjousstrategioiden välillä.

Sähkövastusten aktivoinneista aiheutuvia kustannuksia on vaikea arvioida tarkasti, sillä huoltokustannuksiin vaikuttaa moni tekijä. Sähkövastusten aktivoinnin aiheuttamiksi kunnossapitokustannuksiksi voidaan karkeasti arvioida 1 €/aktivointi. Tämä kattaa erimerkiksi kytkentäkomponenttien kulumisen ja mahdollisen lisähuollon pitkällä aikavälillä.

Tulosten perusteella kustannusten suuruuteen ei ole merkittävää vaikutusta sillä, osallistutaanko vuorokausimarkkinoille blokkitarjouksella vai hintakäyrätarjouksella. Blokkitarjouksella voidaan minimoida huoltotarve ja maksimoimaan sähkövastuksellisen höyryakun käyttöajan, mutta hintakäyrätarjouksella saadaan enemmän säästöjä.

3. Kun höyryakun paine nousee välipainelinjan paineen yläpuolelle, purku välipainelinjaan tulisi aloittaa mahdollisimman alhaisella höyryakun paineella. Tämä pienentää painenvaihteluväliä, mikä pidentää akun käyttöikää. Lisäksi paineen pitäminen matalana maksimoi energiavarausten erotuksen nykyisen ja maksimitilan välillä, mahdollistaen suuremman energian varastoinnin. Purku välipainelinjaan voidaan aloittaa vasta, kun höyryakun paine ylittää välipainelinjan paineen ja siihen lisättävät putkiston painehäviöt.

Elomatic oli laskenut painehäviöiden suuruuksia välipainelinjassa eri höyryn massavirran arvoilla. Taulukossa 27 on esitetty nämä arvot.

Taulukko 27. Välipainelinjan painehäviö eri höyryn massavirroilla.

m (kg/s)	Painehäviö (bar)
9,3	0,36
12	0,60
16,3	1,13
21,6	2,07

Massavirran ja painehäviön välille määritettiin sovitte, joka on esitetty yhtälössä 21.

$$\Delta P = 0,00310\dot{m}^{2,115} \quad (21)$$

, jossa  $\Delta P$  on painehäviön suuruus ja  $\dot{m}$  höyryn massavirta välipainelinjassa.

Lasketaan yhteen leijupetikattilan ja höyryakun höyryn massavirrat sekä määritetään niiden aiheuttama painehäviö yhtälöllä 21. Kun tämä painehäviö lisätään välipainelinjan painetasoon, saadaan purkuventtiilin avaamiseen vaadittava minimipaine höyryakulta.

4. Nykyinen höyryakun automaatiojärjestelmä voidaan pääosin säilyttää ennallaan silloin, kun sähkövastukset eivät ole jännitteisiä. Tällöin järjestelmä tasapainottaa välipaine- ja matalapainelinjojen paineita R3- ja R2-venttiilien sekä höyryakun purku- ja lausventtiilien avulla, pitäen höyryakun paineen välillä 8–10 bar.

Järjestelmään tehdään yksi lisäys. Höyryakun paineen ollessa yli edellä lasketun välipainelinjan syöttöventtiilin minimipurkupaineen, muutetaan höyryakun purkuventtiili hallitsevaksi säädöksi. Tällöin R2-venttiili toimii toissijaisena säätönä välipainelinjan paineenhallinnassa. Näin höyryakun purkunopeus maksimoidaan ja paine saadaan pudotettua

mahdollisimman nopeasti, mikä kasvattaa höyryakun uuden energian varastoinnin kapasiteettia.

5. Nykyisin höyryakun nestetilavuus pidetään noin 50 %:ssa sen kokonaiskapasiteetista. Nestetilavuutta kasvattamalla voidaan varastoida enemmän energiaa. Höyryakun suurin sallittu nestetilavuus on 86 %. Tässä työssä referenssitason nollapisteeksi on valittu alin painetaso, jolla höyryä voidaan vielä purkaa matalapainelinjaan. Tämä alin paine on 4,5 bar, jolloin höyryakun energiasisältö määritellään nollassa. Taulukossa 28 on esitettyä eri paineiden ja nestetilavuuksien energiasisällöt.

Taulukko 28. Paineen ja nestetilavuuden vaikutus höyryakun energiasisältöön.

Paine [bar]	Nestetilavuus [%]	Höyryakun energiasisältö [MWh]
4,5	50,0	0,0
10,0	50,0	6,0
15,0	50,0	9,6
4,5	86,0	0,0
10,0	86,0	9,4
15,0	86,0	14,7

Taulukosta nähdään, että 50 % nestetilavuudella höyryakun maksimi energiasisältö on 9,6 MWh ja 86 % nestetilavuudella 14,7 MWh. Nestetilavuutta kasvattamalla voidaan merkittävästi lisätä höyryakun minimi- ja maksimipaineen välistä energiasisältöä.

Verifiointissa havaittiin, miten paineen muutos vaikuttaa nestetilavuuteen. Kun höyryakun paine on noin 5 bar ja nestetilavuus 80 %, kasvaa nestetilavuus noin 0,55 % jokaista bar kohden painetta nosttaessa sähkövastuksilla. Noin 15 bar paineessa vastaava muutosnopeus on noin 0,375 % bar kohden.

