



Tomi Sainio

Pikajäähdytyksen ohjeistus ja suunnittelu jätevoimalaitoksen höyryturbiinille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

21.11.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Tomi Sainio
Otsikko:	Pikajäähdytyksen ohjeistus ja suunnittelu jätevoimalaitoksen höyryturbiinille
Sivumäärä:	27 sivua + 10 liitettä
Aika:	21.11.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiantuotantomenetelmät
Ohjaajat:	Lehtori Tomi Hämäläinen Tuotanto-Omaisuspäällikkö Petri Parviainen

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia höyryturbiinin jäähdytyksen mahdolliselle nopeuttamiselle Vantaan Energian Långmossabergenin jätevoimalaitoksella. Jätevoimalaitos on vuonna 2014 valmistunut sähköä ja lämpöä tuottava yhteistuotantolaitos, joka käyttää polttoaineenaan yhdyskunnan sekajätettä.

Höyryturbiinin luonnollista jäähtymistä ei voida pitää kustannustehokkaana. Jätevoimalaitoksen kattiloiden vuosihuoltoaika on suhteellisen lyhyt turbiinin kannalta. Höyryturbiinilla on suuri massa, jonka luonnollinen jäähtyminen kestää useita vuorokausia. Höyryturbiinia pikajäähdyttämällä jäähtyminen on nopeampaa, jolloin huoltotoimenpiteet päästään aloittamaan aiemmin.

Työssä käydään yleisesti läpi arinakattilan toimintaperiaatetta sekä syvällisemmin höyryturbiinin toimintaa ja siihen liittyviä osia- ja järjestelmiä.

Käytössä olevan järjestelmän kehittäminen todettiin olevan ideaalisin vaihtoehto höyryturbiinin jäähdytyksen nopeuttamiselle. Kaikki tarvittavat komponentit ovat jäähtymisen tehostamiseksi valmiina. Jäähdytyksen tehostamisen toimenpiteiksi ehdotetaan ohjausjärjestelmän ohjelmamuutosta sekä turbiiniasiantuntijan konsultointia turvallisen ja nopean jäähtymisen varmistamiseksi.

Avainsanat: vuosihuolto, höyryturbiini

Abstract

Author:	Tomi Sainio
Title:	Instructions and Plan for Forced Cooling the Steam Turbine in a Waste-to-Energy Plant
Number of Pages:	27 pages + 10 appendices
Date:	21 March 2022
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Energy and Environmental Engineering
Professional Major:	Energy Production Technology
Supervisors:	Tomi Hämäläinen, Senior Lecturer Petri Parviainen, Production Asset Manager

The aim of this Bachelor's thesis was to study the possibilities to accelerate the cooling of the steam turbine at Vantaa Energy Långmossabergen waste to energy plant. The waste to energy plant is a combined heat and power plant completed in 2014 and uses municipal mixed waste as its fuel.

Natural cooling of the steam turbine cannot be considered as cost effective. The annual maintenance period for the waste to energy plant's boilers is relatively short in terms of the steam turbine. A steam turbine has a large mass, and the natural cooling of the turbine takes several days. By force-cooling the turbine the cooling is faster and it is possible to start maintenance procedures earlier.

In this thesis, the operation principle of the grate is generally reviewed, whereas the operation of the steam turbine and the related turbine parts and systems are studied in more depth.

The development of the system in use was found to be the most ideal option for accelerating the cooling of the steam turbine. All the necessary components to enhance the cooling are ready. As actions to improve the cooling, a program change to the control system and consultation of a turbine expert are proposed to ensure safe and fast cooling.

Keywords: annual maintenance, steam turbine

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Vantaan Energia Oy	2
2.1	Yritys	2
2.2	Långmossabergenin jätevoimalaitos	3
3	Höryturbiini	5
3.1	Höryturbiinin historia	6
3.2	Höryturbiinin toimintaperiaate	6
3.3	Höryturbiinien jaottelu	6
3.3.1	Lauhdeturbiini	9
3.3.2	Vastapaineturbiini	9
3.4	Turbiinilaitteisto	9
3.4.1	Generaattori	9
3.4.2	Öljyjärjestelmä	9
3.4.3	Turbiinin suojausjärjestelmä	11
3.4.4	Lauhdutusjärjestelmä	11
3.5	Höryturbiinin osat	12
3.5.1	Venttiilit	12
3.5.2	Laakerointi	14
3.5.3	Tiivisteet	15
3.6	Jätevoimalan höryturbiini Siemens SST 800 HNK 71/80	15
4	Höryturbiinin pikajäähdytys	16
4.1	Jäähdytys ilman toimenpiteitä	16
4.2	Nykyinen pikajäähdytys	17
4.3	Pikajäähdytyksen riskit	21
4.4	Pikajäähdytyksen kehittäminen	21
4.4.1	Käytössä olevan menetelmän kehittäminen	21
4.4.2	Jäähdytys tyhjiöpumppujen avulla	22
4.4.3	Kannattavuuslaskelmat	23
5	Yhteenveto	24

Liitteet

Liite 1: Jäähdytystrendi vuoden 2017 turbiinin alasajosta

Liite 2: Jäähdytystrendi vuoden 2018 turbiinin alasajosta

Liite 3: Jäähdytystrendi vuoden 2019 turbiinin alasajosta

Liite 4: Jäähdytystrendi vuoden 2020 turbiinin alasajosta

Liite 5: Jäähdytystrendi vuoden 2021 turbiinin alasajosta

Liite 6: Suhteellisen venymän trendi vuoden 2017 turbiinin alasajosta

Liite 7: Suhteellisen venymän trendi vuoden 2018 turbiinin alasajosta

Liite 8: Suhteellisen venymän trendi vuoden 2019 turbiinin alasajosta

Liite 9: Suhteellisen venymän trendi vuoden 2020 turbiinin alasajosta

Liite 10: Suhteellisen venymän trendi vuoden 2021 turbiinin alasajosta

Lyhenteet

CHP	<i>Combined heat and power</i> , yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto
DCS	<i>Distributed control system</i> , voimalaitoksen hajautettu ohjausjärjestelmä
MW	Megawatti, energian yksikkö megajoulea per sekunti
TLJ	Turvallisuuteen liittyvät järjestelmät

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön aiheena oli luoda kehitysehdotus Vantaan Energian Långmossabergenin jätevoimalaitoksen höyryturbiinin pikajäähdytykselle. Työn on tilannut Vantaan Energia Oy.

Jätevoimalaitoksella poltetaan suuri määrä yhdyskunnan sekajätettä, ja jätteen polttaminen kuormittaa laitoksen komponentteja. Vuosihuollossa huolletaan ja vaihdetaan laitteita, joita käytön aikana ei voida korjata tai vaihtaa. Vuosihuollon aikataulu on etukäteen tarkkaan suunniteltu, ja laitoksen alhaalla oloaikaa pyritään pitämään mahdollisimman lyhyenä. Tyypillisesti molemmat kattilat ovat alhaalla noin yhden viikon, jolloin höyryturbiinilla tehtävät huoltotoimenpiteet ovat mahdollisia. Tämä aiheuttaa höyryturbiinilla ongelman; höyryturbiini on suuri metallista valmistettu lämpövoimakone, jolla on suuri massa. Tämä massa ei jäähdy luonnollisesti hetkessä, vaan vaatii useiden vuorokausien jäähdyttämisen, kunnes huoltotyöt voidaan aloittaa. Pikajäähdytys mahdollistaa pidemmän ajanjakson työskennellä höyryturbiinilla, jolloin alhaalla oloaikaa saadaan lyhennettyä.

Työn tavoitteena on pyrkiä tutkimaan ja selvittämään eri vaihtoehtoja höyryturbiinin jäähdyttämiseksi mahdollisimman nopeasti, mutta kuitenkin rakenteellisesti turvallisesti. Työssä esitellään ensin Vantaan Energia Oy sekä käydään läpi jätekattilan toimintaperiaatetta. Höyryturbiinin osiin ja järjestelmiin paneudutaan syvällisemmin. Tämän jälkeen käsitellään nykyisen pikajäähdytyksen toimintaa ja kokemuksia sekä mahdollisia kehittämistoimenpiteitä ja vaihtoehtoisia jäähdytystapoja. Työssä saadut tulokset ja havainnot käsitellään raportin lopussa.

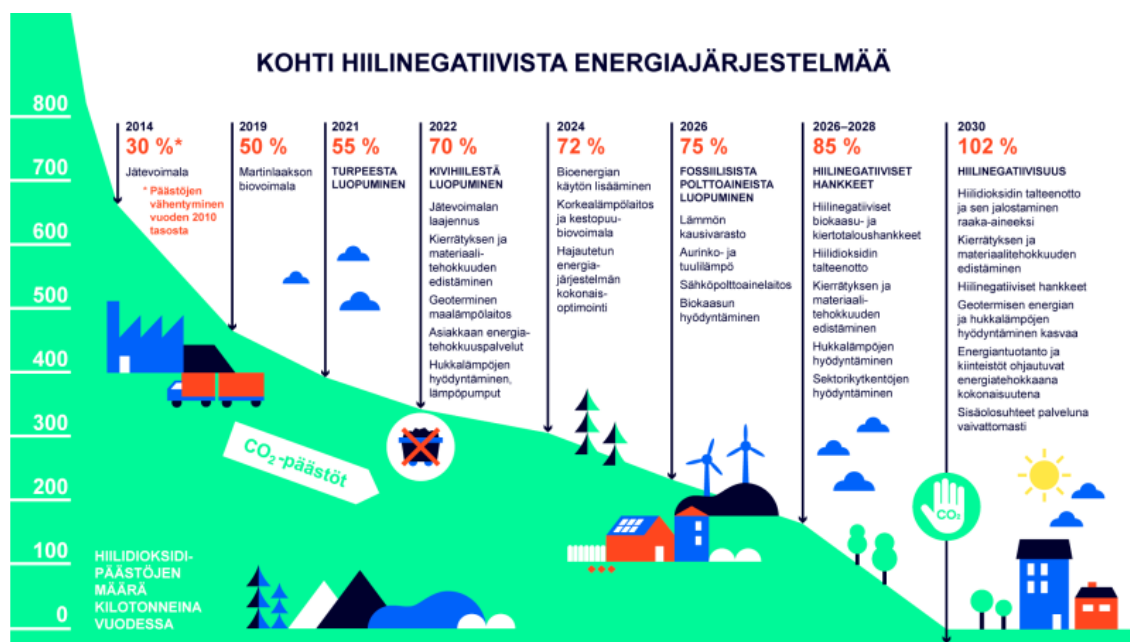
2 Vantaan Energia Oy

2.1 Yritys

Vantaan Energia Oy on suomalainen sähkö- ja lämpöä asiakkailleen tuottava ja toimittava kaupunkienergiayritys. Yhtiö kuuluu Vantaan Energia-konserniin ja toimii myös konsernin emoyhtiönä. Vantaan Energia Sähköverkot Oy vastaa Vantaan alueen sähköverkkotoiminnasta ja on täysin Vantaan Energia Oy:n omistama tytäryhtiö. Vantaan Energia Oy:n omistavat Vantaan kaupunki 60 %:n sekä Helsingin kaupunki 40 %:n omistuosuuksilla. Vantaan Energia Oy:llä oli vuonna 2021 kolme osakkuusyhtiötä: Svartisen Holding A/S 49,6 %:n, Kolsin Voima Oy 22,5 %:n sekä Oomi Palvelut Oy 28,3 %:n omistuosuuksilla. [1.]

