

Matias Kivelä

TURBIINILAITOKSEN KÄYNNISTYKSEN NOPEUTTAMINEN

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Energiatekniikan suuntautumisvaihtoehto
2014

TURBIINILAITOKSEN KÄYNNISTYKSEN NOPEUTTAMINEN

Kivelä, Matias
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2014
Ohjaaja: Zenger, Pekka
Sivumäärä: 36
Liitteitä: -

Asiasanat: turbiini, hiilivoimalaitos, lämmitysjärjestelmä

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia Fortum Power and Heat Oy:n Meri-Porin hiilivoimalaitoksen turbiinilaitosta ja sen käynnistyksen nopeuttamista.

Työ aloitettiin tutkimalla laitoksen perusprosesseja ja kylmäkäynnistystä. Työn edessä keskityttiin turbiinin toimintaan, käynnistämiseen ja lämmitysjärjestelmään.

Tavoitteena oli tutkia, onko Meri-Porin voimalaitoksen nykyiseen säilöntäjärjestelmään mahdollista liittää laitoksen ylösajoa nopeuttava lämmitysjärjestelmä.

Työssä käytettiin tutkimusmateriaalina Meri-Porin voimalaitoksen omia turbiiniohjeita, sekä lisäksi ruotsalaisen esimerkkilaitoksen tietoja.

Työssä saatiin tulokseksi alustavia tietoja järjestelmä kannattavuudesta, mutta syvempi asiaan perehtyminen vaatisi tarkempia kokeellisia tutkimuksia yhdessä laitoksen käyttöhenkilökunnan ja laitetoimittajien kanssa.

SPEEDING UP THE START-UP OF TURBINE PLANT

Kivelä, Matias

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Mechanical Engineering

May 2014

Supervisor: Zenger, Pekka

Number of pages: 36

Appendices: -

Keywords: turbine, coal-fired power plant

The purpose of this thesis was to examine the coal-fired power plant's turbine plant and how to speed up its starting in Fortum Power and Heat Oy located in Meri-Pori.

This project began by studying the fundamental processes and a cold start of the plant. As the project progresses focused on the operations of the turbine, the start-up and the heating system.

The aim was to examine whether it is possible to connect any heating systems to the existing maintenance system of the Meri-Pori power plant to speed up the plant's start-up.

The power plant turbine's own guidelines as well as the data from the Swedish example plant were used as research material.

The result of this study was preliminary information on the profitability of the system. Deeper study requires more detailed experimental studies together with the plant operating personnel and equipment suppliers.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	FORTUM LYHYESTI.....	6
2.1	Fortum Power and Heat Oy	6
2.1.1	Meri-Porin voimalaitos	6
3	LAITOSPROSESSI.....	7
3.1	Yleiskuvaus.....	7
4	LAITOKSEN KÄYNNISTYSPROSESSI.....	10
4.1	Kylmäkäynnistys	10
5	TURBIINI	13
5.1	Turbiinijärjestelmä	13
5.1.1	Turbiinin tehtävä.....	15
5.1.2	Turbiinin rakenne.....	18
5.1.3	Turbiinin tiivisteet	21
5.1.4	Turbiinin laakerit	22
5.1.5	Öljyjärjestelmä.....	22
5.1.6	Lauhdutin.....	22
5.1.7	Turbiinin pyörittäminen apulaitteella	23
5.1.8	Turbiinin säilöntä.....	24
5.2	Turbiinin käynnistys ja käyttö	27
6	TURBIININ LÄMMITYSJÄRJESTELMÄESIMERKKI.....	29
6.1	Turbiinilaitos ja sen lämmitysjärjestelmän vaikutukset	29
6.2	Lämmitysjärjestelmäratkaisu.....	29
7	VASTAAVAN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN SOVELTAMINEN MERI-PORIN TURBIINILAITOKSELLE	32
7.1	Lämmitysjärjestelmän soveltamisen tutkiminen	32
7.1.1	Virtaus- ja lämmitysteholaskut	32
7.1.2	Massalaskut.....	34
8	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	35
8.1	Yhteenveto lämmitysjärjestelmästä.....	35
8.2	Johtopäätökset	36
	LÄHTEET	37

1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia Meri-Porin voimalaitoksen turbiinijärjestelmää ja sen ylösajon nopeuttamista. Ylösajon nopeuttamisessa tutkitaan, miten turbiinia voisi esilämmittää, jotta se olisi nopeammin käynnistettävissä. Ongelman tutkimisessa olen hyödyntänyt eräästä ruotsalaisesta esimerkkilaitoksesta saamiani tietoja.

Insinööriyön alussa esitellään lyhyesti Fortum yrityksenä ja kerrotaan pääpiirteittäin Meri-Porin voimalaitoksesta ja sen laitosprosessista. Lisäksi tutkitaan laitoksen kylmäkäynnistysprosessia. Hieman tarkemmin kiinnitetään huomiota itse turbiiniin, sen rakenteeseen, toimintaan ja sen rooliin osana laitosprosessia. Työssä tarkastellaan lisäksi Meri-Porin voimalaitoksen turbiinin säilöntäjärjestelmää, joka liittyy olennaisesti turbiinin käynnistyksen nopeuttamiseen seisakin jälkeen. Turbiinin lisälämmitysjärjestelmä on tarkoitus liittää laitoksen nykyiseen säilöntäjärjestelmään.

2 FORTUM LYHYESTI

2.1 Fortum Power and Heat Oy

Fortumin liiketoimintaan kuuluu sähkön tuotanto, myynti ja jakelu, sekä energia-alan asiantuntijapalvelut. Fortumin toiminta on keskittynyt Pohjoismaihin, Venäjälle, Puolaan ja Itämeren alueelle. Vuonna 2013 Fortumin liikevaihto oli 6,1 miljardia euroa. Konsernissa työskentelee 8800 henkilöä.

Fortum Power and Heat Oy on Fortumin tytäryhtiö. Yhtiö toimii Suomen lisäksi myös Ruotsissa, Venäjällä, Baltiassa, Puolassa, Norjassa ja Britanniassa. Power-divisioonaan kuuluvat Fortumin sähköntuotanto, fyysinen tuotannonohjaus ja trading-toiminta sekä asiantuntijapalvelut sähköntuottajille. Heat-divisioona sisältää sähkön ja lämmöntuotannon (CHP), kaukolämpö- ja kaukokylmätoiminnan sekä yritysten lämpöratkaisut./2/

2.1.1 Meri-Porin voimalaitos

Meri-Porin 565MW:n hiilivoimalaitos (Kuva 1.) sijaitsee Porin Tahkoluodossa. Voimalaitos on otettu käyttöön vuonna 1994 ja se tuottaa sähköä käyttäen polttoaineenaan kivihiiltä. Meri-Porin voimalaitoksen omistavat Fortum ja Teollisuuden Voima Oy (TVO) yhdessä ja osa sen tuotannosta menee TVO:n osakkaille. Laitos on Suomen modernein ja suurin hiilivoimalaitos./1/



Kuva 1. Meri-Porin voimalaitos

3 LAITOSPROSESSI

3.1 Yleiskuvaus

Meri-Porin voimalaitos on konventionaalinen lauhdutusvoimalaitos (Taulukko 1. ja Kuva 2.). Laitoksen polttoaineena toimiva kivihiihi tuodaan Tahkoluodon satamaan laivoilla. Laivoista hiili siirretään hiilikentälle ja sieltä eteenpäin kuljettimilla laitoksen viiteen hiilisiiloon. Siiloista hiili kulkee eteenpäin hiilimyllyille, jossa hiili jauheetaan hiilipölyksi. Hieno hiilipöly puhalletaan kantokaasun avulla ylikriittiseen Benson-kattilaan poltettavaksi. Kattilan polttimina toimivat Low-NO_x -tyyppiset polttimet, joiden toiminta perustuu niin sanottuun vaiheistettuun polttoon, jolla saadaan NO_x-päästöjä alenemaan. Palava polttoaine lämmittää vettä kattilassa ja näin vesi muuttuu höyryksi, eli kemiallinen energia muuttuu lämpöenergiaksi.

Kattilaan menevää vettä esilämmitetään ensin EKO:lla lähemmäksi höyrystymislämpötilaa. EKO:n toiminta perustuu savukaasuista talteen otettuun lämpöenergian hyväksikäyttöön. Kun vesi on höyrystynyt höyrystimessä, se johdetaan tulistimiin, jossa se tulistetaan höyrystymislämpötilaa korkeammaksi. Seuraavaksi höyry lämmitetään välitulistuksella, jossa höyry johdetaan korkeapaineturbiinille ja sieltä takaisin kattilaan.

Höyryturbiinissa höyryn lämpöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi, akselin pyörimisenergiaksi. Turbiiniin liitetyllä generaattorilla pyörimisenergia muutetaan sähköenergiaksi. Turbiinista höyry kulkeutuu lauhduttimeen, jossa höyry lauhdetaan merivedellä (Kuva 3.). Turbiinissa on väliottoja, joista otetaan höyryä esimerkiksi syöttöveden esilämmitykseen ja omakäyttöhöyryntarpeeseen.