Höyryakun nestetilavuuden säätö kannattaa toteuttaa niin, että yritetään pitää höyryakun nestetilavuus aina 80 %:ssa. Tällöin höyryakun nestetilavuus ei voi ylittää ylärajaa, vaikka sen aloitus paine olisi 5 bar ja se ladattaisiin 15 bar käyttämällä sähkövastuksia, eikä höyryakkua purettaisi missään välissä. Tämä säätötapa ottaa huomioon myös mahdolliset epätarkkuudet paineen mittauksessa, mutta mahdollistaa höyryakun tehokkaan hyödyntämisen.

6. Ajomallista havaittiin, että höyryakun paineen ollessa lähellä 8 bar ja kokonaiskulutuksen kasvaessa nopeasti, paine voi laskea alle 8 bar. Samalla höyryakun nestetilavuus pienenee, mikä aiemman säätölogiikan mukaan saattaisi vaatia lisävettä nestetilavu-

den nostamiseksi 80 %:iin. Koska lisättävän veden entalpia on pienempi kuin höyryakussa olevan veden, sen lisääminen alentaa akun hyödynnettävissä olevaa energiamäärää ja laskee painetta.

Taulukossa 29 tarkastellaan paineen käyttäytymistä kahdessa tilanteessa: ensimmäisessä 1000 kg höyryä puretaan ilman veden lisäystä, toisessa taas höyryn purkua seuraa 1000 kg veden lisäys. Alkutilanteessa höyryakun paine on 8 bar ja nestepinta 80 %.

Taulukko 29. Höyryakun paineen ja nestetilavuuden muutos 1000 kg höyryä purettaessa, ilman veden lisäystä ja veden lisäyksen kanssa.

	Ei lisätä vettä	Lisätään vettä
Paine [bar]	7,68	7,64
Nestetilavuus [%]	79,6	79,8

Taulukosta 29 nähdään, että veden lisääminen ei aiheuta merkittävää paineen pudotusta, mutta ilman lisävettä ylimääräinen paineen lasku voidaan välttää. Tämän vuoksi säätölogiikkaa muutetaan siten, että lauhdesäiliöstä ei syötetä lisävettä höyryakkuun, jos paine on alle 8 bar.

7. Tällä hetkellä höyrynkulutusta ei ennusteta, joten muodostuu kaksi vaihtoehtoa toimia pienen kulutuksen ja matalan sähkön hinnan aikana. Sähkövastuksille ostetaan energiaa aina 15 MW normaalin tuotannon aikana halvalla sähkön hinnalla, jolloin höyryakun paineen noustessa ylärajalle voidaan sähkövastusten tehoa rajoittaa tai pitää teho 15 MW:ssa ja ulospuhaltaa ylimääräinen höyry. Sähkövastusten rajoittamisesta seuraa reservisanktio, mutta saadaan myytyä käyttämätön sähkö tasesähkömarkkinoilla. Reservimarkkinoiden sanktiossa käytetään vuoden keskiarvoa reservimarkkinoiden kapasiteettihinnoista ja tasesähköntuotoissa tasesähkön keskiarvohintaa samalla aikavälillä. Taulukossa 30 on esitettyinä nämä hinnat.

Taulukko 30. Vuosien 2023–2025 tasesähkön sekä FCR-D- ja mFRR-ylössäätökapasiteettien keskiarvohinnat.

	1.1.2023- 1.7.2023	1.7.2023- 1.1.2024	1.1.2024- 1.7.2024	1.7.2024- 1.1.2025	1.1.2025- 1.7.2025
Tasesähkön keskiarvohinta [€/MWh]	56,73	63,04	65,36	34,74	29,53
Reservikapasiteetin keskihinta ylössäädölle (FCR-D / mFRR) [€/MW,h]	21,99 / 9,00	32,91 / 23,00	23,70 / 10,00	12,93 / 12,00	13,10 / 10,00

Taulukossa 31 on esitettyä laskelmat tasesähkön tuottojen ja reservimarkkinoiden sanktioiden erotukselle MWh kohden.

Taulukko 31. Tasesähkön tuottojen ja reservimarkkinoiden sanktioiden summa aktivoimatta jätettyä MWh kohden sähkövastuksilla verrattuna ulospuhallukseen.

	Tasesähkön tuotot [€]	Reservimarkkinoiden sanktiot (FCR-D / mFRR) [€]	Yhteensä (FCR-D / mFRR) [€]
1.1.2023-1.7.2023	57,24	65,97 / 27,00	-8,73 / 30,24
1.7.2023-1.1.2024	63,55	98,73 / 69,00	-35,18 / -5,45
1.1.2024-1.7.2024	65,87	71,1 / 30,00	-5,23 / 35,87
1.1.2024-1.7.2024	38,25	38,79 / 36,00	-0,54 / 2,25
1.1.2025-1.7.2025	30,04	39,3 / 30,00	-9,26 / 0,04

Taulukosta 31 nähdään, että yhteistulos osallistuttaessa FCR-D-markkinoille on aina negatiivinen, joten ulospuhaltaminen on taloudellisempaa näissä tilanteissa. Toisaalta mFRR-markkinoilla yhteistulos on keskimäärin positiivinen, jolloin on taloudellisempaa vähentää sähkövastusten tehoa.