Yhtiö tuottaa asiakkailleen energiapalveluita Vantaan alueella pääasiassa Martinlaakson voimalaitoksella sekä Långmossabergenin jätevoimalaitoksella. Näiden laitoksien osuus vuonna 2021 oli yhtiön sähköntuotannosta 44 %. 56 % Sähköntuotannosta syntyi osakkuusyhtiöiden kautta. Yhtiö tuottaa myös energia- ja yrityspalveluita Tuusulan ja Järvenpään alueilla toimivalle Vantaan Energia Keski-Uusimaa Oy:lle. [1.]

Yhtiö on asettanut tavoitteekseen siirtyä fossiilittomaan energiantuotantoon vuonna 2026 ja katsonut myös tästä eteenpäin tavoitellen hiilinegatiivisuutta 2030-mennessä. Kuvassa 1 havainnollistetaan tätä tavoitetta.



Kuva 1. Vantaan Energian Hiilinegatiivinen 2030 hanke [2.]

2.2 Långmossabergenin jätevoimalaitos

Långmossabergenin jätevoimalaitos on vuonna 2014 käyttöönotettu jätteenpolttolaitos, jossa on tällä hetkellä kaksi alkuperäistä jättekattilalinjaa (JV1) sekä syksyllä 2022 käyttöönotettu kattilalinja (JV2).

JV1-jättekattilat ovat rakenteeltaan mäntäärinoita, pituudeltaan 10,5 m ja leveydeltään 7,8 m per kattilalinja. Arinaelementit ovat jäähdytetty sekä ilmalla että vedellä. [3.]

Jättekattiloiden teknisiä tietoja:

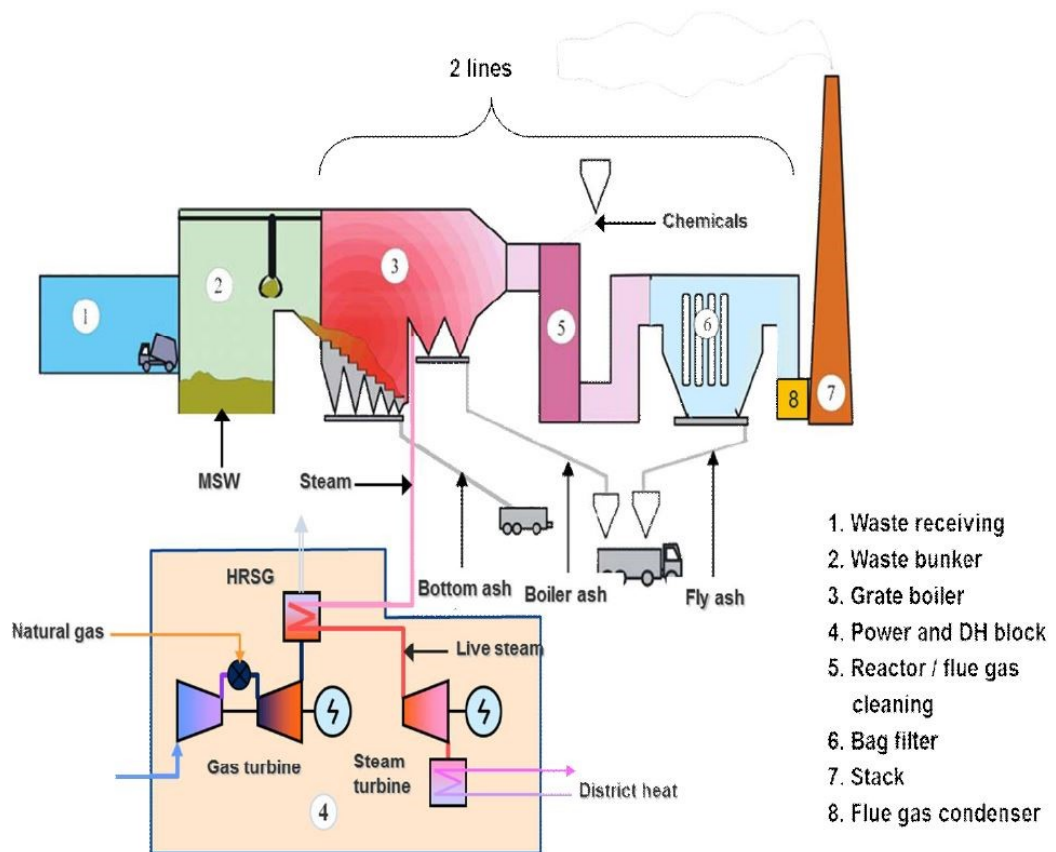
- tuorehöyryn massavirta 42 kg/s
- tuorehöyryn nimellispaine 91 bar(abs)
- tuorehöyryn nimellislämpötila 400 °C
- syöttöveden lämpötila 132 °C

JV1-jätekattiloissa poltetaan pääasiassa sekajätettä Uudenmaan alueelta keskimäärin 360 tonnia vuodessa [4]. Jätettä vastaanotetaan voimalan vastaanottohalliin noin 140 kuormaa päivässä. Vastaanottohallista jäte nostetaan kahmareilla syöttösuppilon, josta suppilon pohjalle pudotessaan jäte siirretään syöttötyöntimien avulla arinalle, jossa tapahtuu itse polttotapahtuma [5].

Polton yhteydessä syntyy lämpöenergiaa, joka siirtyy kattilan seinien kattilaputkissa virtaavaan syöttöveteen. Syöttövesi pumpataan syöttövesipumpulla ensin kattilan ulkopuolella oleviin ekonomaisereihin, joissa esilämmitetään syöttövettä. Tämän jälkeen syöttövesi johdetaan lieriöön ja sieltä edelleen kattilan seinissä oleviin lämmittämättömiin laskuputkiin ja lämmitettyihin nousuputkiin. Luonnonkierto kattilavedessä saadaan aikaiseksi lasku- ja nousuputkien sisältämän veden ja vesihöyryseoksen välillä olevasta tiheyserosta. Lieriössä vesi ja höyry erotetaan toisistaan, jolloin höyry nousee lieriön yläosaan veden jatkaessa kiertoaan takaisin kattilaan laskuputkien kautta. Lieriön yläosasta kylläinen höyry siirtyy putkistoa pitkin tulistimelle, jossa höyryyn siirretään edelleen lämpöä ja muodostuu tulistettua höyryä. [6.] Tämä höyry johdetaan edelleen lämmön talteenottokattilaan (LTO), jossa jo tulistettua höyryä lisätulistetaan kaasuturbiinilla tuotettavan lämmön avulla. LTO-kattilalta tulistettu höyry johdetaan höyryturbiinille, jossa tulistetun höyryn sisältämä entalpia muutetaan kineettiseksi energiaksi ja höyryturbiinin läpi virratessaan edelleen sähköenergiaksi turbiinin akselin ja generaattorin välityksellä. [7.] Tämän jälkeen lauhtunut höyry ajetaan turbiinilta kaukolämmönvaihtimiin, jossa höyry luovuttaa energiasisältöään kaukolämpöjärjestelmään. Kaukolämmönvaihtimessa höyryn faasi muuttuu nesteeksi, jolloin se voidaan pumpata takaisin syöttövesisäiliöön ja siitä edelleen takaisin kiertoon syöttövesipumpun avulla. [8.]

Poltoissa syntyvät kuumat savukaasut johdetaan kattilan läpi, jolloin savukaasuista otetaan lämpöenergiaa talteen monessa eri vaiheessa. Kattilan läpi kuljettuaan savukaasuista erotetaan ensimmäisenä hiukkaspartikkeleita sähkö-

kösuodattimen avulla. Tämän jälkeen savukaasuihin lisätään kalkkia ja aktiivihiihtä, joilla savukaasuista saadaan erotettua rikkidioksidia sekä raskasmetalleja. Savukaasut johdetaan seuraavaksi pussisuodattimeen, jonka tehtävänä on erottaa savukaasuista edelleen epäpuhtauksia. Viimeisenä vaiheena ennen savupiippua savukaasut lauhdutetaan noin 50 asteeseen savukaasulauhduttimessa, jossa savukaasuista saadaan otettua vielä lämpöä talteen. [9.] Kuvassa 2 on havainnollistettu voimalaitoksen toimintaperiaatetta.



Kuva 2. Jätevoimalaitoksen yksinkertaistettu toimintakaavio [7.]

3 Höyryturbiini

3.1 Höryturbiinin historia

Ensimmäinen höryturbiini on kehitetty vuonna 1883. Gustaf De Laval, ruotsalainen siviili-insinööri suunnitteli aktiotyyppisen höryturbiinin meijeriin kerman erotusta varten. Sir Charles Parsons kehitti vuonna 1884 reaktiotyyppisen turbiinin tietämättä De Lavalin keksinnöstä. Tämä turbiini oli teholtaan 7,5 kW. Ensimmäistä kertaa höryturbiinin ja generaattorin yhdistelmällä tuotettiin sähköä voimalaitoksessa. [10, s. 43.]

3.2 Höryturbiinin toimintaperiaate

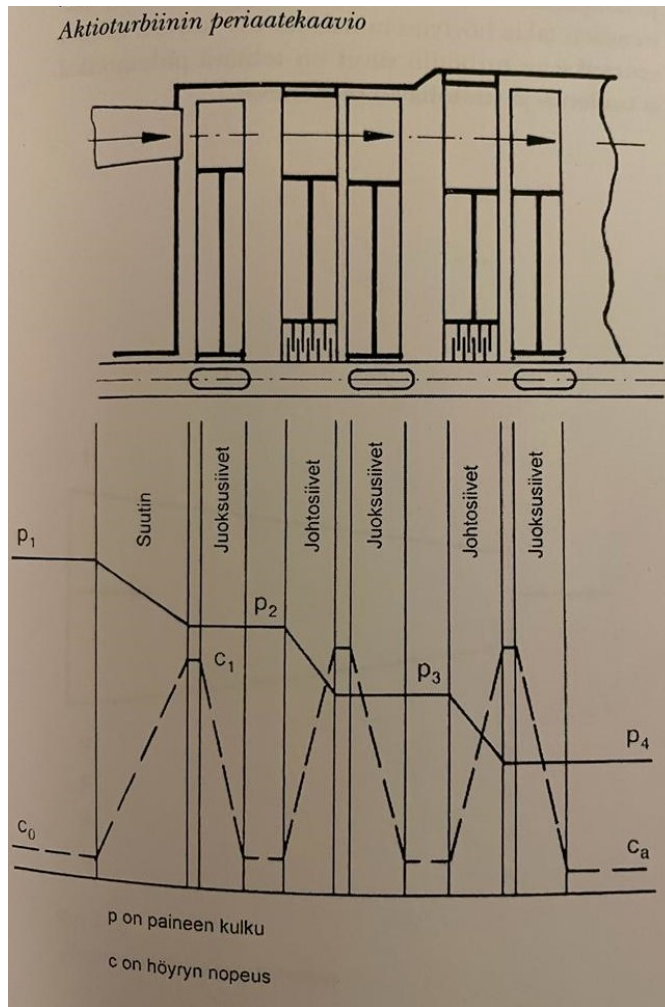
Höryturbiini on lämpövoimakone, jonka tarkoituksena on muuttaa höyryn lämpöenergia kineettiseksi energiaksi, jolla voidaan pyörittää turbiinin akselia. Akseliin on tavallisesti kytketty myös generaattori, jolloin akseliin siirtynyt pyörimisenergia saadaan muutettua sähköenergiaksi. [10, s. 44.] Itse höryturbiini on vain osa laajempaa kokonaisuutta, jota tarvitaan turbiinin häiriöttömään pyörittämiseen.