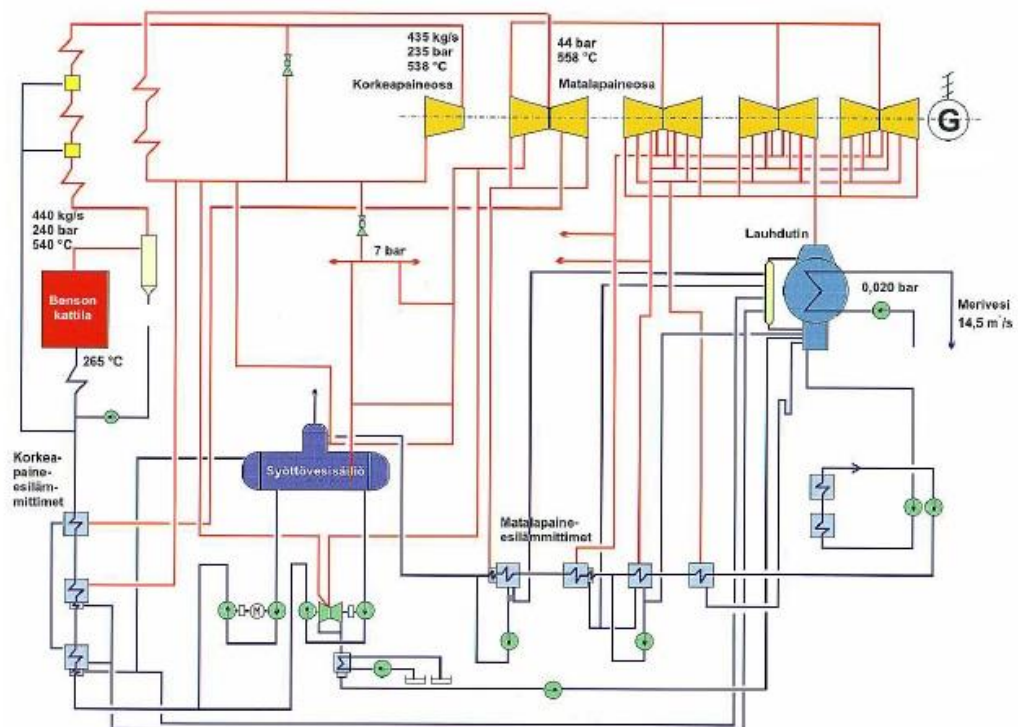
Laitoksen savukaasuja puhdistetaan eri tavoilla. Yksi niistä on typenoksidipuhdistus, jossa savukaasut reagoivat ammoniakkin kanssa katalyytissä, jonka seurauksena epäpuhtauksia saadaan poistettua. Tämän jälkeen savukaasut ajetaan sähkösuodattimen läpi, jonka lentotuhkan suodatusaste on n. 99,5 %. Lopuksi savukaasut ajetaan rikinpoistolaitoksen absorberiin. Savukaasujen rikkidioksidi reagoi pesuaineen kanssa. Pesuprosessissa pystytään poistamaan noin 80 – 95 % laitoksen rikkidioksidgeista.

Ennen absorberia savukaasu jäädytetään, ettei absorberin kumipäällysteinen pinta kärsi. Ennen savukaasujen piippuun päästämistä, savukaasut lämmitetään uudelleen GAVO:lla, ettei savukaasujen lämpötila laske kastepisteeseen tai sen alle. Pesun jälkeen savukaasujen puhdistusliete kuivataan ja tästä prosessista saadaan erotettua rakennusteollisuudessa hyödynnettävää kipsiä. Pesusta syntyneet jätevedet ohjataan puhdistukseen./3/

Taulukko 1. Laitoksen yleiset arvot

Kattilan polttoaineteho	1300MW
Tuorehöyryn määrä	440kg/s
Höyryn paine	240bar
Höyryn lämpötila	540°C
Generaattoriteho	590MW
Jäähdytysveden tarve (100 %)	14m ³ /s
Optimaalinen hyötysuhde	43,50 %

Meri-Porin lauhdutusvoimalaitos



Kuva 2. Meri-Porin laitoskaavio /5/

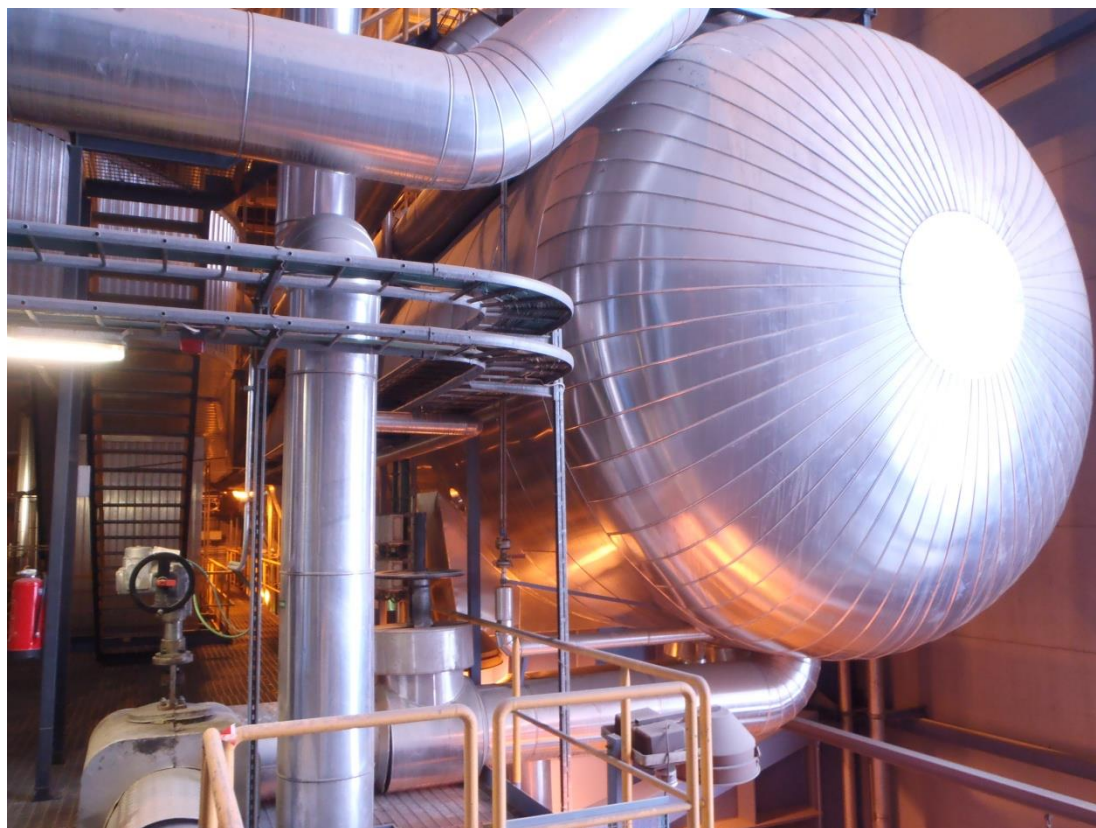


Kuva 3. Meri-Porin voimalaitos tarvitsee valtavan määrän jäähdytysvettä, joka käy ilmi laitoksen merivesiputkista (Matias Kivelä)

4 LAITOKSEN KÄYNNISTYSPROSESSI

4.1 Kylmäkäynnistys

Kylmäkäynnistys aloitetaan purkamalla laitos niin sanotusta säilötystä tilasta. Apukattilalaitos on käynnistetty jo aiemmin tuottamaan höyryä pääkattilan apujärjestelmille. suorittamiseksi prosessin vedet pitää puhdistaa hyvin. Vesistä otetaan näytteitä ja tarvittaessa vettä päästetään hylkyyn, jos tietyt vaadittavat arvot eivät ole vielä riittävän hyvät. Ennen käynnistystä on syytä käydä läpi laitoksen avoimena olevat luukut ja sulkea ne. Laitosta käynnistettäessä syöttövettä ja lisävettä tulee olla riittävästi. Syöttövesisäiliön (Kuva 4.) lämpötila tulee olla 120 °C.



Kuva 4. Meri-Porin voimalaitoksen syöttövesisäiliö (Matias Kivelä)

Alkuvaiheiden jälkeen voidaan kytkeä päälle esimerkiksi seuraavia eri automaattikoja: hajotushöyry, apuhöyry, vesitys, ilmaus, vesihöyry, pohjakuonan sammutus- ja siilokuljetin, polttoöljy ja rikinpoisto. Automaattikkojen kytkennän jälkeen valvomohenkilökunta voi alkaa käynnistämään laitosta. Valvomosta annettu käynnistyskäsky

käynnistää turbiinin ryhmäautomaatiikan. Myös turbiinia tiivistävän tiivistehöyryn automaatiikka kytkeytyy päälle. Kun lauhduttimeen on saatu muodostettua tyhjiö, voidaan päälle kytkeä savukaasu- ja kantoilmapuhaltimet. Myös palamisilman esilämmitin, LUVO, kytketään päälle. Tässä vaiheessa tarkastetaan, että käynnistyksen apuna käytettävä polttoöljy on riittävän lämmintä n.120 °C. Seuraavaksi kattilan polttimien huuhteluilma kytketään päälle. Kun kattila on tuuletettu, voidaan sytyttää ensimmäinen poltin. Tämän jälkeen voidaan lisätä polttimia pikkuhiljaa. Kattilaa käynnistettäessä noudatetaan annettuja käynnistyskäyriä. Kunnes riittävä tuorehöyryvirta saavutetaan, voidaan tehonnostoa jatkaa käynnistyskäyrän mukaisella gradientilla.

Noin 30 minuuttia ensimmäisen polttimen sytytyksen jälkeen korkeapainereduktioventtiili avautuu automaattisesti. Kun korkeapainereduktioventtiili on auki, avautuu myös matalapaine-reduktio. Tämän jälkeen otetaan vielä vesinäytteet ja käynnistetään lauhteenpuhdistus. Jos lauhteet ovat hyvät, siirrytään niitä ajamaan syöttövesisäiliöön. Lauhde- ja syöttövesisäiliön pintoja on tarkkailtava käynnistyksen aikana. Tässä vaiheessa kytketään palamisilman hiukkasia suodattavat sähkösuodattimet päälle.

Kun polttoainetehoa on yli 200 MW ja palamisilman lämpötila on yli 200 °C, voidaan käynnistää ensimmäinen hiilimyly. Kun kaksi hiilimylyä on käynnissä, voidaan vaihtaa hiili säätäväksi polttoaineeksi öljyn sijaan. Käynnistyksessä tukitulta on suositeltavaa pitää neljässä polttimessa, kunnes Bensonpiste on ylitetty. Tällöin prosessissa ei tapahdu suuria lämpötilojen vaihteluita, eikä tuorehöyryn mahdollinen vaihtelu aiheuta kattilan pikasulkuja. Seuraavaksi otetaan rikinpoistolaitos käyttöön. Rikinpoistolaitoksen absorberi kytketään automaatile. Kun ensimmäinen hiilimyly on käytössä, voidaan laitoksen savukaasut ajaa rikinpoistolaitokselle.