Vaikka tehon rajoittaminen voi joissain tilanteissa olla taloudellisesti kannattavampaa, reservimarkkinoiden ensisijainen tarkoitus on sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitäminen. Kun sähkövastukset tarjotaan reservikapasiteetiksi, luvattu teho tulisi pitää käytettävissä. Kapasiteetin toimituksen laiminlyönti voi johtaa sanktioihin ja heikentää toimijan luotettavuutta markkinoilla. Siksi tehon rajoittamista tulisi välttää tilanteissa, joissa kapasiteetti on jo sitovasti tarjottu reservimarkkinoille.

8. Automaatiojärjestelmään luodaan uusi ajomalli, joka aktivoituu vastusten aktivoituessa. Uudessa ajomallissa höyryakun latausta välipainelinjasta ei kasvateta höyryakun paineen mukaan. Höyryakun latausventtiili avataan vain silloin, kun välipainelinjan paine nousee yli 11,5 bar ja höyryakun paine on alle 11 bar. Kun höyryakun paine saavuttaa 11 bar, venttiili suljetaan. Näin huomioidaan mahdollinen mittausvirhe ja varmistetaan höyryvirran suunta oikeaksi. Purkuventtiili välipainelinjaan avautuu yhtälöllä 21 lasketun painehäviön perusteella, kun höyryakun paine ylittää purkuun vaadittavan minimipaineen.

Höyryakun purkutehoa matalapainelinjaan säädetään matalapainelinjan ja höyryakun paineiden mukaan. Höyryakun säätö pyrkii pitämään paineen 8–10 bar välillä siten, että purkuteho on nolla 8 bar paineessa ja saavuttaa maksiminsa 10 bar paineessa. Matalapainelinjan paine toimii hallitsevana säätönä, jolloin se voi pakottaa höyryakun purkutehon kasvatuksen, vaikka höyryakun paine olisi 8 bar.

R2- ja R3- venttiilit toimivat edelleen matala- ja välipainelinjojen tasapainottajina, mutta ensisijaisesti ne mukautuvat höyryakun purkutehoihin. Kun höyryakun paine nousee, kasvatetaan ensin purkua matalapainelinjaan ja samanaikaisesti pienennetään R3-venttiilin avaumaa. Purkutehoa rajoittaa vasta R3-venttiilin minimiaukeama. Vastaavasti purkua välipainelinjaan kasvatetaan höyryakun paineen ylittäessä välipainelinjan purkuran paineen, samalla pienentäen R2-venttiilin avaumaa minimirajaan asti. R3- ja R2-venttiilien saavuttaessaan minimiaukeaman ja höyryakun paineen edelleen noustessa, ulospuhalletaan ylimääräinen höyry. Tarkoituksena on pitää höyryakun paine ja samalla paineen vaihtelu mahdollisimman pienenä ja hyödyntää sähkövastuksien tuottamaa höyryä mahdollisimman paljon.

9. Leijupetikattilan ollessa käytössä osallistutaan mFRR-energiamarkkinoille ylös- ja alassäädön rajahinnoilla. Rajahinnat valitaan niin, ettei aktivoinnista aiheudu kustannuksia.

Ylössäädössä sähkövastusten tehoa pienennetään, mutta sähköstä maksetaan silti spot-hinnan mukaan. Jos höyryakun paine laskee aktivoinnin seurauksena liikaa, voidaan joutua lisäämään leijupetikattilan tehoa. Tämä nostaa kustannuksia, sillä höyryn tuottaminen kattilalla maksaa arviolta noin 40 €/MWh. Lisäksi tehonsäädöt kuluttavat kattilaa ja lisäävät huoltotarvetta. Näiden tekijöiden perusteella on perusteltua valita ylös-säädön rajahinnaksi 100 €/MWh, jolloin tuotot maksimoidaan ilman riskiä negatiivisista tuotoista. Taulukosta G nähdään, että tuotot pienenevät rajahinnan kasvaessa tätä suuremmiksi.

Alassäädössä sähkövastukset aktivoituvat, ja säästöä syntyy, jos alassäädön rajahinta on alle biomassalla tuotetun höyryn hinnan. Tämä edellyttää, että höyryakussa on varastointitilaa ja kulutus riittää höyryn hyödyntämiseen. Jos sähköllä tuotettu höyry joudutaan ulospuhaltamaan, aktivoinnista ei synny säästöjä. Tämän riskin vuoksi alassäädön rajahinnaksi asetetaan 0 €/MWh. Se maksimoi tuotot ilman riskiä ulospuhalluksen aiheuttamista negatiivisista kustannuksista. mFRR-kapasiteettimarkkinoille osallistutaan 1 €/MW,h tarjouksella, jotta tarjous menisi läpi mahdollisimman helposti, mutta kapasiteettivalmiudesta saadaan silti korvaus.