Höryturbiinissa höyryn lämpöenergia muutetaan turbiinin johtosiivissä kineettiseksi energiaksi, joka suihkutessaan juoksusiipien läpi saa niihin aikaan kehävoiman, joka aiheuttaa roottorin akselin pyörimisen. Høyryn virtaus turbiinin läpi ohjataan turbiinissa kiinteästi olevien johtosiipien kautta, jolloin höyryn nopeus ja suuntaus saadaan optimaaliseksi turbiinin juoksusiiville. Johto- ja juoksusiivet muodostavat turbiinissa vyöhykkeitä, jotka määrittävät, puhutaanko yksi- vai monivyöhykkeisistä turbiineista. [10, s. 45.]

3.3 Höryturbiinien jaottelu

Höryturbiinit voidaan jakaa aktio- ja reaktioturbiineihin toimintatavan mukaisesti. Aktioturbiinissa, yleisesti myös tasapaineturbiinissa höyryn entalpiamuutos

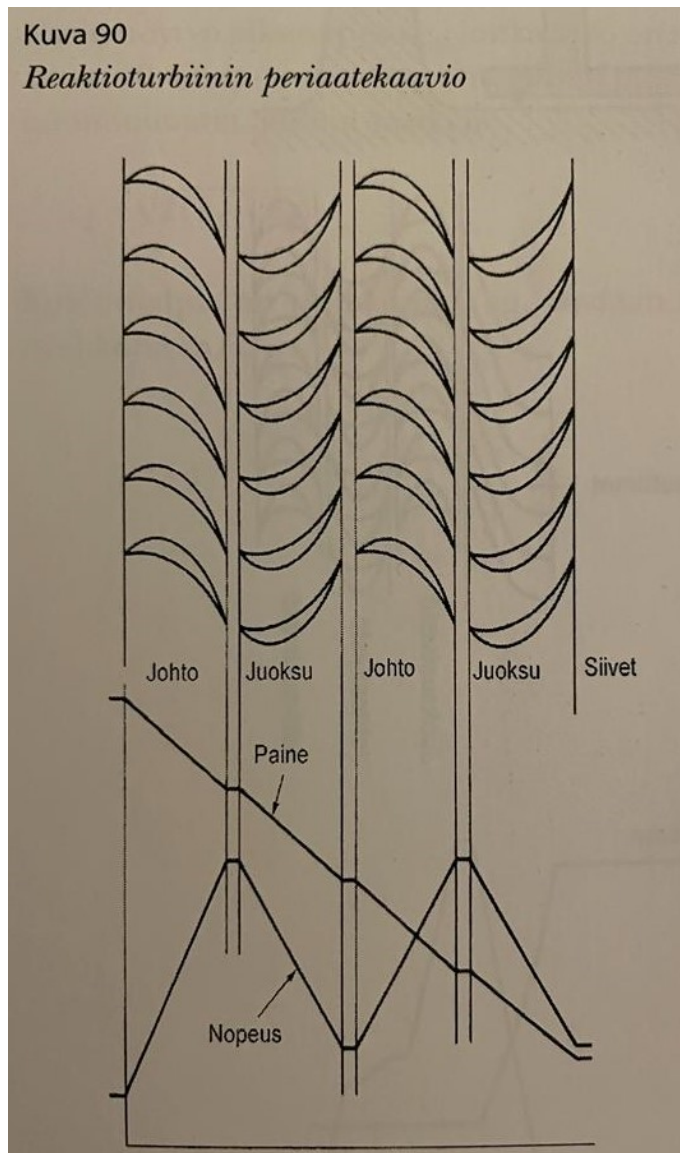
muutetaan nopeusenergiaksi ainoastaan turbiinin kiinteissä johtosiivissä ja juoksusiipien läpi suihkutessaan höyryn paine pysyy vakiona. Tämä saa aikaan kehävoiman juoksusiivistössä. Aktioturbiinia kutsutaankin tasapaineturbiiniksi juuri juoksusiivistössä vallitsevan vakiopaineen vuoksi. [10, s. 48.] Kuvassa 3 on havainnollistettu aktioturbiinin toimintaperiaatetta.



Kuva 3. Aktioturbiinin periaatekaavio [11, s. 111.]

Reaktiiturbiineissa eli ylipaineturbiineissa entalpiamuutos muuttuu nopeusenergiaksi sekä johto- että juoksusiivissä. Tällöin höyryn virtausnopeus on suurempi juoksusiipeen nähden johtuen entalpian muutoksesta sekä juoksu- että johtosiivistössä. Tämä saa aikaan juoksupyörään kehävoiman ja roottorin pyörimisen. Reaktiiturbiinia nimitetään ylipaineturbiiniksi juoksusiiven etu- ja jättöpuolella

olevan paine-eron vuoksi. [10, s. 48.] Kuvassa 4 esitetään reaktioturbiinin toimintaa.



Kuva 4. Reaktioturbiinin periaatekaavio [11, s. 111.]

Höyryturbiinit jaotellaan myös rakenteellisesti sekä sen mukaan, miten höyry suihkuu akseliin nähden (aksaaliset ja radiaaliset turbiinit).

3.3.1 Lauhdeturbiini

Lauhdeturbiineita käytetään ainoastaan sähkön tuotannossa. Lauhdeturbiinista poistuva höyry paisutetaan mahdollisimman pieneen paineeseen, joka määrittyy jäähdytysveden lämpötilan mukaan. Lauhdeturbiineja käytetään pääasiassa ydinvoimalaitoksilla sekä varavoimalaitoksilla. [11, s. 109.]

3.3.2 Vastapaineturbiini

Vastapaineturbiinia käytetään sähkön ja lämmön yhteistuotannossa (CHP). Höyry poistuu vastapaineturbiinilta ylipaineisena, jolloin turbiinilta poistuneen höyryn sisältämää energiaa voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämpöveden lämmitykseen tai suoraan prosessihöyrynä. Vastapaineturbiineja käytetään vastapainevoimalaitoksilla, joka on Suomen yleisin voimalaitostyyppi johtuen korkeasta hyötysuhteesta. [11, s. 109.]

3.4 Turbiinilaitteisto

3.4.1 Generaattori

Generaattorin tehtävänä on muuttaa höyryturbiinilta saatu mekaaninen energia sähköenergiaksi. Generaattorissa on kaksi pääkomponenttia, staattori ja roottori. Roottori on kytketty joko suoraan tai vaihdelaatikon välityksellä höyryturbiinin pyörivälle akselille, staattori on rakennettu roottorin ympärille. Roottorin ympärille on käämitty magnetointikäämi, jolloin roottorin pyöriessä syntyy vaihteleva magneettikenttä syötettäessä magnetointivirtaa samanaikaisesti roottorille hiiliharjojen ja liukurenkaiden välityksellä. Tämä saa aikaan sähkövirran induktion staattorikäämiin. [11, s. 297]

3.4.2 Öljyjärjestelmä

Öljyjärjestelmä koostuu säiliöstä, suodattimista, putkistosta sekä pumpuista. Öljysäiliöstä pumpataan öljyä eri tarkoituksiin:

- voiteluöljyä kulutuskohteille, pääasiassa turbiinin ja generaattorin laakereille pää- ja apuöljypumpuilla,
- säätö-öljyä turbiinin säätöventtiileiden ohjausservoille
- nosto-öljyä turbiinin liukulaakereille turbiinin käynnistys- ja pysäystilanteissa.

Lisäksi järjestelmään kuuluu tasavirralla toimiva hätäöljypumppu, jolla taataan öljyn toimitus kulutuskohteille, kun normaalit järjestelmät eivät ole toiminnassa. Tämä järjestelmä on varustettu myös akustolla. Hätäöljypumput voivat toimia myös prosessin höyryllä tai potentiaalienergian avulla, jolloin öljysäiliö on sijoitettu korkeammalle kulutuskohteisiin nähden. [10, s. 108.] Kuvasta 5 nähdään jätevoimalan hätäöljypumppua paikalleen asennettuna.



Kuva 5. Jätevoimalan höyryturbiinin hätäöljypumpun moottori. Pumppu on kytketty moottorin akselille ja sijaitsee öljysäiliössä.

3.4.3 Turbiinin suojausjärjestelmä

Höyryturbiinin suoja on TLJ-järjestelmä, joka koostuu useista eri mittauksista. Yksi keskeisimmistä suojista on elektroninen ylikierrossuoja, jolla suojataan höyryturbiinia ryntäämiseltä eli hallitsemattomalta kierrostennousulta, mikäli turbiiniin kytketty kuorma katoaa. Muita suojauskriteereitä ovat muun muassa vastapainesuoja, voiteluöljyn painesuoja, aksiaalisen siirtymän valvonta sekä laakerilämpötilojen valvonta. Suojausten määrä on yksilöllistä turbiinityypistä sekä valmistajasta riippuen. Turbiinisuojaan voidaan liittää myös turbiinin ulkopuolisia suojauskriteereitä.

Höyryturbiinia suojataan vaurioilta pikasululla. Pikasulku toteutetaan automaatiojärjestelmän kautta pikasulkulaukaisulla. Laukaisu toteutetaan tiettyjen ehtojen mukaisesti. Riippuen järjestelmästä laukaisu voi olla esimerkiksi 1/2- tai 2/3-periaatteen mukainen. 1/2-periaatteen mukaisessa toiminnossa kahden anturin antamassa signaalissa riittää yhden kanavan käsky laukaisuun, 2/3-periaatteessa vaaditaan kaksi kolmesta kanavasta laukaisuun. [12, s. 204]

Pikasulkulaukaisulla suljetaan pikasulkuventtiili ja tätä kautta estetään höyrynsyöttö turbiinille. Tämä saadaan toteutettua erittäin nopeasti, automaation välitettyä käskyn venttiileille sulku tapahtuu 0,15–0,6 sekunnissa. [10, s. 65]

Turbiinin jäähtyöksessä tärkeimmät tarkkailua vaativat mittaukset ovat pesien lämpötilojen sekä aksiaalisen ja radiaalisen siirtymän mittaukset. Tällöin lämpötilaerot turbiinin osien välillä ovat suurimmillaan, jolloin niiden välillä on myös lämpölaajenemista ja lämpöjännityksiä. [11, s. 129] Suhteellisella siirtymällä tarkoitetaan turbiinin roottorin ja pesän välistä venymäeroa.

3.4.4 Lauhdutusjärjestelmä

Höyryn luovutettua energiaa turbiinilla höyry johdetaan tilanteesta riippuen joko suoraan lauhduttimeen (lauhdevoimalaitos), jossa sen faasi muuttuu takaisin nesteeksi. Faasimuutos saa aikaan ominaistilavuuden pienenemisen, jolloin

lauhduttimeen syntyy tyhjiö. Jäähdytysnesteenä käytetään pääasiassa vesistöistä saatavaa vettä. Mikäli tämä ei ole mahdollista, jäähdytys voidaan tehdä käyttäen jäähdytystorneja tai ilmajäähdyttimiä. [10, s. 115.]

Vaihtoehtoisesti jäljelle jääneen höyryn entalpia voidaan ottaa talteen kaukolämmönvaihtimessa tai ohjata prosessihöyryksi CHP-laitoksessa. Tällöin saavutetaan laitoksen paras mahdollinen hyötysuhde. [10, s. 117.]