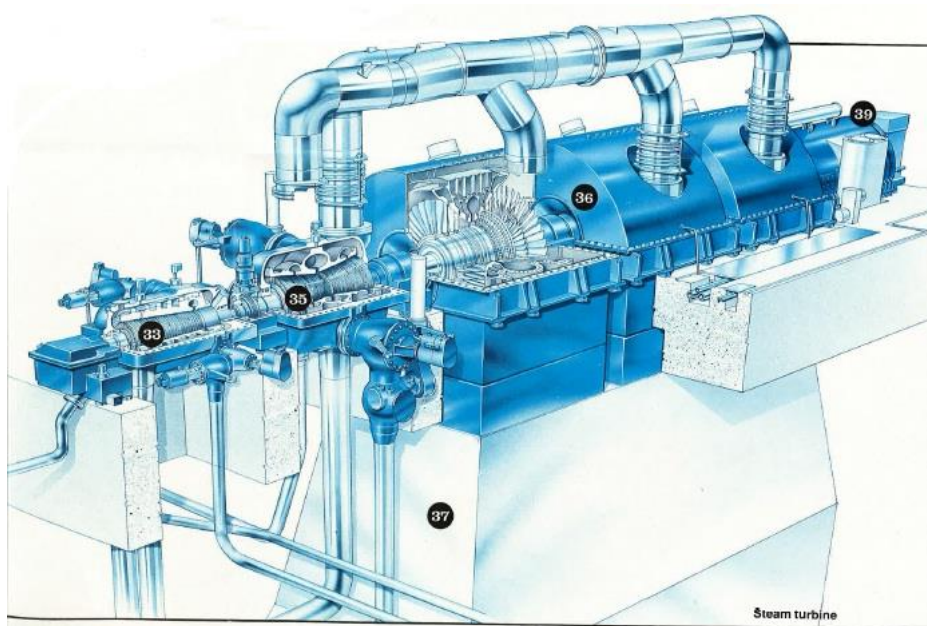
Seuraavaksi käynnistyksessä seuraa turbiinipumpun käynnistäminen. Kun pääturbiini on vielä ohituskäytöllä, otetaan linjoista tarvittavat vesinäytteet, jotta tiedetään, onko höyry tarpeeksi puhdasta ajettavaksi suoraan pääturbiinille. Jos tarvittavat arvot ovat kunnossa, voidaan turbiini resetoida. Tällöin turbiinin pikasulkuventtiilit avautuvat. Tässä vaiheessa on saavutettu turbiiniohjelman kohta, tehoajo, jonka jälkeen pitää vielä varmistaa, että turbiinisäätäjä on päällä. Kierrostennosto-ohjelma ajaa turbiinin

kierrokset ≥ 2990 rpm. Kun turbiinin käynnistysohjelma on askeleessa 29, on generaattori valmis tahdistukseen. Aluksi suljetaan sarjaerotin ja magnetointilaitteen kenttäkatkaisija, jonka jälkeen käynnistetään tahdistuksen käynnistysohjelma. Kun laitos on verkossa, kytketään turbiinin ajo-ohjelma takaisin päälle, jos se on pudonnut pois käynnistyksen aikana. Kun turbiinin teho saavuttaa kattilan tehon, korkeapainereduktioventtiilit sulkeutuvat, turbiinin säätöventtiilit aukeavat täysin ja näin kattila alkaa säätää sähkötehoa liukuvan paineen periaatteen mukaisesti. Kun savukaasun lämpötila ennen katalyyttiä ylittää $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, voidaan aloittaa ammoniakkin ruiskutus savukaasuihin. Kun laitos on saatu käynnistettyä, tarkkaillaan turbiinin toimintaa valvomosta. Esimerkiksi tuorehöyryn paineita ja materiaalien lämpötiloja on syytä tarkkailla./3/

5 TURBIINI

5.1 Turbiinijärjestelmä

Meri-Porin voimalaitoksen turbiini (Kuva 5.) pitää sisällään korkeapaineosan, kaksijuoksuisen välipaineosan ja kolme kappaletta kaksijuoksuisia matalapaineturbiineja. Turbiinit ja generaattori (Kuva 6.) muodostavat yhdessä yksiakselisen turbiiniryhmän. Turbiinin (Taulukko 2.) kaksijuoksuisuus tarkoittaa, että höyry tulee turbiiniin keskeltä ja jakaantuu siitä molempiin suuntiin turbiinia./6/



Kuva 5. Meri-Porin voimalaitoksen turbiini/6/

- 33. Korkeapaineturbiini
- 35. Välipaineturbiini
- 36. Matalapaineturbiini
- 39. Generaattori
- 37. Lauhdutin

Taulukko 2. Turbiinin tekniset arvot

Turbiinin tekniset tiedot			
Valmistaja: ABB			
	100 % T-MCR	VWO B-MCR	Rated Output
Output	588,9 MW	645,2 MW	588,9 MW
Number of revolutions	3000 min ⁻¹	3000 ⁻¹	3000 ⁻¹
Live steam pressure	235bar	235	235
Live steam temperature	538°C	538°C	538°C
Steam temperature after reheat	558°C	558°C	558°C
Condenser pressure	0,020 bar	0,023 bar	0,02 bar

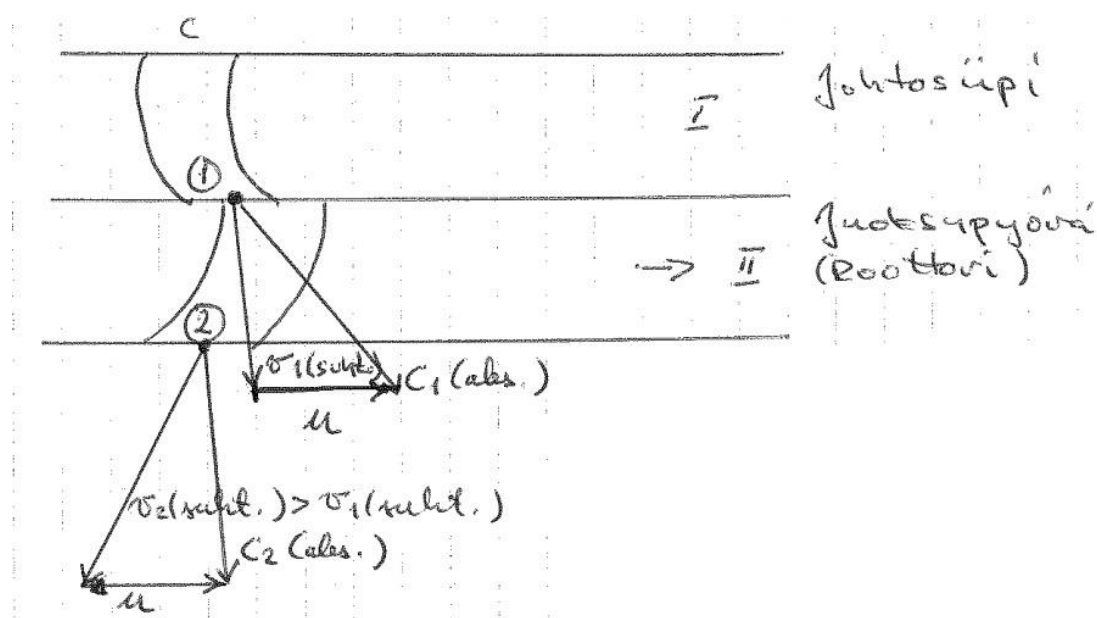


Kuva 6. Meri-Porin voimalaitoksen turbiini luonnossa (Matias Kivelä)

5.1.1 Turbiinin tehtävä

Turbiinin tehtävänä on muuttaa kattilalta tulevan höyryn energia mekaaniseksi liike-energiaksi. Staattorisiivistössä kasvanut höyrystuihku aiheuttaa roottorisiipiin kehävoiman ja aikaansaa akselin pyörimisen. Samalle akselille liitetty generaattori alkaa täten tuottamaan sähköä.

Höyryvirtauksen liikehdintää turbiinin siivistössä kuvaa nopeuskolmio (Kuva 7.). Nopeuskolmio pitää sisällään kehänopeuden (u), absoluuttisen nopeuden (c), sekä suhteellisen nopeuden (w).