FCR-D-markkinoilla ei ole varsinaista energiainmarkkinaa, mutta siirtyneestä energiasta maksetaan energiainmaksu. Jos alassäädössä joudutaan ulospuhaltamaan ylimääräinen höyry, sähköstä joudutaan maksamaan, mutta sitä ei hyödynnetä. Tällöin kapasiteettimarkkinoilta saatavan korvauksen tulisi kattaa menetetyt energian arvo. Ylössäädössä

tehoa pienennetään, jolloin saadaan korvaus energiasta. Tämä korvaus voi olla pienempi kuin leijupetikattilalla tuotetun höyryn hinta, jolloin saavutettavat säästöt pienenevät.

Näiden tilanteiden todennäköisyyttä on arvioitu taajuusdatan perusteella. Taulukossa 32 on esitetty vuoden 2023 taajuusarvoihin perustuva arvio näiden tilanteiden esiintymistodennäköisyydestä ja vaikutuksesta höyryakun energiasisältöön.

Taulukko 32. FCR-D-markkinoiden aktivointien suuruuksien todennäköisyydet ja vaikutus höyryakun energiasisältöön.

Taajuus- alue [Hz]	Todennäköisyys taajuusalueelle [%]	Aktivoinnin keskimää- räinen kesto [s]	Keskimääräinen vaiku- tus höyryakun energia- sisältöön [kWh]
>50,1	99,60	6,0	3,1
>50,2	0,38	6,6	14,4
>50,3	0,02	2,5	20,5
<49,9	99,50	6,0	3,1
<49,8	0,47	4,2	10,0
<49,7	0,02	7,8	30,5
<49,6	0,01	5,7	51,3

Taulukosta 32 nähdään, että FCR-D aktivointien vaikutus höyryakun energiasisältöön on keskimäärin pieni. Näin ollen voidaan olettaa tilanteet, joissa joudutaan ulospuhaltamaan höyryä tai lisäämään leijupetikattilan tehoa harvinaisiksi.

FCR-D ylös- ja alassäädön hinnaksi kapasiteettimarkkinoilla laitetaan 1 €/MW,h, jotta tarjous menisi läpi mahdollisimman helposti, mutta kapasiteettivalmiudesta saadaan silti korvaus.

9. Automaatiojärjestelmään luodaan toinen uusi ajomalli tilanteisiin, jolloin leijupetikattila on pois käytöstä ja tuotantoa ei ole. Tällöin kulutusta on vain kaukolämmössä, joka on matalapainelinjassa. Höyrynkulutukselle tarvitaan arvio sääennusteen perusteella ja ostetaan koko päivälle sähköä sen perusteella. mFRR-markkinoilla voidaan osallistua ylös- ja alassäätöön, mutta ylös- ja alassäätöön osallistuminen aiheuttaa riskin sille, että laitoksen kaukolämpöön ei ole riittävästi höyryä. Höyryn riittävyyden todennäköisyyttä voidaan parantaa sillä, että ostetaan ylimääräistä sähköä koko päivälle, jolla voidaan korvata ylös- ja alassäädöstä aiheutuvat energian menetyksen.

mFRR-aktiivointeja ylössäädön rajahinnalla 150 €/MWh tulee keskimäärin kaksi päivässä, jolloin ylimääräistä sähköä tarvitsee ostaa jokaiselle tunnille noin 0,3 MW. Taulukossa 33 on vertailtu ylimääräisen sähköenergian oston kannattavuutta.

Taulukko 33. Säästöjen suuruus reservimarkkinoilta verrattuna tilanteeseen, jolloin ei osteta ylimääräistä sähköä ja ei osallistuta ylössäätömarkkinoille

Vuosi	Säästöjen suuruus [%]
2022	2850
2023	120
2024	97

Taulukosta nähdään, että ylimääräisen energian ostaminen tuo keskimäärin tuottoja mFRR ylössäätökapasiteetti ja -energiamarkkinalta. Toisaalta vuonna 2024 tuotot olisivat olleet pienemmät. Tämän perusteella kannattaisi ostaa ylimääräistä sähköä ja osallistua myös ylössäätömarkkinoille.

Alassäädön rajahinnaksi asetetaan mFRR-energiamarkkinalla 0 €/MWh ja ylössäädölle 150 €/MWh. FCR-D- ja mFRR-kapasiteettimarkkinalla rajahinnaksi asetetaan 1 €/MWh.

10. Luodaan sähkövastusten automaatioon ohitus reservimarkkinoiden aktivoinneille. Tällöin reservimarkkinoille tarjotessa allassäätöä ja aktivoinnin tullessa sähkövastukset aktivoituvat riippumatta höyryakun paineesta. Tällöin höyryakun paineen noustessa liian korkealle pakotetaan höyryakusta syöttö matala- ja välipainelinjoihin ja ulospuhalletaan niistä tarvittaessa ylimääräinen höyry.

## 5.5 Tulosten pohdinta

Simuloidun mallin ja todellisuuden välillä on useita eroavaisuuksia, jotka heikentävät tulosten sovellettavuutta käytäntöön. Esimerkiksi höyryakun purkuteho mallissa nousee lineaarisesti höyryakun paineen mukaan, kun taas todellisuudessa säätö perustuu PI-säätöön, jota venttiiliohjaus seuraa. Lisäksi PI-säätimien puuttuminen mallista johtaa heiluntaan paineen ja tehon arvoissa, mikä ei vastaa automaattiohjattua järjestelmää.