3.5 Höyryturbiinin osat

3.5.1 Venttiilit

Pikasulkuventtiili on höyryturbiinin tärkein suojalaite. Sillä voidaan sulkea höyryntulo turbiinille nopeasti vikatilanteessa. Tulistimilta tuleva höyry virtaa tuorehöyrylinjaa pitkin turbiinille pikasulku- ja säätöventtiilien kautta. Pikasulkuventtiili on jousikuormitteinen. Käynnin aikana pikasulkuventtiili pysyy auki joko hydraulisesti voimaöljyn kanssa tai mekaanisesti höyryn avulla. Venttiilien ohjaus tapahtuu magneettiventtiileillä, joita ohjataan voimalaitoksen automaatiojärjestelmän välityksellä. [10, s. 65.] Kuvassa 6 on esitetty yksi jätevoimalan höyryturbiinin pikasulkuventtiileistä.



Kuva 6. Jätevoimalan höyryturbiinin oikeanpuoleinen pikasulkuventtiili.

Säätöventtiileillä ohjataan turbiinin tehoa sekä kierroksia. Kierroksia säädetään turbiinin käynnistysvaiheessa ja varsinaista tehoa generaattorin ollessa kytkettynä turbiiniin. Tuorehöyry virtaa pikasulkuventtiililtä säätöventtiileille, jotka sijaitsevat normaalisti turbiinin höyrykammiossa. Säätöventtiileitä on tavallisesti useita. Parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi venttiileillä ohjataan höyrysuihku suutinvyöhykkeiden kautta yhtä venttiiliä säätämällä muiden venttiilien pysyessä auki tai kiinni. Säätöventtiilit ovat jousikuormitteisia, joiden ohjaus tapahtuu hydraulisesti. [10, s. 66–68.] Kuvasta 7 voidaan nähdä jätevoimalan säätöventtiiliblokki.



Kuva 7. Jätevoimalan höyryturbiinin säätöventtiiliryhmä. Kuvassa etualalla turbiinin vasemmanpuoleinen pikasulkuventtiili.

3.5.2 Laakerointi

Höyryturbiinin laakerointi koostuu radiaali- sekä aksiaalilaakereista. Radiaali- eli säteis- tai kannatuslaakerin tehtävä on kannattaa turbiinin roottorin paino. Aksiaali- eli painelaakerin avulla turbiinin roottori asemoidaan ja pidetään paikoillaan turbiinin pesässä. Lisäksi painelaakeri ottaa nimensä mukaisesti vastaan aksiaalisia eli akselinsuuntaisia voimia. [10, s. 101,104.]

Yleisesti ottaen laakerit ovat tyypiltään liukulaakereita, jotka on valmistettu valkometalleista. Valkometallista valetut laakerit ovat hinnaltaan edullisia ja ominaisuukseltaan pehmeitä sisältäen mm. tinaa (Sn), lyijyä (Pb), antimonia (Sb) ja ku-

paria (Cu). Koostumuksella saadaan aikaan hyvä kestävyys laakerin reunapuristukseen, kulumispartikkelien peittäminen sekä hyvät kitkaominaisuudet. [10, s. 103]

3.5.3 Tiivisteet

Höyryturbiineissa käytetään pääosin sokkelo- eli labyrinthitiivisteitä estämään höyryn pääsy ulos turbiinilta pesän ja akselin välistä sekä vyöhykkeiden väliltä. Labyrinthitiivisteiden toiminta perustuu monien vierekkäisten metallitiivisteiden pieniin välyksiin, joissa höyrysuihkun suunnanmuutokset saavat aikaan paineen laskun. [11, s. 126.]

Labyrinthitiivisteisiin syötetään myös tiivistehöyryjärjestelmästä höyryä, kun halutaan estää ulkoilman pääsy turbiinin alipaineosan sisään ja vastaavasti korkeapainepuolelta höyryn pääsy turbiinilta ulos. Tiivistehöyryä syötetään käynnin aikana korkeapainepesän labyrinthitiivisteiltä matalapainepään tiivisteille. Käynnistyksessä höyry otetaan suoraan prosessista, yleensä tulohöyrylinjasta. [10, s. 92]

3.6 Jätevoimalan höyryturbiini Siemens SST 800 HNK 71/80

Jätevoimalan höyryturbiinina toimii Siemensin valmistama kaksipesäinen lauhdutusturbiini höyryn tulo- ja vastapainepesällä. Turbiinin akseli on kytketty generaattoriin jäykällä kytkimellä. Tulohöyryn pesä on rakennekoko 71 ja vastapainepesän rakennekoko 80. Höyryturbiini on varustettu viidellä väliotolla, josta johdetaan matalapainehöyryä muun muassa primääri-ilman esilämmittimille, syöttövesisäiliön lämmitykseen ja kaasunpoistoon sekä prosessihöyryksi laitoksen järjestelmiin. Höyryturbiinin sähkömekaaninen teho on 51 MW ja kierros-luku 3000 RPM [8].

Höyry virtaa tulohöyryä pitkin höyrysihdin ja pikasulkuventtiilien kautta säätöventtiilien edessä sijaitsevaan ulkopesän tulohöyrypesään. Säätöventtiilien avautuessa höyry virtaa säätöventtiilipesään ja edelleen suutinryhmien kautta

turbiinin paisunta-alueelle, ensin korkeapainevyöhykkeiden läpi ja sieltä edelleen vastapaineosan matalapainevyöhykkeille. Kuvassa 8 jätevoimalan höyryturbiini vasemmalta puolelta kuvattuna.



Kuva 8. Jätevoimalan höyryturbiini.

Turbiinisuoja on toteutettu pikasulkublokilla pikasulkulaukaisua varten kaksi kolmesta-valintaperiaatteen (2v3) mukaan. Pikasulkublokissa on kolme pikasulkukanavaa, joissa jokaista magneettiventtiiliä kohden on olemassa oma ohjausmäntä.

4 Höyryturbiinin pikajäähdytys

4.1 Jäähdytys ilman toimenpiteitä

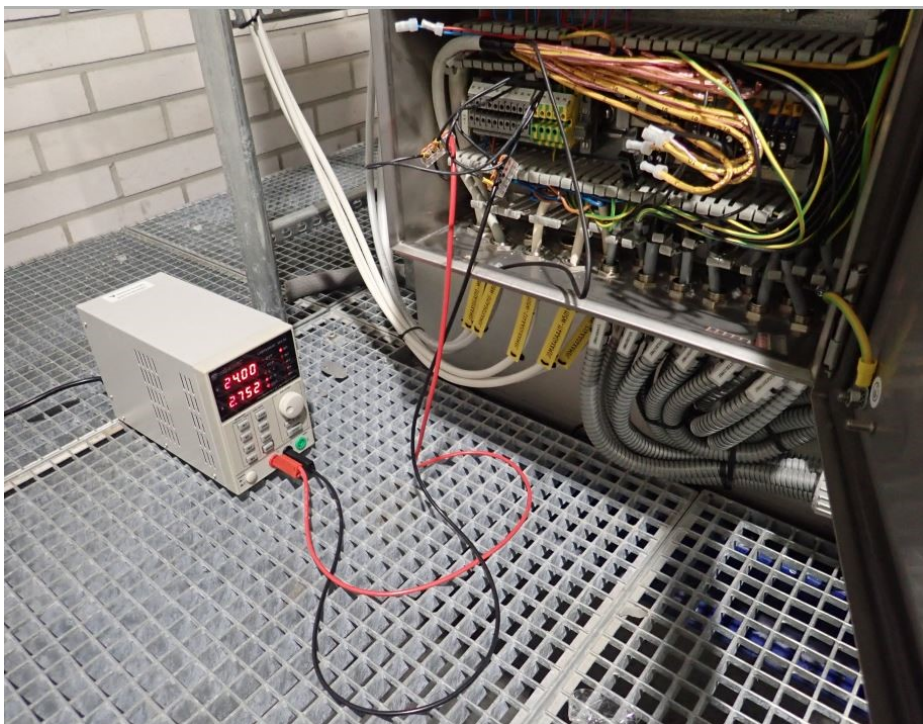
Höyryturbiinin jäähdyttäminen luonnollista jäähtymistä nopeammin on tärkeä osa vuosihuoltoa kustannusten pienentämiseksi, sekä turvallisen työskentelyn takaamiseksi. Höyryturbiini on kriittinen laite voimalaitoksen toiminnan kannalta. Turbiini on ajallisesti käytössä lähes koko vuoden ja sen häiriötön toiminta tulee

taata määrätyin välein tehtävillä huoltotoimenpiteillä. Turvallisuuskulmasta työskentelyä ei kuitenkaan voida aloittaa ennen turbiinin pesän jäähtymistä riittävälle tasolle. Roottorin taipuminen sekä aksiaali- ja radiaalilaakerien vaurioituminen ovat myös mahdollisia, mikäli roottorinpyörityslaitte sammutettaisiin ennen turbiinin jäähtymistä riittävälle tasolle ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Huoltoon varattua aikaa saadaan lisättyä jäähdyttämällä turbiinia luonnollista jäähtymistä nopeammin.

Normaalissa turbiinin alasajossa turbiini kytketään välittömästi alasajon jälkeen roottorin pyörityslaitteelle. Kaukolämmönvaihtimien lauhdepuoli tyhjennetään. Kaukolämpöpuolta ei ole tarvetta tyhjentää, mikäli huoltotoimenpiteille ei ole järjestelmässä tarvetta. Turbiinin vesitysventtiilit avautuvat automaattisesti, jolloin lauhtunut höyry pääsee poistumaan. [13.]

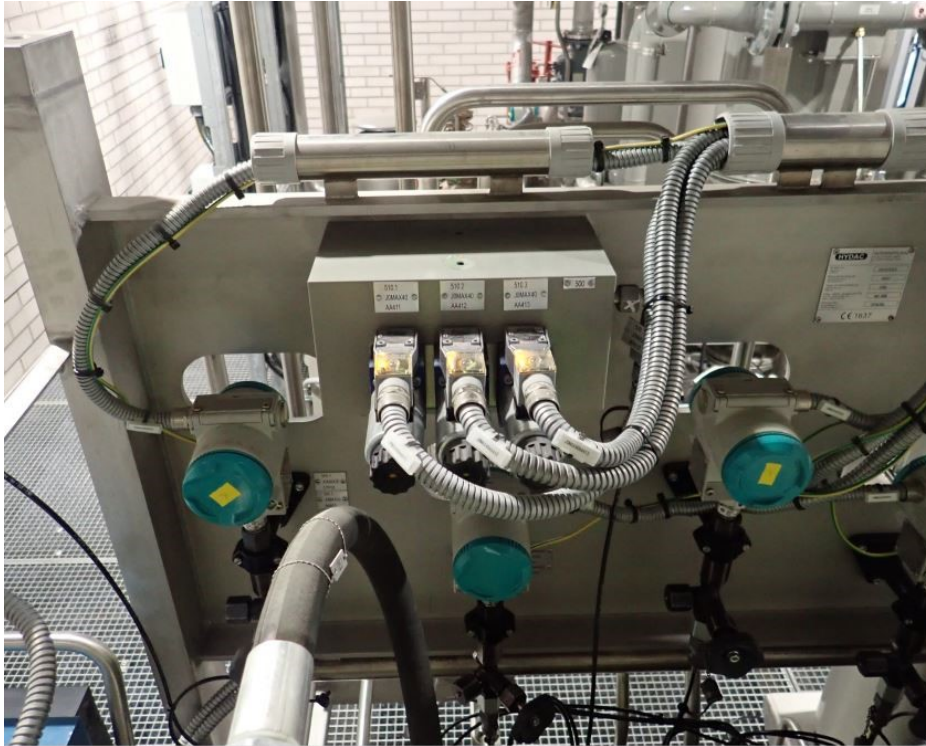
4.2 Nykyinen pikajäähdytys

Höyryturbiinin nykyinen pikajäähdytys on toteutettu absorptiokuivaimella, joka kytketään turbiinin kuivausyhteeseen. Kuivaimen ollessa päällekytkettynä kuivausilmaa puhalletaan turbiinin takaosasta etuosaan ja edelleen tulohöyrylinjaa pitkin käynnistysventtiilille, jonka kautta lämmennyt ilma ohjataan poistolinjaa pitkin äänenvaimentimeen ja edelleen ulkoilmaan. Pikasulku- ja säätöventtiilien on oltava auki ilman häiriöttömän kulkeutumisen mahdollistamiseksi. Säätöventtiilit on mahdollista avata laitoksen ohjausjärjestelmän (DCS) avulla. Pikasulkuventtiilit avataan simuloimalla venttiilin ohjaussolenoidit auki ulkoisen jännitelähteen avulla. Kuva 9 havainnollistaa ulkoisen jännitelähteen kytkentää.