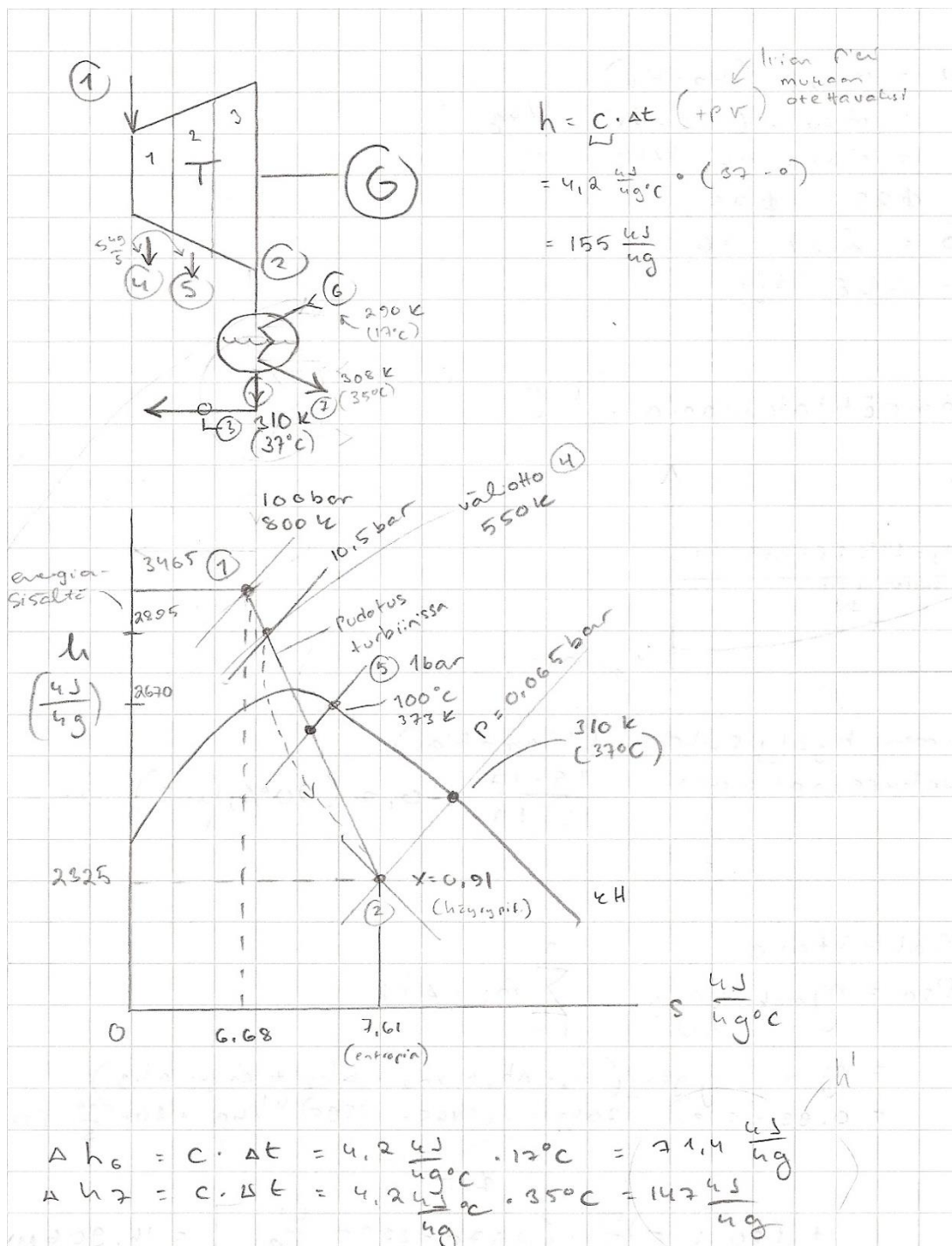


Kuva 7. Nopeuskolmion muodostuminen reaktioperiaatteessa/4/

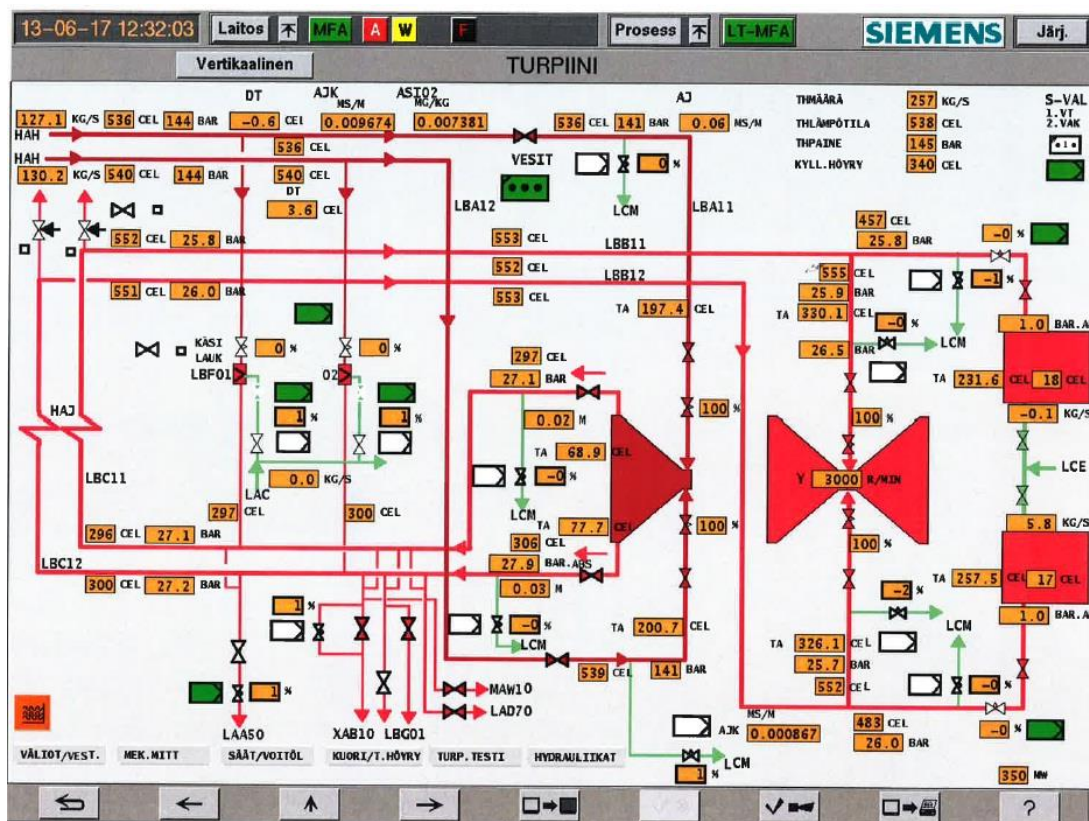
Kuten aiemmin mainittiin, Meri-Porin voimalaitosta ajetaan liukuvan paineen säädöllä, jossa painetta säädetään kattilalla niin, että turbiinin säätöventtiilit ovat 100 prosenttisesti auki. Liukuvan paineen säädössä syöttövesipumppujen kierrosnopeus kasvaa, jolloin myös paine ja höyryn massavirta kasvavat, höyryn lämpötilan pysyessä vakiona. Kasvavan massavirran ansiosta, myöskin saatava turbiiniteho suurenee.

Turbiinissa tapahtuu prosessin aikana kaksi energiamuunnosta, ensiksi höyryn entalpia muunnetaan virtausenergiaksi, joka edelleen siirretään turbiinin akselille pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi. Höyryn paisumisprosessia turbiinissa voidaan kuvata

h-s -piirroksen avulla. H-s -piirros (Kuva 8.) toimii voimalaitoksilla suunnittelun ja käytön apuvälineenä. Piirroksessa kuvataan höyryn olotilaa kahden muuttujan, entalpian ja entropian funktiona.



Kuva 8. Turbiinin H-s -piirros esimerkki/4/



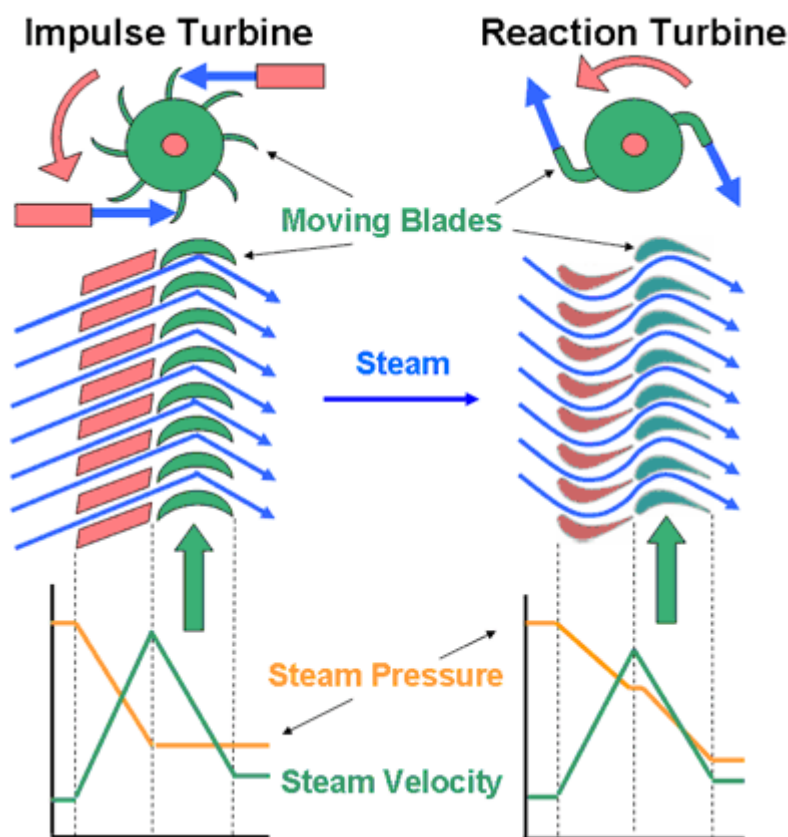
Kuva 9. Siemensin valvomokuva turbiinista (Matias Kivelä)

Turbiinin pyörimisnopeus määräytyy sähköverkon taajuuden ja generaattorin napalukumäärän mukaan. Koska Suomessa on käytössä 50Hz:n sähköverkko ja generaattorin napaluku on 2, Meri-Porin turbiinin (Kuva 9.) pyörimisnopeus on 3000rpm.

Matalapaineturbiinista tuleva höyry lauhdutetaan lauhduttimessa merivedellä lauhdeeksi, joka johdetaan eteenpäin syöttövesisäiliöön. Lauhdeturbiiniin tuodusta lämmöstä noin 40 % saadaan käytettyä hyödyksi./6/

5.1.2 Turbiinin rakenne

Höyryturbiinit jaetaan yleisesti joko aktio- tai reaktioturbiineihin (Kuva 10.). Meri-Porin voimalaitoksen höyryturbiini on reaktiotyyppinen. Kun höyry etenee reaktioturbiinissa, sen paine laskee turbiinivaiheen läpi mentäessä sekä staattori- että roottori-siivissä. Höyryn paineen putoaminen käytetään reaktiovoiman aikaansaamiseksi. Reaktioturbiinit kuitenkin toimivat käytännössä myös aktioperiaatteen mukaan, sillä höyryllä on jo tietty nopeus ja liike-energia juoksupyörälle tullessaan. Pääsuminen edelleen saa aikaan reaktiovoiman, joka vaikuttaa höyryn suunnan muutoksesta aiheutuvan aktiovoiman lisäksi. Reaktioturbiinissa siiven rakenne kapenee loppua kohden, jotta höyryn nopeus kasvaisi jakson lopussa. Reaktioaste kuvaa sitä, kuinka isolla prosentilla lämpöputouksesta aiheutuu reaktiosta. Reaktioturbiinissa juoksupyörän siivet toimivat samalla myös suuttimina.