Höyryverkon matalapaine- ja välipainelinjoihin syötetyn höyryvirran suhde ei todellisuudessa ole vakio, kuten mallissa oletetaan. Lisäksi höyryvirran painemittaukset ovat epätarkkoja, joten niiden mittausepä-tarkkuudet täytyy ottaa huomioon.

Mallia ei voitu validoida, sillä tarvittavaa mittausdataa ei ollut saatavilla, mikä heikentää sen luotettavuutta. Mallista puuttuvat muut höyryntuottajat, kuten jauhatuksen hukkalämpö ja kemikaalien talteenottokattila. Biopolttoaineen hinnan mahdollinen muutos ei sisälly skenaarioihin, vaikka se vaikuttaa tuotantoratkaisujen kannattavuuteen.

Mallissa huomioitiin sähkövastusten hyötysuhde, mutta ei putkistojen. Toisaalta myöskään putkiston tilavuudesta aiheutuvaa hitausvaikutusta ei ole mukana. Näiden lisääminen parantaisi mallin kykyä jäljitellä järjestelmän todellista käyttäytymistä.

Sähkön hinta jouduttiin muuttamaan 15 minuutin resoluutiolle, koska nykyiset sähköhinnat saatavissa vain tuntikohtaisesti. Tämä ei täysin vastaa todellisuutta ja näin ollen vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Lisäksi sähkövastusten ohjausmalli ei perustu höyrynkulutuksen ennusteeseen, vaan toimii nykyhetkessä. Jatkokehityksenä sähkönhankinta voitaisiin optimoida kulutusennusteen avulla, jolloin ostettaisiin juuri oikea määrä sähköä ja välttyttäisiin ylimääräisiltä kustannuksilta.

Laitos kuuluu useamman laitoksen yhteissähkötaseeseen. Jatkossa sähkövastuksia voitaisiin hyödyntää yhteistaseen poikkeamien hallintaan, jotta laitoksen joustavuutta sähkömarkkinoilla saataisiin parannettua.

Lisäksi, jos öljykattilasta ei luovuta heti, voidaan leijupetikattilan ollessa sammuneena määrittää rajahinta öljyllä tuotetulle höyrylle. Tätä rajahintaa voidaan käyttää sähköhinnan vertailuarvona, jolloin ostetaan sähköä vain, jos se on tätä halvempaa. Tällöin sähkökattila toimii kustannustehokkaana vaihtoehtona öljykattilalle. Lisäksi leijupetikattilan ollessa pois päältä, voitaisiin luoda sähkön ostolle optimointialgoritmi, jolloin ostettaisiin enemmän sähköä halvimmillä tunneilla ja vähemmän kalliimmilla. Näin voitaisiin kasvattaa säästöjä entisestään.

Tuloksissa oli laskettu kannattavuutta osallistua mFRR-ylössäätomarkkinoille leijupetikattilan ollessa pois käytöstä. Tässä riskinä on usean mFRR-ylössäätoaktivoinnin aiheutuminen samana päivänä, jolloin höyry ei välttämällä riitä tehtaan lämmittämiseen, vaikka ostetaan ylimääräistä sähköä.

## 6. YHTEENVETO

Teollisuuden höyryntuotannon sähköistäminen on noussut viime vuosina ajankoh-  
taiseksi keinoksi vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista ja hyödyntää edullisia  
sähkön hintoja. Samaan aikaan uusiutuvien energianlähteiden tuotannon lisääntyminen  
ja sääriippuvuus ovat edistäneet reservimarkkinoiden kehittymistä ja luoneet uusia mah-  
dollisuuksia joustavan kulutuksen hyödyntämiselle. Tässä diplomityössä tutkittiin sähkö-  
vastuksellisen höyryakun käyttöä tehtaan höyryverkossa leijupetikattilan rinnalla. Tutki-  
muskohteena oleva höyryakku on jo olemassa ja siihen suunnitellaan lisättäväksi säh-  
kövastukset, joiden avulla voidaan korvata varalla oleva raskasöljykattila. Työn tavoit-  
teena oli selvittää, miten sähkövastuksia kannattaa ohjata sähkömarkkinoilla höyryntuo-  
tannon kustannustehokkuuden parantamiseksi. Tavoitteena oli saavuttaa taloudellista  
hyötyä ilman, että höyryverkon toiminta häiriintyy.

Työssä rakennettiin MATLAB-ympäristöön simulointimalli, joka kuvaa sähkövastusten,  
höyryakun ja kuplaleijupetikattilan yhteistoimintaa. Malli verifioitiin askelvaste- ja sinikäy-  
räkokeilla ja kattilalle suoritettiin säätövaste- ja minimikuormakokeet, joiden perusteella  
määritettiin sen minimiteho ja tehonmuutosnopeudet. Tutkimuksessa tarkasteltiin useita  
ajostrategioita, kuten vuorokausimarkkinoille tehtäviä blokki- ja hintakäyrätarjouksia  
sekä osallistumista FCR-D- ja mFRR-reservimarkkinoille.