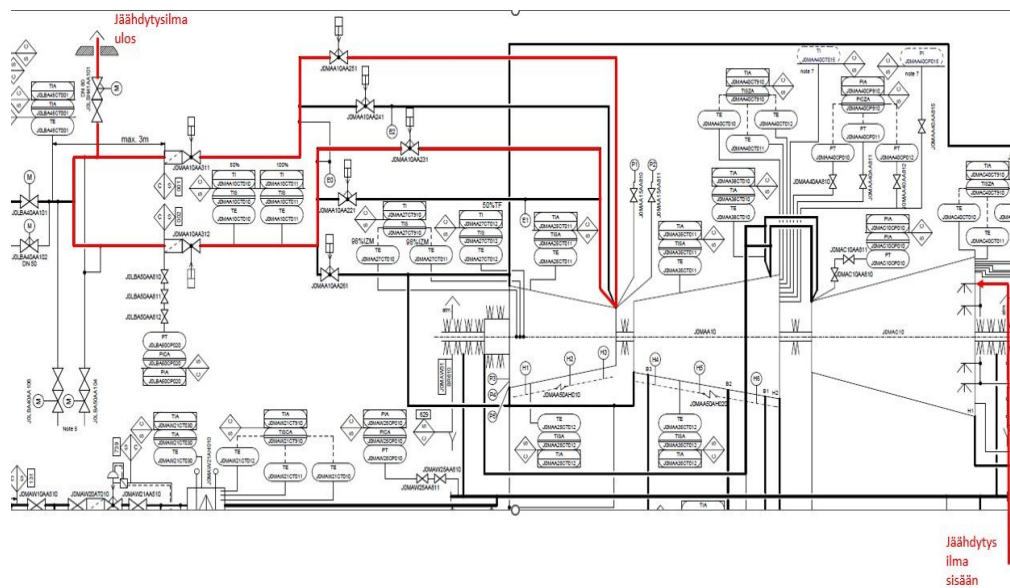
Kuva 9. Ulkoinen jännitelähde kytkettynä magneettiventtiilien kytkentäliittimiin.

Öljykierron magneettiventtiilien vaihtavat tilaansa aktiiviksi saadessaan jännitteen ulkoiselta jännitelähteeltä. Magneettiventtiilit sijaitsevat höyryturbiinin alla öljyhuoneessa. Kuvasta 10 nähdään venttiilit aktivoituna.



Kuva 10. Pikasulkuventtiilien öljykierron magneettiventtiilit aktivoituna.

Jäähdytysilman reitin havainnollistamiseksi turbiinin höyrykierron PI-kuvaan piirrettiin reitti alkaen turbiinin takaosasta ja päättyen ulospuhallukseen katolle. Kuvasta 11 nähdään ilman kulkeutuminen. Reitti on havainnollistettu punaisella.



Kuva 11. Jäähdytysilman kulkeutumisen reitti PI-kuvassa.

Jäähdytysnopeutta on seurattava ohjausjärjestelmästä näkyvillä lämpötilamittauksilla turbiinin pesästä sekä roottorilta lämpöjännityksien sekä suhteellisen venymän minimoimiseksi (liitteet 7,8 ja 9). Jäähdytysnopeutta säädetään kuristussäädöllä absorptiokuivaimella sijaitsevalla palloventtiilillä sekä käynnistysventtiilillä. Kuvasta 11 voidaan nähdä kuivainlaitteisto kokonaisuutena.



Kuva 11. Höyryturbiinin kuivain Fisair DFRC-0160-E-Plus-BC2. Jäähdytysilman palloventtiili kuvassa vasemmalla.

Turbiinin sisäpesät pysyvät kuumempina roottoriin nähden johtuen komponenttien massaeroista, vakaasta tilasta sekä sisä- ja ulkopesien välisestä lämmön siirtymisestä. Tämä aiheuttaa radiaalisuunnassa välyksen kasvua sisäpesän ja roottorin välillä. Jäähdytettäessä tämä ei siis aiheuta ongelmaa. Jäähdytyksen nopeutta rajoittaa aksiaalisuunnan välykset.

Jätevoimalan höyryturbiinia on testattu kaksi kertaa, vuosina 2017 ja 2021. Teh-tyjen toimenpiteiden seurauksena on huomioitu turbiinin jäähtyvän pakotetulla ilman virtauksella noin 24 tuntia nopeammin verrattuna luonnolliseen jäähtymi-seen. Liitteenä olevista trendeistä voidaan nähdä, että niinä vuosina, jolloin pi-kajäähdytys on ollut käytössä, suhteellinen venymä tai lämpötilaerot venymän aiheuttamiseksi eivät ole kasvaneet rajojen ulkopuolelle vaan ovat olleet hyvin-kin maltillisia, venymät maksimissaan luokkaa ± 1 mm (liitteet 1,5,6 ja 10). Pe-sien lämpötilaeroissakaan ei ole ollut havaittavissa yli 10 asteen eroavaisuuksia.

4.3 Pikajäähdytyksen riskit

Pikajäähdytyksen oleellisimpana riskinä voidaan pitää turbiinin akselilla olevien juoksusiipien kiinniottoa turbiinin sisäpesään, mikäli jäähdytettäessä ajetaan liian kylmää ilmaa liian suurella tilavuusvirralla turbiinin läpi, jolloin eri massaiset komponentit jäähtyisivät eri nopeudella toisiinsa nähden. Tällöin suhteellinen venymä roottorilla on pienempi kuin pesällä ja kiinniotto on mahdollinen.

4.4 Pikajäähdytyksen kehittäminen

4.4.1 Käytössä olevan menetelmän kehittäminen

Kokemusten perusteella nykyistä jäähdytysmenetelmää tulisi saada yksinker-taistettua, jolloin jäähdytyksen voisi toteuttaa kokonaisuudessaan käyttöhenkilö-kunnan resursseilla.

Nykyistä menetelmää on mahdollista selkeyttää, jolloin pikasulkuventtiilien oh-jausta varten tulevilla jäähdytyskerroilla ei olisi tarvetta kuljettaa jännitelähteitä laitokselle ja suorittaa ylimääräisiä sähkökytkentöjä [14]. Jännitelähteiden käy-tön sijaan DCS-järjestelmään tehtäisiin oma ohjauspainike venttiilien avaa-miseksi, kuten tällä hetkellä on toteutettu säätöventtiileille. Ohjauspainikkeella

pikasulkuventtiilien magneettiventtiilit saataisiin vaihtamaan tilaansa, jolloin voimaöljyllä on reitti pikasulkuventtiileille ja venttiilit avautuvat. Tämä vaatii öljypumppujen pitämisen käynnissä.

Pikasulkuventtiilit ovat myös TLJ-laitteita, joiden ohjelmoinnin muuttaminen ilman viranomaisen hyväksyntää on mahdollisesti kiellettyä [14]. Pikasulkuventtiileille ei missään tapauksessa saa syntyä tilannetta, jossa venttiilit olisi mahdollista pakottaa auki normaalin käytön aikana. Turbiinisuojan on oltava käytössä aina turbiinin ollessa normaalisti käytössä. Niiltä osin ohjelmamuutos venttiilien ohjaamiseksi vaatii lisäselvitystä.

Jäähdytysnopeuden kasvattaminen on myös ajonäyttöjen perusteella mahdollista. Aikaisempina kertoina jäähdytystä on ajettu hyvinkin varovasti, koska aiempaa kokemusta jäähdytyksestä ei ollut [15].

Koska nykyinen jäähdytys on ”vain” 24 tuntia nopeampaa ja keskustelussa ilmi käynyt hyvin varovainen jäähdytysilman määrä sekä suhteellisen venymän ollessa pieni voidaan todeta, että nykyisessä järjestelmässä löytyy potentiaalia tulevaisuutta ajatellen. Jäähdytysnopeuden optimaaliseen määritykseen suositellaan turbiiniasiantuntijan konsultaatiota, jotta voidaan varmistua turvallisesta pikajäähdytyksestä.

4.4.2 Jäähdytys tyhjiöpumppujen avulla

Turbiinia on myös mahdollista jäähdyttää tyhjiöpumpun avulla höyryn normaaliin kulkusuuntaan nähden. Tyhjiöpumpun saadaan normaalisti aikaan turbiinin lauhdutuspäähän ja kaukolämmönvaihtimille tyhjiö, jota pikajäähdytyksessä voidaan käyttää jäähdytysilman ohjaamiseen turbiinin etupäästä. Valmistajan mukaan erityyppisessä turbiinissa on saatu turbiinin pesä jäähtymään roottorinpyöritysmoottorin pysäyttämisen vaadittavalle tasolle suunnitellussa alasajossa 80 tunnissa. [17.]

Tässä tapauksessa turbiinin pikasulku- ja säätöventtiilien väliin asennettaisiin tulpattava yhde, josta tyhjiöpumpun avulla imettäisiin ilmaa turbiinin läpi kaukolämmönvaihtimille. Pikasulkuventtiilien ohjausta ei tällä toimintatavalla tarvitse suorittaa, koska jäähdytysilma otetaan pikasulkuventtiilien jälkeen. Menetelmässä jäähdytysilma otetaan suoraan turbiinisalista, joka sisältää kosteutta. Tämä saattaa aiheuttaa pintaruostetta turbiinin sisäpinnoille.

Toinen vaihtoehto kyseiselle menetelmälle olisi vastaava, mutta nykyisessä käytössä olevalle kuivaimelle tehtäisiin laippaliitos pikasulku- ja säätöventtiilien väliin, jolloin kosteaa ilmaa ei pääsisi turbiinille. Kyseinen menetelmä ei kuitenkaan helpota käytössä olevaan menetelmään verrattuna, koska tällöin kuivaimelta turbiinille yhdistettävä kuivainletku tulisi pidentää. Lisäksi letkun asennuspaikka muuttuisi haastavaksi maasta katsottuna noin kolmen metrin korkeuteen.

4.4.3 Kannattavuuslaskelmat

Höyryturbiinia pikajäähdyttämällä olennaista on kustannussäästöjen tavoittelu. Turbiini huolletaan vuosihuollossa jätekattiloiden ollessa ajettuna alas vuorotellen. Aika, jolloin molemmat kattilat ovat alas ajettuina on lyhyt, keskimäärin noin yhden viikon. Pikajäähdytyksen avulla työt turbiinilla päästään aloittamaan aiemmin ja turbiinin käyttökeskeytysaika lyhenee.

Kustannussäästöt ovat riippuvaisia sähkömarkkinoiden spot-hinnasta sekä kaukolämmöntuotannon rajatuotannon hinnoista. Jätevoimalan vuosihuollon aikana keskeytynyt tuotanto on tuotettu metsähakkeella Martinlaakson biovoimalaitoksella. Kaukolämmön kysyntä riippuu ulkolämpötilasta, jolloin höyryturbiinilla kasvatetaan tässä tilanteessa tuotantomäärää sähköntuotannossa kaukolämmön peruskuorman tullessa CHP-laitoksilta. [15.]