Kuva 10. Havainne kuva aktio- ja reaktioperiaatteista/7/

Höyryturbiinien pesät pyritään suunnittelemaan niin, että minimoidaan lämpörasitukset ja muodonmuutokset muuttuvissa olosuhteissa. Lämpörasitukset asettavat pesän rakenteelle käyttövarmuuden vuoksi erittäin suuria vaatimuksia. Turbiinin pyörivät osat eivät saa missään olosuhteessa ottaa kiinni kiinteisiin osiin ja lisäksi materiaaleihin ei saa syntyä sellaisia termisiä jännityksiä, jotka aiheuttavat pysyviä muodonmuutoksia tai murtumia. Massan jakautuminen roottorin ja pesien välillä pitää olla sopusuhtainen ja lämpötilaerojen kohtuullisia yhtäläisen lämpölaajenemisen aikaansaamiseksi. Pesien pitää olla kestäviä ja tiiviitä. Roottorien suunnittelussa tärkeää on oikean materiaalin valinta. Niiden tulee kestää erilaisia lämpörasituksia ja värähtelyjä. Myös turbiinin siivistöön pätevät samat asiat. Siivistössä pitää kiinnittää myös erityistä huomiota korroosiosuojaukseen. Ennen turbiinin käynnistystä sen pesät, roottori ja säätöventtiilit tulee lämmittää sopivaan lämpötilaan käynnistystä varten. Lämmityksessä tuorehöyryä syötetään turbiiniin. Kun turbiini säilötään seisakin ajaksi, pyritään minimoimaan mahdolliset korroosiovauriot mahdollisimman hyvin. Turbiinin kuivasäilöntä voidaan suorittaa kuumaa ja kuivaa ilmaa käyttäen. Meri-Porin voimalaitoksella on yhteinen puhallin korkea- ja välipaineturbiinille ja oma puhaltimensa matalapaineturbiinille.

Nykyaikaisen turbiinin pidempiaikainen ongelmaton käyttö riippuu suuresti oikeista ylös- ja alasajotavoista. Turbiinin käytön ohjeistuksesta poikkeaminen voi aiheuttaa vaurioita ja turbiinin osien käyttöikä saattaa lyhentyä. Turbiinin ylösajo, alasajo ja tehon nosto lisäävät paineesta, keskipakovoimasta ja lämpötiloista johtuvia jännityksiä. Näitä lämpöjännityksiä tulee rajoittaa, jottei koneen käyttöikä lyhene. Tämä toteutetaan lämpötilagradientteja ja tehon muutosnopeutta säätelemällä. Tehon muutosgradientit määritellään höyryn laadun ja koneen geometrian perusteella.

Suurin muutos höyryturbiineiden kehityksessä on tapahtunut siipien muotoilussa. Muotoilulla on onnistuttu nostamaan turbiineiden hyötysuhdetta merkittävästi. Hyötysuhdetta voidaan parantaa esimerkiksi optimoimalla höyryn virtausta, käyttämällä modernimpia siipiprofiileita, sekä kasvattamalla matalapaineturbiinien viimeisten siipien pituutta.

Turbiineista (Kuva 11.) puhuttaessa tulee esille myös sana vyöhyke. Vyöhyke tarkoittaa turbiinin kiinteän johtosiiven ja pyörivän siiven yhdistelmää. Suurissa voima-

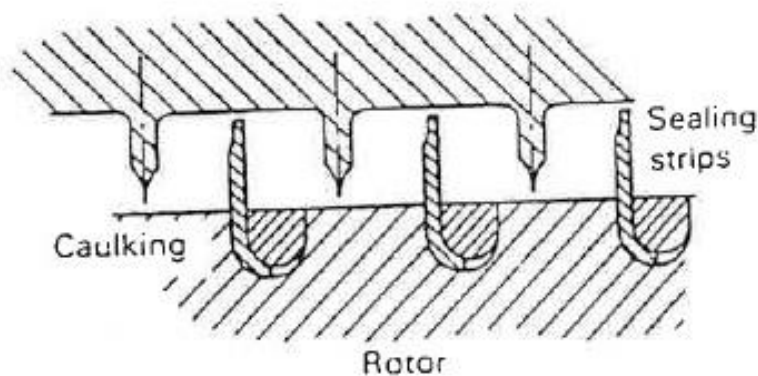
laitosturbiineissa vyöhykkeitä on useita kymmeniä. Turbiiniin tulevan höyryvirran suunta jakaa taas turbiinit joko aksiaali- tai radiaaliturbiineihin. Aiemmin mainitut aktio- ja reaktioperiaatteet kuvaavat turbiinin työtapoja. Aktiossa puhutaan tasapaineesta ja reaktiossa taas ylipaineesta, jossa paine alenee pikku hiljaa./6/



Kuva 11. Höyryturbiini avattuna/10/

5.1.3 Turbiinin tiivisteet

Höyryvuotojen tiivistäminen turbiinissa on hankalaa. Turbiinin akselin ja pesän väliin ei voida tehdä tiivisteitä, jotka saattaisivat ottaa kiinni pyöriviin osiin. Tämän vuoksi käytetään labyrinttitiivisteitä (Kuva 12.), jossa pyörivän ja kiinteän osan välille tehdään terävän kärjen avulla mahdollisimman pieni rako. Rako on kymmenesosamillimetrejä. Yksi labyrinttitiiviste ei ole täysin tiivis, mutta tekemällä useita peräkkäisiä rakoja, saadaan vuotohöyrymäärät pysymään mahdollisimman pieninä. Jotta vuotohöyry ei tunkeutuisi turbiinisaliin, johdetaan se ulosotosta vuotohöyryn lauhduttimeen./6/



Kuva 12. Labyrinttitiiviste/6/

5.1.4 Turbiinin laakerit

Turbiinissa olevat laakerit ovat hydrostaattisia liukulaakereita. Ulkopuolisesta järjestelmästä tuotettu öljynpaine pitää liikkuvat pinnat toisistaan erillään. Aksiaalilaakereita turbiinigeneraattorissa on yksi. Radiaalilaakereita on turbiinipesien ja generaattorin päissä ja välissä./6/

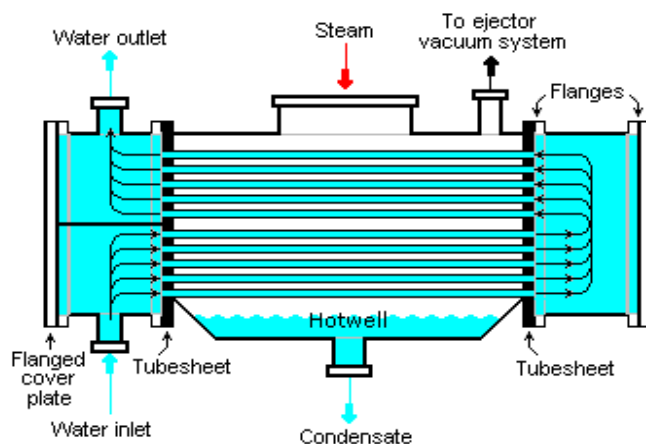
5.1.5 Öljyjärjestelmä

Öljyjärjestelmä on suunniteltu niin, että öljyn saanti on varmistettu laakereille joka tilanteessa. Öljypumppu on yhdistetty suoraan roottoriin, joten pumppu käy aina turbiinin käydessä. On olemassa myös vara- ja hätäpumppuja häiriöiden varalle. Öljymäärä säädellään eri laakereille kuormitus- ja jäähdytyserojen mukaan. Voitelun lisäksi öljyllä on tehtävänä olla jäähdyttävä lämmönsiirtäjä ja korroosion estäjänä. Öljyjä valittaessa on syytä kiinnittää huomio oikeaan viskositeettiin, hapettumiskykyyn ja kykyyn vastustaa emulgoitumista./6/

5.1.6 Lauhdutin

Voimalaitoksen lauhduttimen (Kuva 13.) tehtävänä on lauhduttaa turbiinilta tuleva matalapaineinen höyry ja ohitushöyry takasin vedeksi. Lauhdutin myös kerää tyhjenykset sekä varastoi lauhteen ja poistaa siitä ilman. Kun höyry tiivistyy, se tuottaa lauhduttimeen alipaineen. Tämä parantaa turbiinin hyötysuhdetta. Koska turbiinista tulevan höyryn paine on alle ilmakehän paineen, on lauhduttimessa oltava tyhjiö höyryn etenemisen mahdollistamiseksi. Ejektorit toimivat apuna tyhjiön muodostuksessa. Hyötysuhteeseen vaikuttaa paine-ero, joka määräytyy turbiinille tulevan ja matalapaineturbiinista lauhtuvan höyryn mukaan. Koska höyry tiivistyy matalassa paineessa vasta noin 20 °C lämpötilassa, on lämpimimmissä maissa lauhdelaitoksissa apuna omat jäähdytystorninsa.