Leijupetikattilan minimikuorma ja säätövastekokeen perusteella saatiin, että kattilan mi-  
nimiteho on 5 kg/s ja maksimitehonmuutosnopeus 1 kg/s/min. Tuottolaskelmien perus-  
teella sähköistetty höyryakku mahdollistaa tarkastellussa kohteessa merkittäviä kustan-  
nussäästöjä. Simulointien mukaan höyryntuotannon säästöpotentiaali vuositasolla voi  
olla 13–26 % verrattuna tavanomaiseen operointiin, riippuen sähköhinnoista ja reservi-  
markkinoiden tuotoista. Hintakäyrätarjouksella saavutettiin keskimäärin 2–12 % suurem-  
mat säästöt kuin blokkitarjouksella. Samalla sähkövastusten käyttö kasvoi 130 % verrat-  
tuna blokkitarjoukseen, mikä lisää laitteiston kulumista ja kunnossapitokustannuksia.  
Höyrynkulutuksen ennustamisen havaittiin vaikuttavan hieman säästöjen suuruuteen.  
Tarkempi ennustaminen voisi kasvattaa säästöjä noin 2 %. Työssä esitettiin myös ehdo-  
tus uudesta säätölogiikasta reduktio- ja säätöventtiileille höyrylinjojen ja höyryakun pai-  
netasojen perusteella. Lisäksi tarkasteltiin höyryakun nestetilavuuden kasvattamista 50  
prosentista 80 prosenttiin, mikä kasvattaa höyryakun energianvarastointikykyä ja paran-  
taa sähkömarkkinoille osallistumiskykyä.

Sähkövastuksellisella höyryakulla saadut tuotot maksimoidaan osallistumalla vuorokausimarkkinoille hintakäyrätarjouksella ja reservimarkkinoille FCR-D- tai mFRR-markkinoiden kautta. Lisäksi höyrynkulutuksen ennustaminen tuo lisäsäästöjä. Höyryakun nestetilavuuden kasvattaminen vähentää ennustevirheistä johtuvia ulospuhalluksia. Säättölogiikassa pyritään pitämään höyryakun purkuteho ensisijaisena säätökeinona, mikä vähentää paineen nousua ja ulospuhallustilanteita sekä pidentää akun käyttöikä.

Diplomityö täydentää tutkimusaukkoa sähköistetyn höyryakun ja leijupetikattilan yhteistoiminnasta teollisessa ympäristössä sekä höyryakun sähköistämisestä. Se osoittaa, että sähkövastuksellinen höyryakku voi toimia tehokkaana joustoelementtinä sekä sähkö- että höyryverkon kannalta ja tarjota mahdollisuuksia teollisuuden kilpailukyvyn parantamiseen. Työssä esitetyt automaatio- ja simulointitulokset tarjoavat konkreettista pohjaa tuleville toteutuksille. Työ toimii hyvänä lähtökohtana jatkotutkimukselle, jossa voidaan tarkastella esimerkiksi yhteissähkötaseen hyödyntämistä ja laajempaa höyryverkoston optimointia.

# LÄHTEET

- Abdelsalam, M. Y., Sarafraz, P., Cotton, J. S., & Lightstone, M. F. (2017). Heat transfer characteristics of a hybrid thermal energy storage tank with Phase Change Materials (PCMs) during indirect charging using isothermal coil heat exchanger. *Solar Energy*, *157*, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.043>
- Aleksejev, V. (2024). *Sähkökattilan ja höyryakun muodostaman systeemin hyödyntäminen reservimarkkinalla*. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/168773>
- Antaki, G. A. (2023). *Piping And Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity, And Repair*.
- Basu, P., & Bhattacharya, S. C. (2006, helmikuuta 17). *Combustion and gasification in fluidized beds*. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Combustion%20and%20Gasification%20in%20Fluidized%20Beds&publication\\_year=2006&author=P.%20Basu](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Combustion%20and%20Gasification%20in%20Fluidized%20Beds&publication_year=2006&author=P.%20Basu)
- Biglia, A., Comba, L., Fabrizio, E., Gay, P., & Ricauda Aimonino, D. (2017). Steam batch thermal processes in unsteady state conditions: Modelling and application to a case study in the food industry. *Applied Thermal Engineering*, *118*, 638–651. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.004>
- Danish Energy Agency. (2016, elokuuta). *Technology Data for Generation of Electricity and District Heating | Energistyrelsen*. <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-generation-electricity-and-district-heating>
- Dusek, S., & Hofmann, R. (2018). A hybrid energy storage concept for future application in industrial processes. *Thermal Science*, *22*(5), 2235–2242. <https://doi.org/10.2298/TSCI171230270D>
- Dusek, S., Hofmann, R., & Gruber, S. (2019). Design analysis of a hybrid storage concept combining Ruths steam storage and latent thermal energy storage. *Applied Energy*, *251*, 113364. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113364>
- Emerson Automation Solutions. (2019). *Control Valve Handbook | Emerson FI*. <https://www.emerson.com/fi-fi/automation/valves/controlvalves/control-valve-handbook>
- Energiavirasto. (ei pvm.). *Päästöluvut*. Energiavirasto. Noudettu 21. toukokuuta 2025, osoitteesta <https://energiavirasto.fi/paastoluvat>