Mikäli kaikkia käyttökatteeseen vaikuttavia tekijöitä ei huomioida, syntyvä säästö voidaan olettaa vastaamaan menetetyn sähköntuotannon arvoa. Esimerkkinä voidaan laskea vuoden 2021 sähkön keskihinnalla 72 €/MWh [18] ja

olettaen turbiinin tehoksi 30 MW tuotannonmenetyskustannus olisi noin 2 200 € tunnissa. Todellisuudessa kustannussäästöt riippuvat täysin senhetkisestä kaukolämpöverkon kuormasta, sähkön hinnasta ja käytettävien tuotantopolttoaineiden hinnoista [15]. Pikajäähdytyksen tarve on turbiinin huoltojaksojen mukaan noin kolmen vuoden välein. Mikäli pikajäähdytyksen avulla saataisiin vähennettyä jäähtymiseen kuluvaa aikaa 80 tuntiin, luonnolliseen jäähtymiseen verrattuna, jolloin trendien mukaan (liitteet 2,3 ja 4) keskiarvo jäähdytykselle on ollut noin 130 tuntia, kustannussäästöt olisivat vuodessa:

$$130 h - 80 h \times 2200 \text{ €} = 36\,666 \text{ €}$$

5 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda kehitysehdotus Vantaan Energian Långmossabergenin jätevoimalaitoksen höyryturbiinin pikajäähdytykselle. Työn tavoitteena oli pyrkiä tutkimaan ja selvittämään vaihtoehtoja parhaimman mahdollisen pikajäähdytysmenetelmän löytämiseksi.

Työn teoriaosuudessa perehdyttiin höyryturbiinin rakenteeseen ja teoriaan. aikaisempiin kokemuksiin höyryturbiinin jäähdytyksistä voimalaitoksella sekä mahdollisiin vaihtoehtoihin jäähdytystapoihin nykyisen pikajäähdytysmenetelmän kehittämiseksi. Teoriaosuuden perusteella luotiin kokonaiskuva turbiinin jäähdytyksen syyille, vaihtoehdoille sekä rajoittaville tekijöille.

Työn tuloksena todettiin nykyisen menetelmän olevan paras vaihtoehto turbiinin jäähdytykselle. Nykyistä menetelmää on kuitenkin järkevää kehittää, jolloin laitoksen käyttöhenkilöstö pystyisi tekemään pikajäähdytyksen omilla resursseillaan ja kuitenkin nykyistä nopeammin. Ohjausjärjestelmään lisättäisiin forced cooling -näköymän alle pikasulkuventtiilien auki ohjaus, jolloin aikaisemmin käytettyjä ulkoisia jännitelähteitä ei tulevaisuudessa olisi tarvetta kytkeä ohjaamaan venttiileitä auki.

Tässä työssä ei syvennytty höyryturbiinin rakenteelliseen turvallisuuteen pikajäähdytyksessä. Kehitysideat ovat arvioita trendien perusteella tehdyistä havainnoista. Tämä vaatii lisäselvitystä yhdessä turbiiniasiantuntijan kanssa. Myös ohjausjärjestelmään tehtävä ohjelmamuutos käytiin työssä läpi ainoastaan käytännön tasolla. Ohjelmamuutoksen toteutusta on suositeltavaa käydä läpi yhdessä laitoksen automaatiosta vastaavan henkilökunnan sekä viranomaisen kanssa, jotta turbiinisuojaan ei pääse syntymään tilannetta, että se sallisi pikasulkuventtiilien auki ohjauksen normaalikäynnin aikana.

Työssä tehtyjen havaintojen perusteella nykyistä pikajäähdytysjärjestelmää on mahdollista ja järkevää kehittää. Nykyisellä jäähdytyslaitteistolla jäähdytysaikaa on mahdollista lyhentää perustuen voimalaitoksen ohjausjärjestelmän trendinäyttöjen tulkintaan lämpötilojen ja venymien osalta.

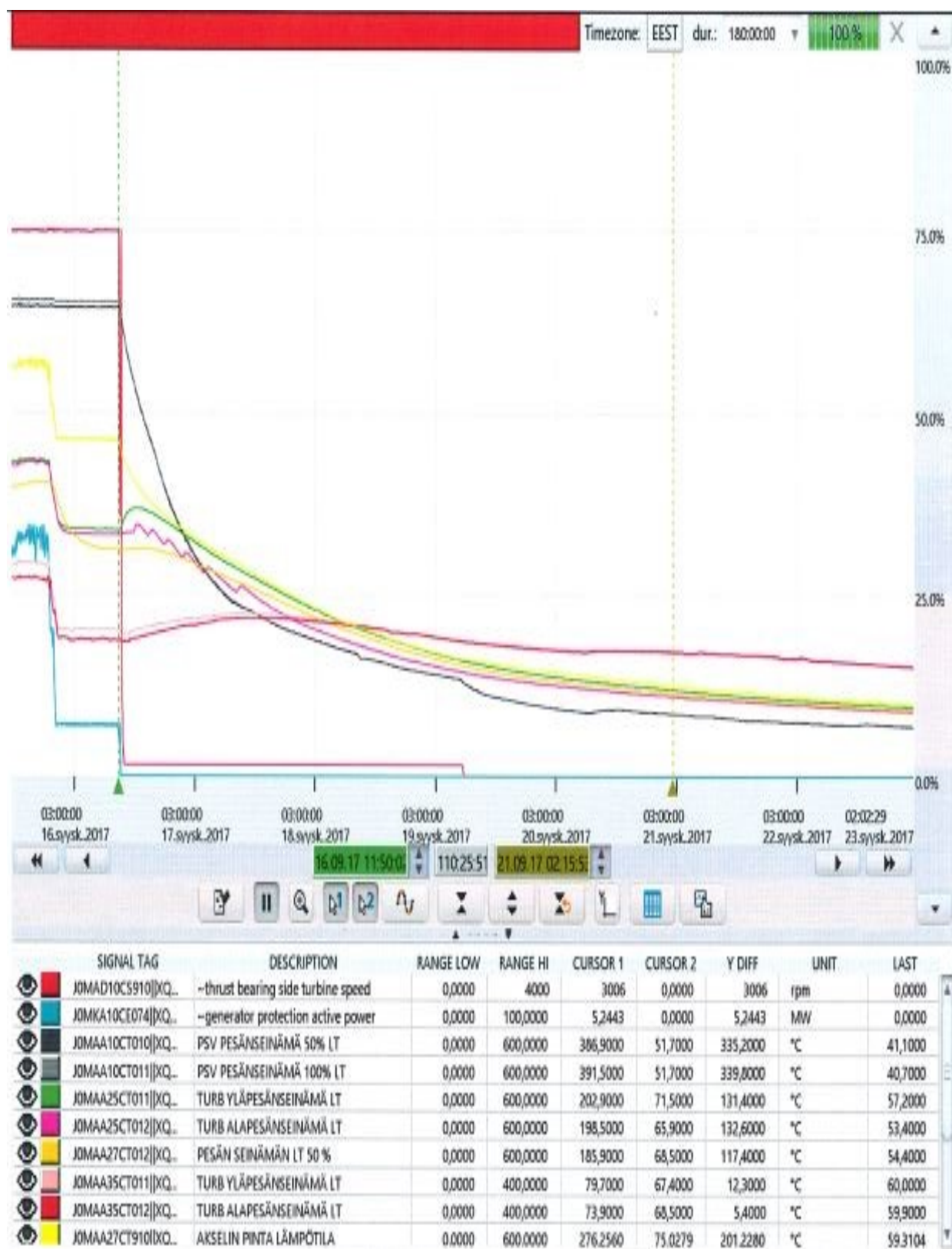
Lisäselvityksiä olisi ollut järkevää tehdä jo tämän työn aikana suhteellisten venymien maksimaalisiin turvallisiin rajoihin liittyen. Myös ohjelmamuutoksen pidemmälle viedyllä suunnittelulla olisi työlle saatu lisäarvoa. Voidaan kuitenkin todeta, että kokonaisuutena opinnäytetyö onnistui. Optimaalisin jäähdytystapa tunnistettiin ja tästä tehtiin ehdotus yritykselle.

Lähteet

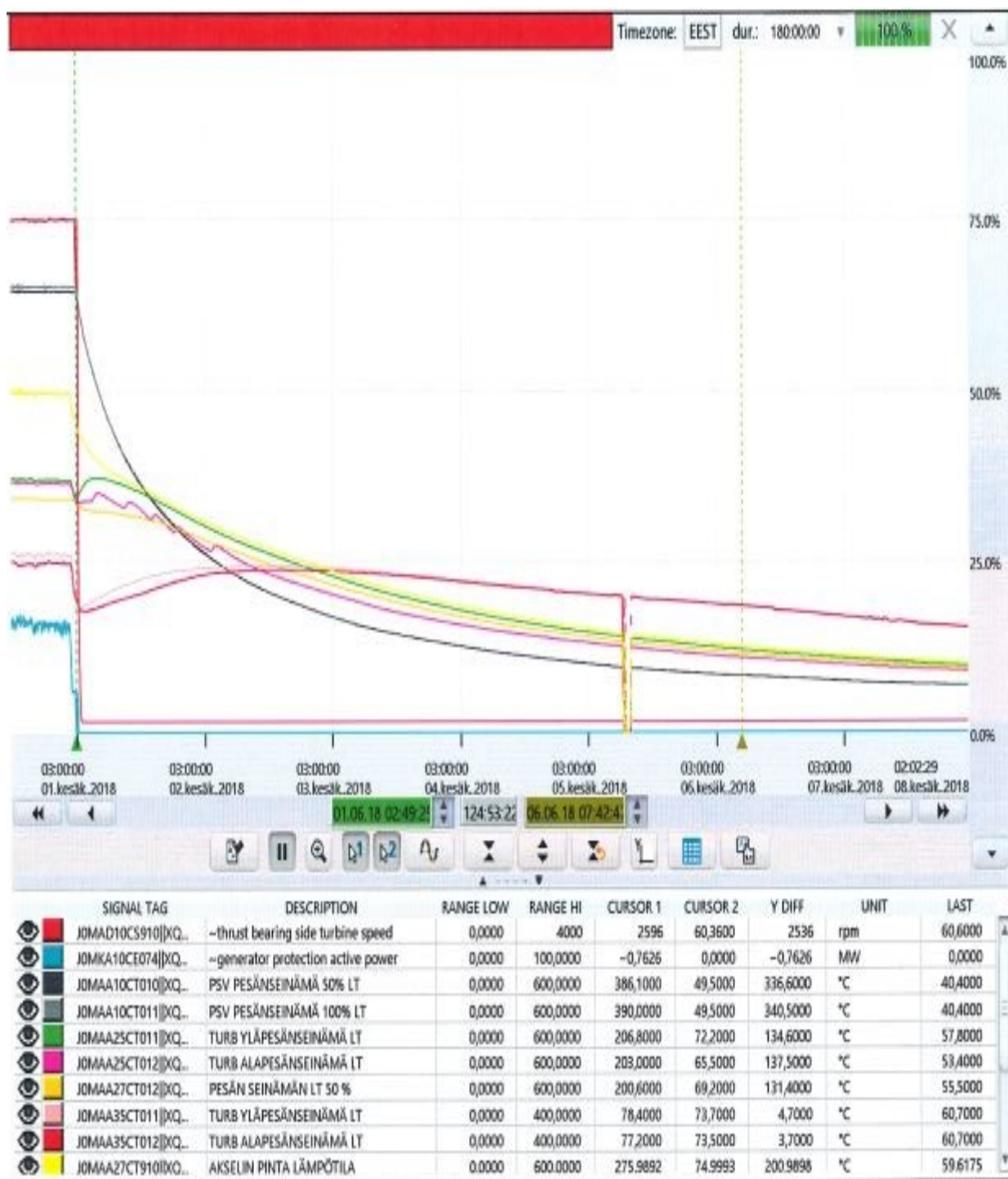
- 1 Vantaan Energia Oy. Tilinpäätös ja toimintakertomus 2021. Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy. <https://vantaanenergia.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20220329105244/VE-Tilinpäätös-kirja-2021.pdf>. Luettu 26.8.2022.
- 2 Vantaan Energian ilmastolupaus: Fossiiliton energiantuotanto 2026. Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy. <https://www.vantaanenergia.fi/fossiiliton-2026/vantaan-energian-ilmastolupaus-fossiiliton-energiantuotanto-2026/>. Luettu 26.8.2022.
- 3 Käyttöohjeet arina. Yrityksen sisäinen dokumentti. 2013. Hitachi Zosen Inova.
- 4 Vierailulle Jätevoimalaan? Verkkoaineisto. Vantaan Energia Oy. <https://www.vantaanenergia.fi/vierailulle-jatevoimalaan/>. Luettu 10.11.2022.
- 5 Käyttöohjeet syöttösuppilo. Yrityksen sisäinen dokumentti. 2013. Hitachi Zosen Inova.
- 6 Käyttöohjeet kattila. Yrityksen sisäinen dokumentti. 2013. Hitachi Zosen Inova.
- 7 General description of the Waste to Energy Plant. 2013. Yrityksen sisäinen dokumentti. Pöyry Finland Oy.
- 8 Turbine Set Technical Description. 2014. Yrityksen sisäinen dokumentti. Siemens AG Energy Sector.
- 9 Process description. 2014. Yrityksen sisäinen dokumentti. LAB S.A.
- 10 Kauppinen, Jukka. 2018. Turbiinitekniikka. 1. painos. Tampere: Tammer-tekniikka. 3
- 11 Huhtinen, Markku; Korhonen, Risto; Pimiä, Tuomo & Urpalainen, Samu. 2016. Voimalaitostekniikka. 1. painos. Tampere: Opetushallitus. 4
- 12 Joronen, Tero; Kovács, Jenő & Majanne, Yrjö. 2007. Voimalaitosautomaatio. 1. painos. Helsinki: Suomen automaatioseura ry.