Lauhdutin sijaitsee aksiaalisesti turbiiniin nähden. Lauhdutin on hitsattu kiinni turbiinipesän ulostuloihin, joten periaatteessa lauhdutin on ripustettu roikkumaan turbiinin perustasta. Jottei turbiiniin kohdistuisi liikaa kuormittavia voimia, on lauhduttimen pohja kiinnitetty jousien päälle. Lauhdutin koostuu neljästä eri osasta: lauhduttimen kaulasta, putkinipun höyrypuolesta, putkinipun vesipuolesta ja hotwellista, eli lauhteen keruutilasta./3/



Kuva 13. Lauhduttimen toimintaperiaate /11/

5.1.7 Turbiinin pyörittäminen apulaitteella

Ennen turbiinin käynnistämistä pitää suorittaa paaksaus, eli turbiinin pyörittämien apulaitteella (Taulukko 3.). Roottorijärjestelmä on varustettu paaksauslaitteistolla, jonka tarkoituksena on turbiinin pyörittäminen käynnistys-, alasajo- ja jäähdytystilanteissa. Paaksauksella pyritään välttämään roottorin vääntyminen lämpötilamuutosten johdosta. Paaksaus mahdollistaa täten turbiinin nopeamman käynnistyksen. Paak-sia pyöritetään sähkömoottorin avulla ja se on automatisoitu pyörimään turbiinin pyörimisen mukaan. Kun turbiinin kierrosnopeus ylittää 200rpm, kytkeytyy paaksi automaattisesti pois päältä./6/

Taulukko 3. Paaksausajat

Akseli pysähtyneenä	Minimi paaksausaika
alle päivän	2h
1...7pv	6h
7...30pv	12h
yli 30pv	24h

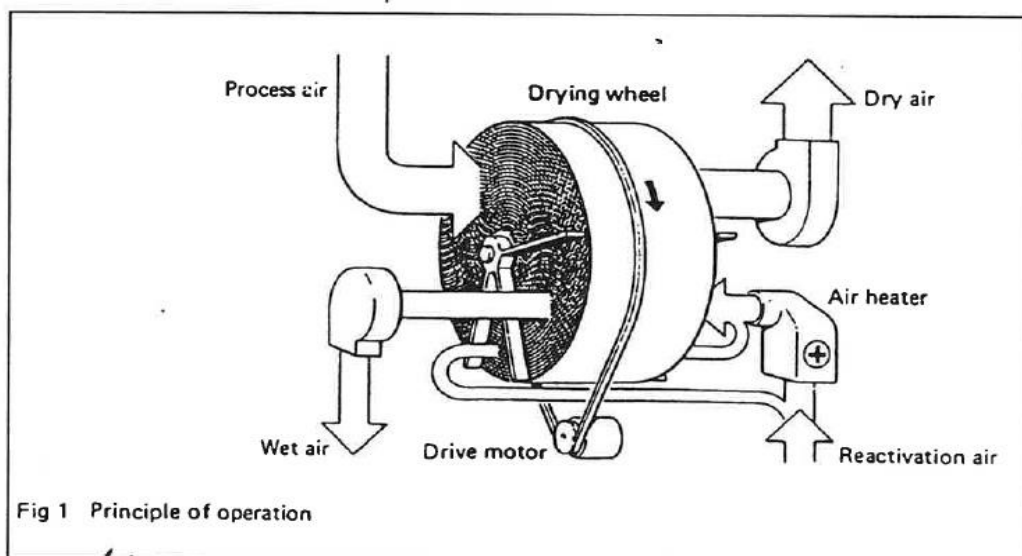
5.1.8 Turbiinin säilöntä

Turbiinin säilöntäjärjestelmän tehtävänä on pitää turbiini ja muuta komponentit kuivina seisokkien aikana. Säilöntäjärjestelmä (Kuva 14.) estää korroosion aiheuttamat vauriot turbiinin ollessa käyttämättömänä. Meri-Porin voimalaitoksen järjestelmään kuuluu neljä kuivausyksikköä. Suurimman virtauskapasiteetin (2700m³/h) omaava yksikkö on kytketty väli- ja matalapaineturbiinin väliseen ylivirtausputkeen (Kuva 15.). Seuraava yksikkö on kytketty korkeapaineturbiinin höyrynpoistoputkiin sekä kp-esilämmittimeen menevään väliottoputkeen. Lisäksi järjestelmässä on mukana lauhduttimen väliottoputki ja syöttövesiturbiinin höyryn sisäänmenoputki. Kolmannessa järjestelmässä (Kuva16.) on mp-turbiinin väliotto mp-esilämmittimeen sekä vp-turbiinin höyrynpoistoputki. Pienin järjestelmä on tarkoitettu voiteluöljysäiliölle.

Väli- ja matalapaineturbiinien väliset ylivirtausputkistot, matalapaine-esilämmittimen putkistot esilämmittimeen ja voiteluöljysäiliön putket ovat varustettu laipallisilla yhteillä. Laitoksen normaalin käytön aikana yhteissä on umpilaipat. Kun turbiini ei ole käytössä, kuivailmasyötöt liitetään yhteisiin letkuilla. Toinen kuivausjärjestelmä on varustettu kahdella sulkuventtiilillä. Laitoksen normaalin käytön aikana venttilit ovat kiinni.

Kuivailmayksiköiden kuivaa ilmaa kierrätetään prosessijärjestelmän kautta. Kulkiesaan järjestelmän kautta, kuiva ilma kuivattaa putket ja komponentit. Ilmankuivaimen toiminta perustuu sorptio-ilmiöön, eli absorption ja adsorption yhdistelmään. Kuivaimen rumpu pyörii hitaasti, noin 8 kierrosta/tunti, samalla kun sen läpi johdetaan kaksi eri ilmavirtausta. Ensimmäinen on kostea prosessi-ilma, mistä kosteus poistetaan ja mikä poistuu kuivana takaisin prosessiin. Toinen on kuumennettu, reaktiivinen ilma, joka absorboi kosteuden rummusta ja poistuu kosteana

Tämä periaate tekee mahdolliseksi jatkuvan kuivausprosessin, minkä kapasiteettiä on helppo säätää. Pieni osa reaktiivisesta ilmasta johdetaan ennen kuumennusta jäähdyttämään kuivausrummun sitä osaa, mihin prosessi-ilma johdetaan. Tämä ilma lämpeene rummussa ja lopuksi se sekoitetaan ilmankuumentimelta tulevaan reaktiiviseen ilmaan./6/



Kuva 14. Ilmankuivaimen kuvaus /6/

Ilmankuivaimen absorptioroottorit on valmistettu komposiittimateriaalista ja kosteutta keräävistä aineista. Roottoritekniikka on sovitettu käyttötarkoituksen mukaan, eli ilmavirta, ilman tila ja pyörimisnopeus on optimoitu kuivaajan käyttötarkoituksen mukaan. Kuivaimessa on myös mahdollistettu lämmön talteenottomahdollisuus./6/



Kuva 15. Munters MX 2700 ilmankuivan vp- ja mp-turbiinin väliselle ylivirtausputkelle (Matias Kivelä)



Kuva 16. Kolmas ilmankuivausjärjestelmä (Matias Kivelä)

5.2 Turbiinin käynnistys ja käyttö

Turbiinin käynnistyksessä tapahtuvissa tehon muutoksissa tapahtuu turbiinin eri osien välillä lämpötilaeroja, jotka aiheuttavat lämpölaajenemista ja lämpöjännityksiä. Tästä johtuen, välykset voivat supistua ja jännitykset ovat materiaalien kestävyysrajoilla. Turbiinin sisäinen tiiveys eri vyöhykkeiden välillä voi taten kärsiä. On myös tarkkailtava turbiinin kuoren ja siivistön välistä lämpötilaa. Epätasainen lämpötilaero voi aiheuttaa höyryn kostumisen ja näin eroosioita turbiinin siivistössä.

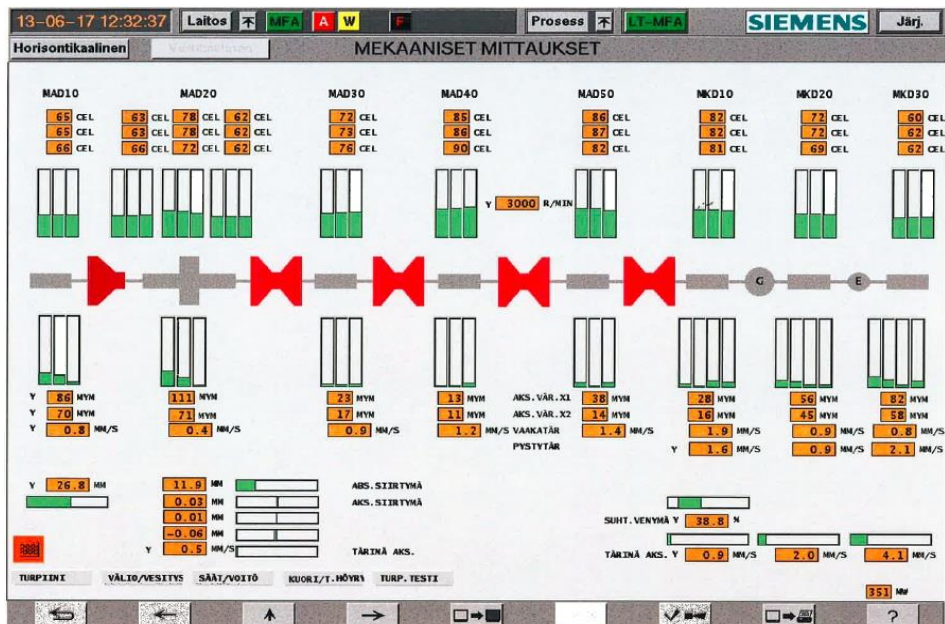
Varsinaista turbiinin käynnistystä edeltää joukko yleisiä toimenpiteitä:

- on tarkastettava höyryputkien vesitykset
- höyryä ei saa virrata seisovaan turbiiniin
- säätöventtiilit ja takaiskulaitteet tulee tarkastaa
- höyryputkissa ei saa olla vettä
- lämpölaajenemiskohdat tulee tarkastaa
- vesitykset turbiiniin oltava auki
- tarkastetaan öljymäärät ja pumput
- kytketään pyörimisen apulaite eli paaksi
- avataan tiivistehöyry akselitiivisteille
- tehdään pikasulun kojeistukset
- tarkastetaan, että öljyn lämpötila on riittävä käynnistykseen

Näiden toimenpiteiden jälkeen voidaan aloittaa varsinainen turbiinin käynnistys. Käynnistys aloitetaan lämmittämällä höyryputkisto venttiileineen lämpötilaerot silmälläpitäen. Kun riittävä tulistusaste on saavutettu, voidaan höyry ohjata turbiinille ja ajaa se lämmityskierroksille. Kun kierrokset alkavat nousta pitäisi akselinpyörityslaitteen kytkeytyä pois päältä. Lämmittämisen ideana on saada tasainen lämpeneminen turbiinin kiinteiden ja liikkuvien osien välille. Käynnistyksen aikana tulee seurata turbiinin suhteellisia ja absoluuttisia venymiä, tarkkailla akselin ja laakereiden värinöitä, sekä turbiinin osien, höyryn, öljyn ja jäähdytysveden lämpötiloja.