- eSett. (2022). *Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja*.
- Fangkuai. (2023, marraskuuta 12). Vertical Boiler—The Efficient Solution for Industrial Heating. *Boilerfactory*. <https://www.makeboiler.com/vertical-boiler/>
- Fingrid. (2017a, toukokuuta 19). *Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>
- Fingrid. (2017b, toukokuuta 19). *Maksut yksitasemallissa*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/maksut/>
- Fingrid. (2019, huhtikuuta 25). *Markkinapaikat*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyysohjdanto-sahkomarkkinoihin/>
- Fingrid. (2023, syyskuuta 20). *Itsenäinen aggregointi*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyysohjdanto-sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/itsenainen-aggregointi/>
- Fingrid. (2024a, heinäkuuta 2). *aFRR, automaattinen taajuuden palautusreservi*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/afrr-automattinen-taajuuden-palautusreservi/>
- Fingrid. (2024b, heinäkuuta 2). *FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/fcr-taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi/>
- Fingrid. (2024c, heinäkuuta 2). *FFR, nopea taajuusreservi*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/ffr-nopea-taajuusreservi/>
- Fingrid. (2024d, heinäkuuta 2). *Kuinka osallistua reservimarkkinoille*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/>
- Fingrid. (2024e, heinäkuuta 2). *Reservikaupankäynti ja tiedonvaihto*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto/>
- Fingrid. (2024f, heinäkuuta 2). *Reservit*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/>

- Fingrid. (2024g, syyskuuta 1). *Ehdot ja edellytykset manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) toimittajalle*. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-1-mfrr-ehdot-2023-1-sopimuksellinen-reservitoimittaja-voimaantulo-1.9.2024.pdf>
- Fingrid. (2024h, joulukuuta 5). *Päivänsisäinen kaupankäynti siirtyy varttiin tammi- ja maaliskuussa 2025*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/paivansisainen-kaupankaynti-siirtyy-varttiin-tammi--ja-maaliskuussa-2025/>
- Fingrid. (2024i, joulukuuta 19). *Sähkön vuorokausimarkkinat siirtyvät 15 minuutin kaupankäyntijaksoon kesäkuussa 2025*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/sahkon-vuorokausimarkkinat-siirtyvat-15-minuutin-kaupankayntijaksoon-kesakuussa-2025/>
- Fingrid. (2025a). *Taselaskennan esimerkki*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/taselaskennan-esimerkki/>
- Fingrid. (2025b, tammikuuta 14). *Reservituottolaskuri*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/reservituottolaskuri/>
- Fingrid. (2025c, helmikuuta 10). *Ehdot ja edellytykset taajuuden vakautusreservin (FCR) toimittajalle*. [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-1-fcr-ehdot-2025\\_2.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-1-fcr-ehdot-2025_2.pdf)
- Fingrid. (2025d, maaliskuuta 3). *Uuden 15 minuutin mFRR-energiamarkkinan käyttöönotto 4.3.2025 on varmistunut*. Fingrid. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2025/uuden-15-minuutin-mfrr-energiamarkkinan-kayttoonotto-4.3.2025-on-varmistunut/>
- Frantti, A. (2020, lokakuuta 16). Paljon uutta reservirintamalta. *Fingrid-Lehti*. <https://www.fingrid-lehti.fi/paljon-uutta-reservirintamalta/>
- Herre, L., Tomasini, F., Paridari, K., Söder, L., & Nordström, L. (2020). Simplified model of integrated paper mill for optimal bidding in energy and reserve markets. *Applied Energy*, 279, 115857. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115857>
- Hiltunen, P. (2025). *28.1.2025 Energia-alan tutkimusseminaari*:
- Ilic, M., Stevanovic, V. D., Petrovic, M. M., & Milivojevic, S. (2024). Numerical investigations of steam accumulator dynamics: Assessment of computational models. *Journal of Energy Storage*, 96, 112633. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112633>

- International Renewable Energy Agency, IRENA. (2017). *Renewable energy: A key climate solution*.
- Jukka Kakkonen. (2024, joulukuuta 13). *Reservimarkkinoiden tilannekatsaus*. Fingrid. [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/markkinatoimikunta/smtk1312\\_reservimarkkinoiden\\_tilannekatsaus.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/toimikunnat/markkinatoimikunta/smtk1312_reservimarkkinoiden_tilannekatsaus.pdf)
- Kallio, S., Kytö, M., Majanne, Y., Kortela, J., Melamies, A., Niemi, P., Ylä-Outinen, V., & Aaltonen, T. (2016). Report on limitations of combustion-based generation technologies. 2016.
- Kapjor, A., Durcansky, P., & Vantuch, M. (2020). Effect of Heat Source Placement on Natural Convection from Cylindrical Surfaces. *Energies (Basel)*, 13(17), 4334-. <https://doi.org/10.3390/en13174334>
- Khan, A. A., De Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21–50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>
- Kitto, J. B., & Stultz, S. C. (2005). *Steam—Its Generation and Use*. [https://www.academia.edu/41579939/Steam\\_Its\\_Generation\\_and\\_Use](https://www.academia.edu/41579939/Steam_Its_Generation_and_Use)
- Kolstad, C. (2024). *Ball Valve—Working Principle and Types*. Tameson.Com. <https://tameson.com/pages/ball-valve-introduction>
- Koornneef, J., Junginger, M., & Faaij, A. (2007). Development of fluidized bed combustion—An overview of trends, performance and cost. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(1), 19–55. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.001>
- Kun, F., Carmona, H. A., Andrade, J. S., & Herrmann, H. J. (2008). Universality behind Basquin's Law of Fatigue. *Physical Review Letters*, 100(9), 094301–094301. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.094301>
- Lutz, J., Schlangenotto, H., Scheuermann, U., & De Doncker, R. (2018). Thyristors. Teoksessa J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, & R. De Doncker (Toim.), *Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reliability* (ss. 313–340). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70917-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70917-8_8)