- 13 Järvinen, Jari. 2022. Käyttöinsinööri, Vantaan Energia Oy. Keskustelu 11.11.2022
- 14 Mustonen, Jani. 2022. Automaatioinsinööri, Vantaan Energia Oy. Keskustelu 11.11.2022.
- 15 Parviainen, Petri. 2022. Tuotanto-omaisuuspäällikkö, Vantaan Energia Oy. Keskustelu 4.11.2022.
- 16 Forced Cooling of Turbine. Verkkoaineisto. Siemens AG Energy Sector. <<https://www.scribd.com/document/384737847/Forced-cooling-of-Turbine>>. Luettu 1.11.2022.
- 17 Day-ahead prices. Verkkoaineisto. Nord Pool AS. <<https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Yearly/?view=table>>. Luettu 19.11.2022.

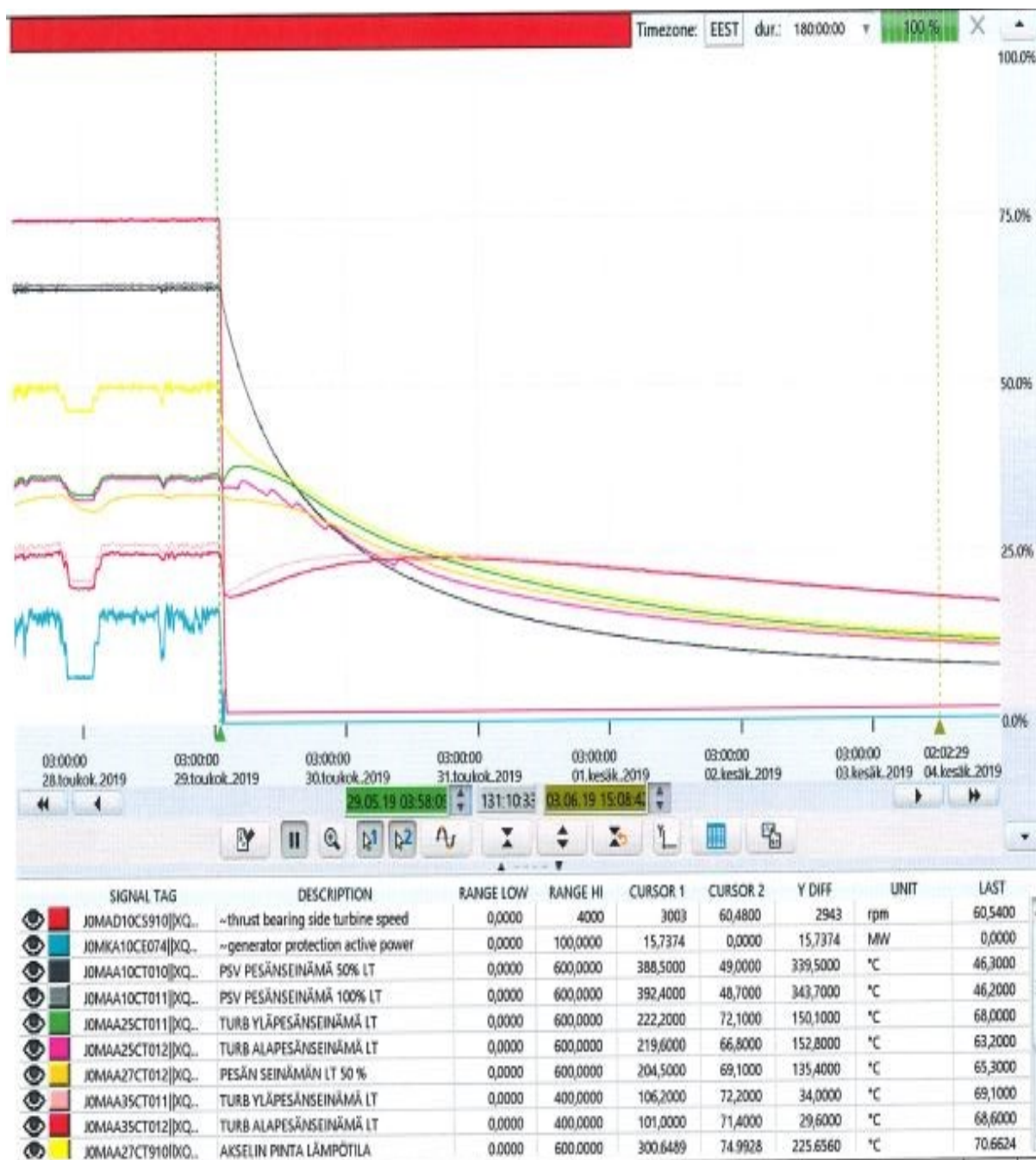
Jäähdytystrendi vuoden 2017 turbiinin alasajosta



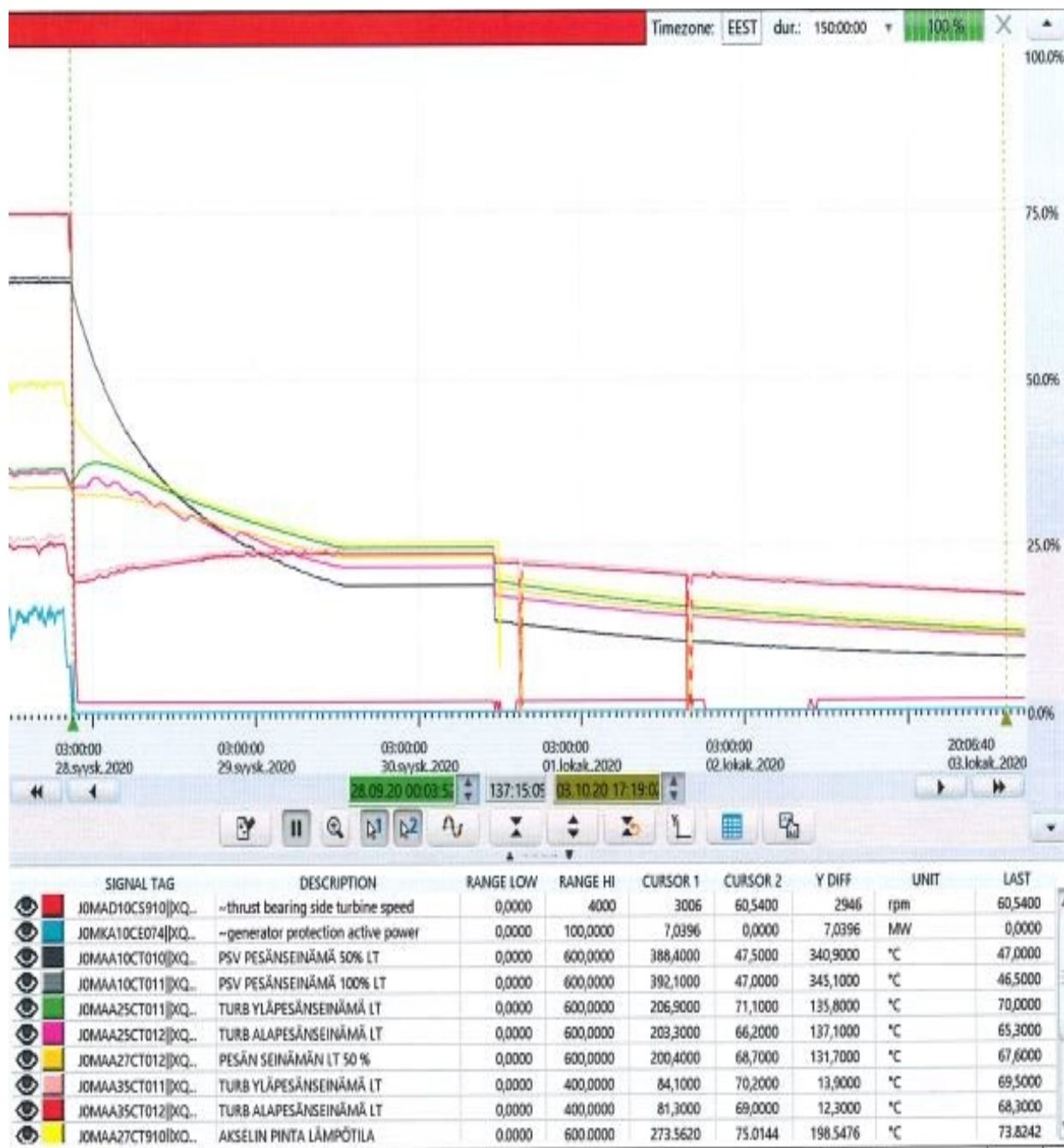
Jäähdytystrendi vuoden 2018 turbiinin alasajosta