Turbiinia pitää tarkkailla myös käynnin aikana (Kuva17.). Tulohöyryn lämpötilaa ja painetta on syytä pitää silmällä, kuten myöskin käynnin tasaisuutta ja värähtelyjä.

Lisäksi öljyn virtausta laakereille tarkkaillaan. Pääosa käynnin tarkkailusta tapahtuu laitoksen valvomosta käsin. Mittaustuloksia verrataan normaaliarvoihin ja aikaisemmin saatuihin arvoihin./6/



Kuva 17. Siemensin valvomokuva turbiinin mekaanisista mittauksista

6 TURBIININ LÄMMITYSJÄRJESTELMÄESIMERKKI

6.1 Turbiinilaitos ja sen lämmitysjärjestelmän vaikutukset

Esimerkkilaitoksen turbiini on Siemensin valmistama ja kooltaan 250 MW. Turbiinin lämmitysjärjestelmän avulla on kyseisen turbiinilaitoksen käynnistystä saatu nopeutettua 1,5 - 2 h, eli noin neljään tuntiin. Ilman järjestelmää turbiinin käynnistys täydelle teholle vie noin kuusi tuntia. Käynnistyskustannukset ovat myös laskeneet lämmitysjärjestelmän ansiosta noin 2000 euroa käynnistyskerralta. Ajonäkymien mukaisesti, turbiinin lämmitys aloitetaan yleensä viikkoa ennen voimalaitoksen käynnistystä.

Turbiinin erilaisia värinöitä on saatu myös minimoitua tehokkaan lämmityksen ansiosta. Myös täyden kuorman saaminen turbiinille on lämmitysjärjestelmän myötä nopeutunut.

6.2 Lämmitysjärjestelmäratkaisu

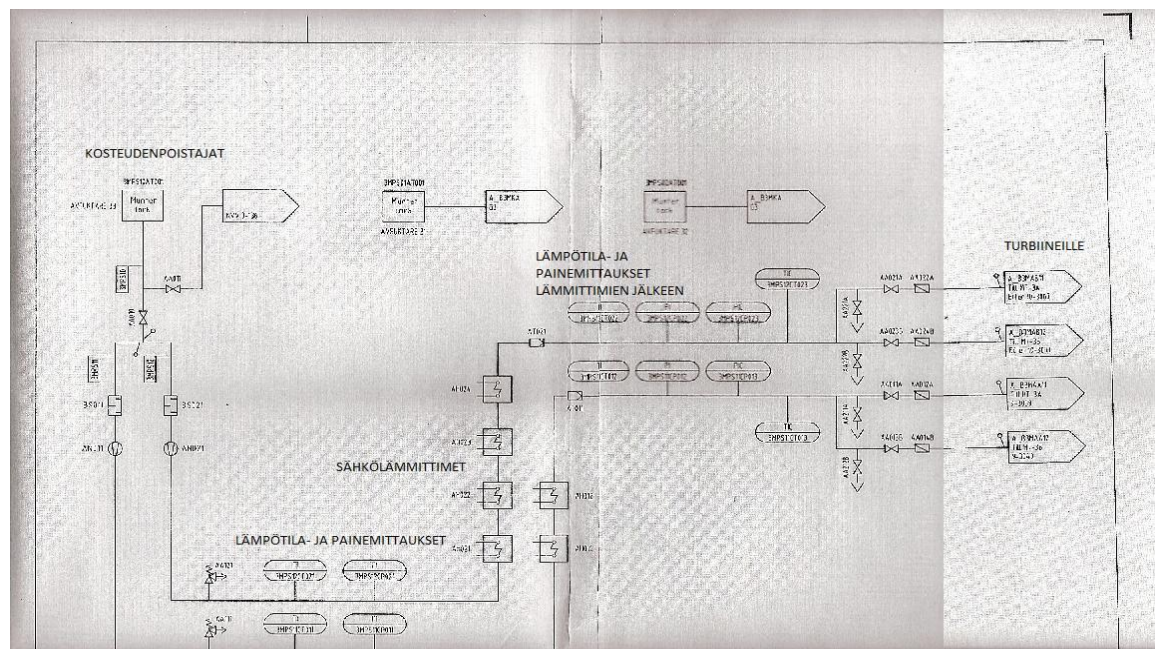
Lämmitysjärjestelmän (Kuva 18.) perusideana on paineistaa ilmaa kompressorilla, joka sitten lämmentyään puhalletaan eteenpäin turbiinille. Matkalle on liitetty mukaan kuusi sähkölämmittintä lämmittämään puhaltimelta lähtenyttä ilmaa. Järjestelmä on siis kytketty laitoksen omaan säilöntäjärjestelmään, joka on avain kuin Meri-Porin Muntersin järjestelmä, mutta mukaan on lisätty lisälämmittimet kuumemman ilman tuottamiseksi. Lisälämmittimien jälkeen kuuma ilma johdetaan korkeapaineturbiinin säätöventtiilien liitännöiden kautta järjestelmään. Järjestelmään on myös liitetty lämpötila- ja painemittauksia lämmitysprosessin tarkkailun helpottamiseksi. Mittauspisteet sijaitsevat ennen ja jälkeen sähkölämmittimiä. Esimerkkilaitoksen puhalluskoneet ovat kaksinopeuksisia.

Esimerkkilaitoksen lämmitysjärjestelmän (Kuva 19.) kolmitieventtiileillä varustetut puhallinkoneet ovat sijoitettu +5 metrin korkeuteen vanhasta kuivausjärjestelmästä. Jokaisen puhallinkoneen jälkeen on asennettu yksi varoventtiili. Puhallinkoneelle on liitetty ohjaus, joka säätelee puhallinta turbiinin lämpötilan mukaan. Lämmitysjärjes-

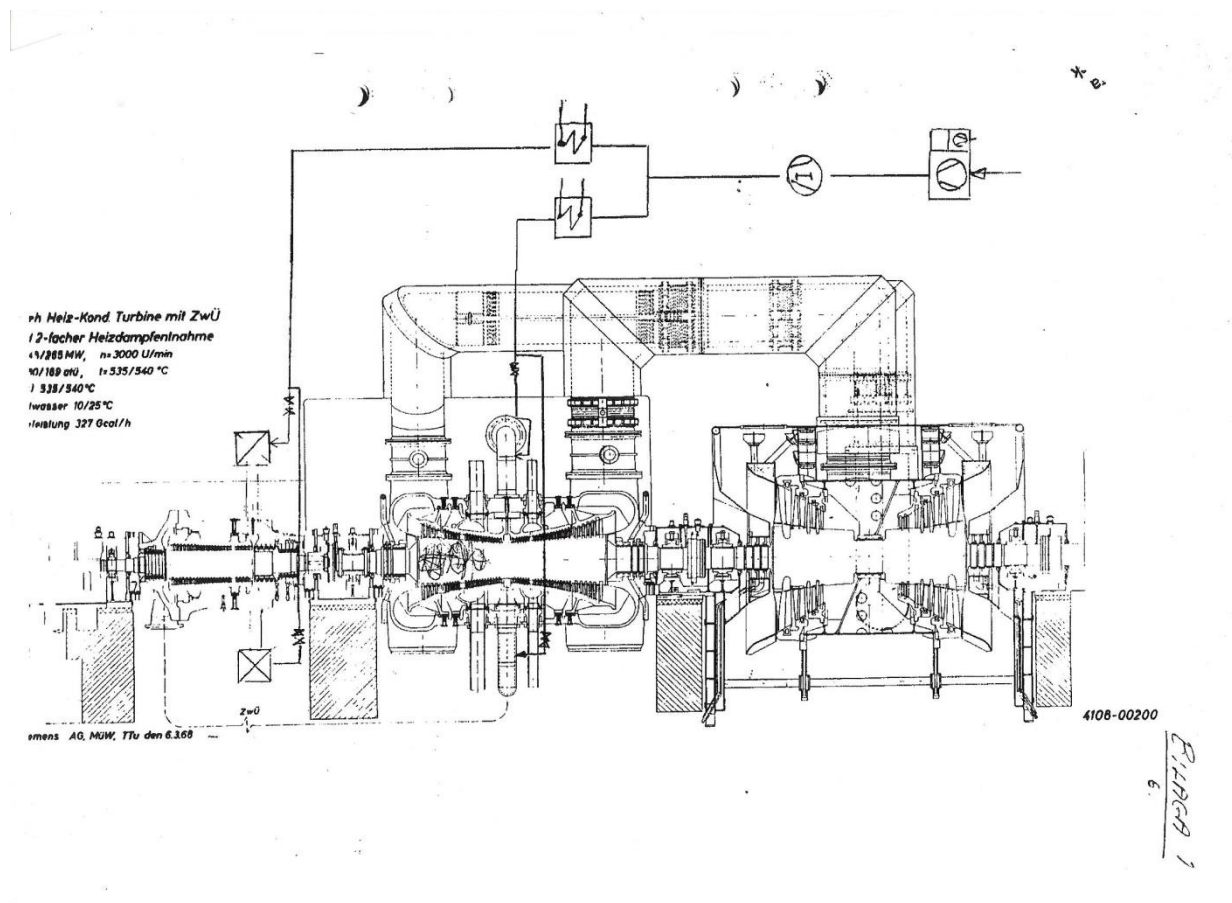
telmän sulkuventtiilit on merkitty, jotta venttiilit eivät vahingossa ole väärässä asennossa, kun laitosta aletaan ajamaan ylös.