- Maruf, Md. N. I., Morales-España, G., Sijm, J., Helistö, N., & Kiviluoma, J. (2022). Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>
- MATLAB. (ei pvm.). *What Is MATLAB?* Noudettu 29. toukokuuta 2025, osoitteesta <https://se.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- Merritt, C. (2016). *Process steam systems: A practical guide for operators, maintainers, and designers* (1st ed.). Wiley. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-18766084-2c5beec9f4.pdf>
- Nasdaq Commodities. (ei pvm.). *European and Nordic Power Derivatives | Nasdaq*. Noudettu 7. heinäkuuta 2025, osoitteesta <https://www.nasdaq.com/solutions/nordic-european-power>
- Nord Pool. (ei pvm.-a). *A supplement to the day-ahead market and helps secure balance*. Noudettu 7. heinäkuuta 2025, osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Intraday-market/>
- Nord Pool. (ei pvm.-b). *Read how members use block orders*. Noudettu 29. huhtikuuta 2025, osoitteesta <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Order-types/Block-bid/>
- Oakey, J. (2015). *Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels*. Elsevier Science & Technology. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4188454>
- Packman Industrial Group. (ei pvm.). *Electrical Steam Boiler*. Packman Industrial Group.
- PARAT IEH. (ei pvm.). *PARAT IEH High Voltage Electrode boiler—PARAT Halvorsen AS*. Noudettu 20. tammikuuta 2025, osoitteesta <https://www.parat.no/en/products/industry/parat-ieh-high-voltage-electrode-boiler/>
- Parkkila, V. (2024). A TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF ELECTRIC HEATING INTEGRATION IN FLUIDIZED BED BOILER. 2024-12-16.
- PCR PXs & All NEMO Committee. (2024, elokuuta 1). *EUPHEMIA Public Description Single Price Coupling Algorithm*. <https://www.nordpoolgroup.com/globalassets/download-center/single-day-ahead-coupling/euphemia-public-description.pdf>

- Peters, J., Langner, E., Ströhle, J., & Epple, B. (2021). Acceleration of Load Changes by Controlling the Operating Parameters in CFB Co-Combustion. *Frontiers in Energy Research*, 9.
- Popescu, I. (2014). *Computational hydraulics: Numerical methods and modelling*. IWA Publishing.
- Renewable Energy—Our World in Data. (ei pvm.). Noudettu 3. helmikuuta 2025, osoitteesta <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- Spirax-sarco. (2007). *The Steam and Condensate Loop*.
- Stevanovic, V. D., Maslovaric, B., & Prica, S. (2012). Dynamics of steam accumulation. *Applied Thermal Engineering*, 37, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.007>
- Stevanovic, V. D., Petrovic, M. M., Milivojevic, S., & Maslovaric, B. (2015). Prediction and Control of Steam Accumulation. *Heat Transfer Engineering*, 36(5), 498–510. <https://doi.org/10.1080/01457632.2014.935226>
- Tamminen, T. (2022). *Höyryverkon energiatehokkuuden analysointi ja kehitys*. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/164430>
- TLV. (2022, lokakuuta 6). *Pressure Reducing Valves for Steam*. TLV. <https://www.tlv.com/en-us/steam-info/steam-theory/other/pressure-reducing-valves-for-steam>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (ei pvm.). *Työ- ja elinkeinoministeriö*. Työ- ja elinkeinoministeriö. Noudettu 8. huhtikuuta 2025, osoitteesta <https://tem.fi/paastokauppa>
- Underwood, C. P., Shepherd, T., Bull, S. J., & Joyce, S. (2018). Hybrid thermal storage using coil-encapsulated phase change materials. *Energy and Buildings*, 159, 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.095>
- Vakkilainen, E. K. (2017a). 4—Steam–Water Circulation Design. Teoksessa E. K. Vakkilainen (Toim.), *Steam Generation from Biomass* (ss. 87–114). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804389-9.00004-6>
- Vakkilainen, E. K. (2017b). 10—Fluidized Bed Boilers for Biomass. Teoksessa E. K. Vakkilainen (Toim.), *Steam Generation from Biomass* (ss. 211–236). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804389-9.00010-1>
- Vakkilainen, E. K. (2017c). 12—Measurements and Control. Teoksessa E. K. Vakkilainen (Toim.), *Steam Generation from Biomass* (ss. 260–272). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804389-9.00012-5>

Wagner, W., & Ranta, O. (with Opetushallitus). (1994). *Lämmönsiirto*. Painatuskeskus.

Wallace, W. D., & Spielvogel, L. G. (1974). Field Performance of Steam and Hot Water Electric Boilers. *IEEE Transactions on Industry Applications, IA-10(6)*, 761–769. IEEE Transactions on Industry Applications. <https://doi.org/10.1109/TIA.1974.349227>