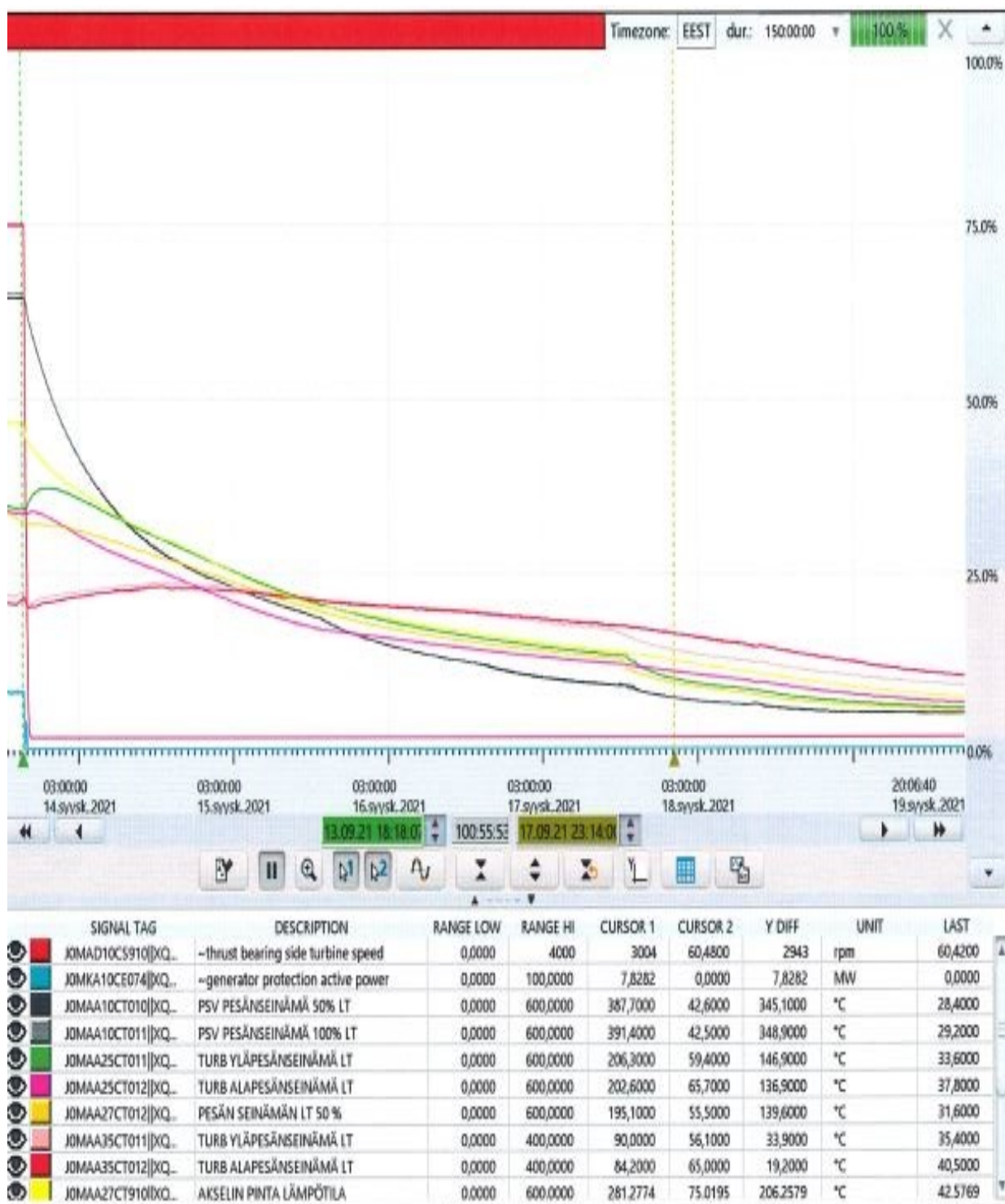
Jäähdytystrendi vuoden 2019 turbiinin alasajosta



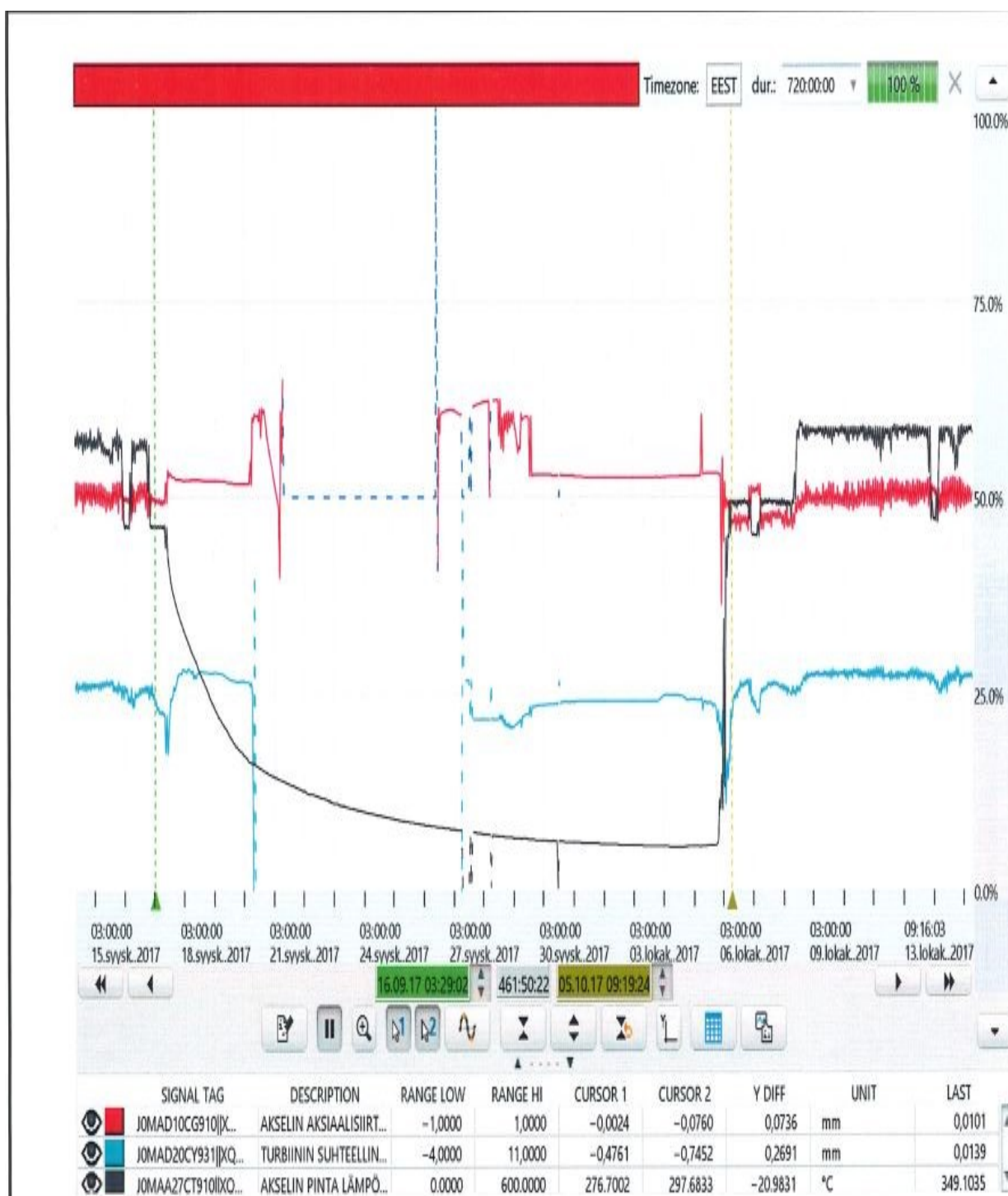
Jäähdytystrendi vuoden 2020 turbiinin alasajosta



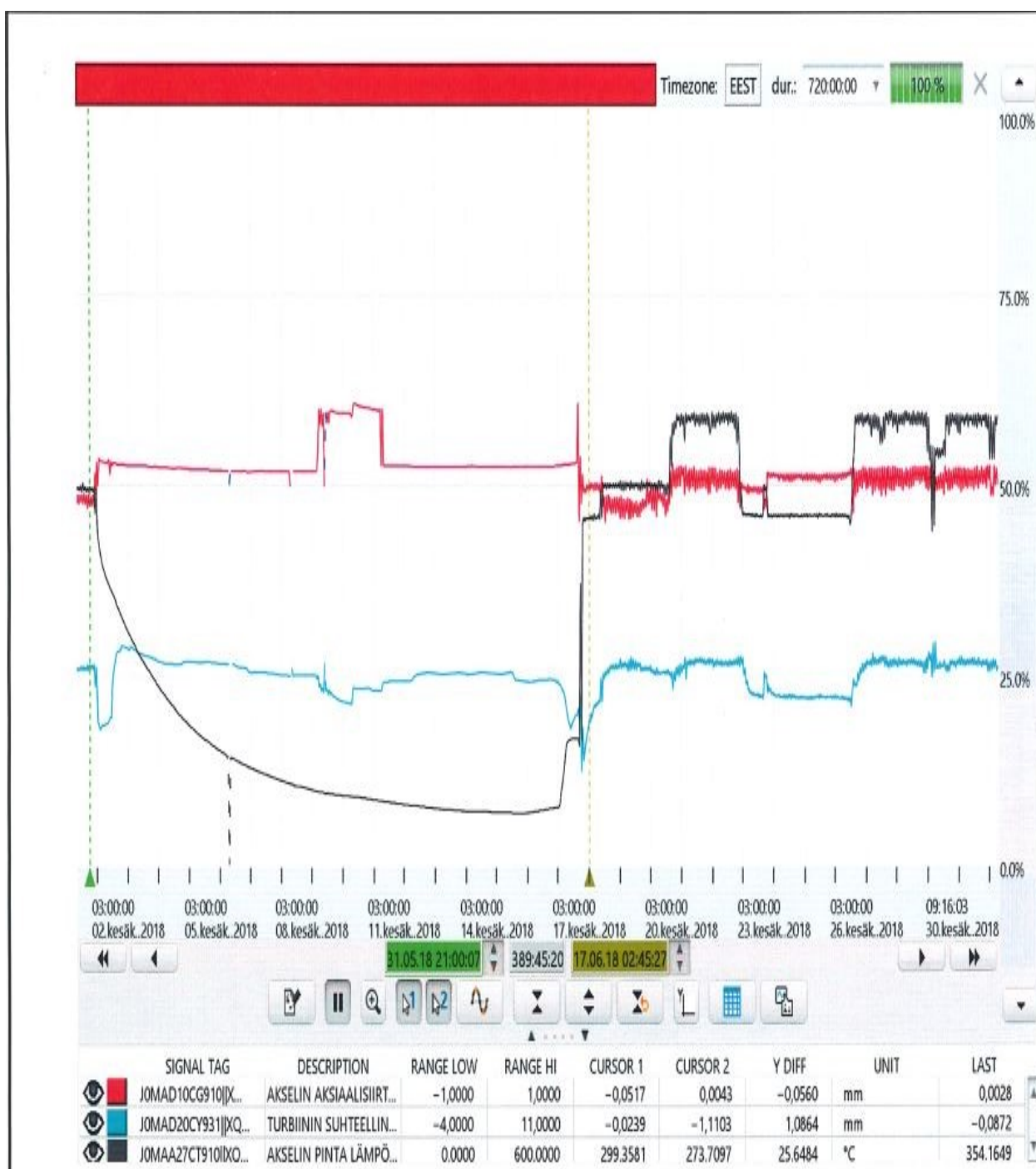
Jäähdytystrendi vuoden 2021 turbiinin alasajosta



Suhteellisen venymän trendi vuoden 2017 turbiinin alasajosta



Suhteellisen venymän trendi vuoden 2018 turbiinin alasajosta



Suhteellisen venymän trendi vuoden 2019 turbiinin alasajosta



Suhteellisen venymän trendi vuoden 2020 turbiinin alasajosta



Suhteellisen venymän trendi vuoden 2021 turbiinin alasajosta