Lämmityksen jälkeen ilman lämpötila on noin 300 °C. Sisälle järjestelmään lämmitetty ilma kulkeutuu noin 225 - 250 °C asteisena. Tehokas ylös lämmitys tapahtuu kahden tunnin ajan 15 kW / h:n suuruisena, jonka jälkeen tehot nostetaan 30 kW / h:een.

Kyseistä lämmitysjärjestelmää käytetään vain, jos ajonäkymiä on tai valmius halutaan muuten pitää korkeana. Muussa tapauksessa turbiinilaitosta ylläpidetään perinteisen säilöntäjärjestelmän avulla./11/



Kuva 18. Esimerkkilaitoksen lämmitysjärjestelmäratkaisun kaavio/11/



Kuva 19. Turbiinille tulevat lämmitysjärjestelmän liitännät/11/

7 VASTAAVANLAISEN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN SOVELTAMINEN MERI-PORIN TURBIINILAITOKSELLE

7.1 Lämmitysjärjestelmän soveltamisen tutkiminen Meri-Porin turbiinilaitokselle

Esimerkkilaitoksen kaltainen järjestelmä on sovellettavissa myös Meri-Porin laitokselle. Sähkölämmittimen lisääminen jo nyt olemassa olevaan järjestelmään on mahdollista. Investointeja joutuu tekemään, sillä esimerkiksi vanhan Muntersin säilöntäjärjestelmän puhaltimen joutuisi vaihtamaan tehokkaampaan. Lisäksi tietysti sähkölämmittimet oheistarvikkeineen joutuu hankkimaan. Tähän pitää vielä lisätä muutostyöt, muut lämmitysjärjestelmän komponentit ja töistä aiheutuvat kustannukset.

7.1.1 Virtaus- ja lämmitysteholaskut

Laskuesimerkillä voidaan kokeilla esimerkiksi vp- ja mp-turbiinien väliseen ylivirtausputkeen menevän ilmankuivausyksikön QSK10:n teknisistä tiedoista saadulla virtauskapasiteetilla erilaisia lämmitystehoja:

Ensiksi muunnetaan virtauskapasiteetti $2700 \text{ m}^3 / \text{h} \Rightarrow 0,75 \text{ m}^3 / \text{s} (750 \text{ l} / \text{s})$

Tämän jälkeen voidaan kokeilla eri kW-arvoja kaavalla:

$$\Phi = \varphi * q_v * C * \Delta t \text{ (t ulos - t sisään)}$$

$$= 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3 * 0,75 \text{ m}^3 / \text{s} * 1 \text{ kJ} / \text{kg} \text{ } ^\circ \text{C} * (300 - 30) \text{ } ^\circ \text{C} = \underline{\underline{243 \text{ kW}}}$$

Merkkien selitykset:

Φ = lämpövirta, teho (kW)

φ = virtaavan aineen tiheys (kg / m³)

qv = tilavuusvirta (m³/s)

c = ominaislämpökapasiteetti (kJ / kg °C)

Δt = lämpötilan muutos (°C)

Kaavan lämpötilat saadaan, kun päätetään sisään järjestelmään menevän ilman lämpötilaksi 300 °C ja tubiinisalin sisäilman lämpötilaksi 30 °C.

Tästä voidaan luoda taulukko tilavuusvirran (qv) eri arvoille kokeilemalla vaihtelua (0,075-0,75) (m³/s) välillä:

Taulukko 4. Laskuista saadut tulokset

Tilavuusvirtaus (m³/s)	Lämmitysteho (kW)
0,075	24,3kW
0,15	48,6kW
0,30	97,2kW
0,45	145,8kW
0,55	178,2kW
0,65	210,6kW
0,75	243kW

Tämän hetkinen järjestelmään menevän kuivan ulostuloilman lämpötila on 45 °C, joten lämmitysteho on silloin ainoastaan 13,5 kW.

Lämmitysteho = 1,2 kg / m³ * 0,75 m³ / s * 1 kJ / kg °C * (45 - 30) °C = 13,5 kW

Kuivausilmayksikkö QSK10:n tekniset tiedot antavat puhallinkoneen nimellistehoksi 35,2 kW

7.1.2 Massalaskut

Massalaskujen tarkoituksena on tutkia, miten turbiinin eri osat (Taulukko 5.) lämpenevät lämmitysjärjestelmän avulla välillä 20 °C – 300 °C. Turbiinien massat koostuvat sisäpesästä, ulkopesästä ja roottorista. Lisäksi pitäisi selvittää, paljonko sähköä kuluu yöslämmityksessä ja paljonko sähköä kuluu, kun turbiinia ylläpidetään 300 °C:een lämpötilassa pidempiä aikoja.

Taulukko 5. Turbiinin massat

Turbiini	Välipäineturbiini	Korkeapaineturbiini
Kokonaismassa	83 000 kg	60 000 kg

Laskelmia on alustavien arvojen saamiseksi vaikea ja siten epätarkkaa tehdä teoreettisesti. Silloin tulisi laskea eri osien lämpeneminen turbiinin eri kohdissa lämmitystehon ja muiden tekijöiden funktiona. Laskelmista tulisi liian epätarkat, jos pelkästään niihin tulisi luottaa.

Sen takia asia tulisi selvittää ensin kokeellisesti asettamalla riittävä määrä lämpötilantureita turbiinin eri kohtiin ja kokeilemalla mittauskohtien lisäksi eri lämmitystehoja. Siten päästäisiin konkreettisiin tuloksiin ja sen jälkeen vasta voitaisiin kehittää lämmönsiirtotekniikan teoriaan perustuvia laskentaperiaatteita lämpötilojen ja muiden muuttujien määrittämiseksi eri turbiinityypeille.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Yhteenveto lämmitysjärjestelmästä

Tässä insinööriyössä pyrittiin saamaan selville, onko Meri-Porin voimalaitokselle mahdollista ja kannattavaa tehdä turbiinilaitoksen ylösajoa nopeuttavaa lämmitysjärjestelmää. Työ aloitettiin tutustumalla laitosprosesseihin, laitoksen kylmäkäynnistykseen, sekä tubiiniin ja sen toimintaan. Laitoksen henkilökunnalle tarkoitetuista opetusmateriaaleista sai hyvin tietoa. Laitoksella aikaisemmin tekemiäni kunnossapitotöiden ansiosta opetusmateriaali ja erilaiset prosessikaaviot olivat selkeämmin ymmärrettävissä.

Insinööriyössä tutkittavasta järjestelmästä on lähes mahdotonta löytää tietoa Internetistä tai alan kirjallisuudesta, joten vaihtoehdoksi jäi hankkia tietoa jostain Meri-Poria vastaavasta laitoksesta. Ruotsin esimerkkilaitoksesta tuli jonkin verran tietoa vastaavasta järjestelmästä yleisesti, mutta Meri-Porin laitokselle pitäisi tehdä omat tarkemmat tutkimuksensa ja laskelmansa projektin toteuttamiseksi.

Työssä on esimerkkinä virtaus- ja lämmönsiirtolaskuja. Massalaskujen laskemiseksi, pitäisi perehtyä syvemmin Meri-Porin voimalaitokselta kerättyyn faktatietoon. Työtä on mahdollista jalostaa eteenpäin, mutta se edellyttää useamman asiantuntijan perehtymistä aiheeseen.

8.2 Johtopäätökset

Johtopäätöksinä voidaan todeta, että turbiinilaitoksen käynnistystä nopeuttavan lämmitysjärjestelmän pystyy rakentamaan myös Meri-Porin laitokselle. Järjestelmän pystyy rakentamaan laitoksen tämänhetkisen Muntersin säilöntäjärjestelmän ympärille. Tarkat lämmitysjärjestelmän hyödyt, sekä investointien kannattavuus selviävät tarkemmilla tutkimuksilla ja tarkkoihin faktatietoihin pohjautuvilla laskelmilla.

Lämmitysjärjestelmän tarkempi analysointi edellyttää yhteistyötä Meri-Porin voimalaitoksen henkilökunnan ja laitetoimittajien välillä. Käyttöhenkilökunta voisi kerätä dataa turbiineilta yhdessä laitoksen insinöörien kanssa. Kun tarvittavat tiedot ovat käsitelty, voitaisiin laitetoimittajilta tiedustella eri vaihtoehtoja ja laskea niiden kannattavuutta taloudellisesta näkökulmasta.

Ruotsin esimerkkilaitos todisti sen, että hyvällä suunnittelulla laitoksen lämmitysjärjestelmän avulla voidaan tehdä sekä ajallisia että rahallisia säästöjä. Pitää kuitenkin kiinnittää huomiota esimerkiksi järjestelmän takaisinmaksuaikaan ja ylläpidon kustannuksiin.

Kun suuren lauhdelaitoksen ylösajon varoaikoja lyhennetään ja laitos pitäisi saada nopeasti tuottamaan sähköä verkkoon, on lämmitysjärjestelmä hyvä vaihtoehto laitoksen lämpimänäpitoon. Tällaiset järjestelmät ovat kuitenkin melko uniikkeja ja ne tulee räätälöidä kullekin laitokselle sopiviksi.

LÄHTEET

1. Fortum Oy:n kotisivut
<http://www.fortum.fi>
2. Fortumin Intranet – sivut
3. IVO Tuotantopalvelut Oy:n käyttöhenkilökunnan koulutusmateriaali
4. Höyrytekniikan kurssin monisteet (SAMK)
5. Modern Power Systemsin laitoskaavio
6. IVO Tuotantopalvelut Oy:n turbiinikoulutusohjeet
7. Belyea Power www-sivut
<http://www.belyeapower.com/assets/images/P1272547.jpeg>
8. Munters Oy:n www-sivut
http://www.munters.fi/upload/Related%20product%20files/MX2700_FI.pdf
9. M-Power UK www-sivut
<http://www.mpoweruk.com/images/turbines.gif>
10. Wikipedia commons www-sivut
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8b/Surface_Consider.png
11. Esimerkkilaitoksen lämmitysjärjestelmän koulutusmateriaali