

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Energia

Energiatekniikan koulutusohjelma

*Satu Komulainen*

## **VOIMALAITOKSEN KÄYTÖNAIKAISEN OPTIMOINNIN MÄÄRITTELY**

Työn tarkastajat:

Dosentti, TkT Juha Kaikko

Nuorempi tutkija, DI Jussi Saari

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
LUT Energia  
Energiatekniikan koulutusohjelma

Satu Komulainen

## Voimalaitoksen käytönaikaisen optimoinnin määrittely

Diplomityö  
2012

118 sivua, 36 kuvaa, 13 taulukkoa, 22 yhtälöä ja 2 liitettä

Tarkastajat: Dosentti, TkT Juha Kaikko  
Nuorempi tutkija, DI Jussi Saari

Hakusanat: voimalaitosprosessi, käytönaikainen optimointi, ennustava säätö, laitosmalli, kustannusfunktio

Tässä diplomityössä määritellään biopolttoainetta käyttävän voimalaitoksen käytönaikainen tuotannon optimointimenetelmä. Määrittelytyö liittyy MW Powerin MultiPower CHP –voimalaitoskonseptin jatkokehitysprojektiin. Erilaisten olemassa olevien optimointitapojen joukosta valitaan tarkoitukseen sopiva, laitosmalliin ja kustannusfunktioon perustuva menetelmä, jonka tulokset viedään automaatiojärjestelmään PID-säätimien asetusarvojen muodossa. Prosessin mittaustulosten avulla lasketaan laitoksen energia- ja massataseet, joiden tuloksia käytetään seuraavan optimointihetken lähtötietoina. Optimoinnin kohdefunktio on kustannusfunktio, jonka termit ovat voimalaitoksen käytöstä aiheutuvia tuottoja ja kustannuksia. Prosessia optimoidaan säätimille annetut raja-arvot huomioiden niin, että kokonaiskate maksimoituu. Kun laitokselle kertyy käyttöikä ja historiadataa, voidaan prosessin optimointia nopeuttaa hakemalla tilastollisesti historiadatasta nykytilanteen olosuhteita vastaava hetki. Kyseisen historian hetken katetta verrataan kustannusfunktion optimoinnista saatuun katteeseen. Paremman katteen antavan menetelmän laskemat asetusarvot otetaan käyttöön prosessin ohjausta varten. Mikäli kustannusfunktion laskenta eikä historiadatan perusteella tehty haku anna paranevaa katetta, niiden laskemia asetusarvoja ei oteta käyttöön. Sen sijaan optimia aletaan hakea deterministisellä optimointialgoritmeilla, joka hakee nykyhetken ympäristöstä paremman katteen antavia säätimien asetusarvoja. Säätöjärjestelmä on mahdollista toteuttaa myös tulevaisuutta ennustavana.

Työn käytännön osuudessa voimalaitosmalli luodaan kahden eri mallinnusohjelman avulla, joista toisella kuvataan kattilan ja toisella voimalaitosprosessin toimintaa. Mallinnuksen tuloksena saatuja prosessi-arvoja hyödynnetään lähtötietoina käyttökatteen laskennassa. Kate lasketaan kustannusfunktion perusteella. Tuotoista suurimmat liittyvät sähkön ja lämmön myyntiin sekä tuotantotukeen, ja suurimmat kustannukset liittyvät investoinnin takaisinmaksuun ja polttoaineen ostoon. Kustannusfunktiolle tehdään herkkyytarkastelu, jossa seurataan katteen muutosta prosessin teknisiä arvoja muutettaessa. Tuloksia vertaillaan referenssivoimalaitoksella suoritettujen verifiointimittausten tuloksiin, ja havaitaan, että tulokset eivät ole täysin yhteneviä. Erot johtuvat sekä mallinnuksen puutteista että mittausten lyhyehköistä tarkasteluajoista.

Automatisoidun optimointijärjestelmän käytännön toteutusta alustetaan määrittelemällä käyttöön otettava optimointitapa, siihen liittyvät säätöpiirit ja tarvittavat lähtötiedot. Projektiä tullaan jatkamaan järjestelmän ohjelmoinnilla, testauksella ja vireyksellä todellisessa voimalaitosympäristössä ja myöhemmin ennustavan säädön toteuttamisella.

# ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
LUT Energy  
Master's Degree Programme in Energy Technology

Satu Komulainen

## Definition of an Online Optimization Method of a Power Plant Process

Master's thesis  
2012

118 pages, 36 figures, 13 tables, 22 equations and 2 appendices

Examiners: Docent, D.Sc. (Tech.) Juha Kaikko  
Junior Researcher, M.Sc. (Tech.) Jussi Saari

Keywords: power plant process, online optimization, predictive control, plant model, cost function

This thesis defines a real-time optimization method of a biofuel power plant. The method definition is associated with the further development project of MW Power's Multi Power CHP power plant concept. For this purpose, a suitable optimization method is selected based on a plant model and a cost function. The results of the optimization are used in plant DCS by means of PID controllers' set points. The process measurement data is used to calculate the plant's energy and mass balances, the results of which are used as input data for the optimization of the next control period. Optimization objective function is a cost function, the terms of which are incomes and costs caused by the power plant operation. The process is optimized within the specified limits so as to maximize the overall profit. When more process data is collected in the course of time, the optimization process can be speeded up empirically. The system searches for a similar control period from the history data corresponding to the conditions of current state. The operating profit of this history moment is compared with the profit calculated from the cost function optimization. The method that gives better profit is introduced to control the process by giving the set points for each main controller. If neither the cost function calculation nor the history data search gives a better profit than the current moment, their set points are not imposed to the process. Instead, a deterministic optimization algorithm will be used for searching the optimum. The algorithm searches around the current environment for the set points that will give a better profit. It is also possible to implement a model predictive control system for the process control.

In the practical part of this thesis, the power plant model is created by two different modeling software. Other one is used for describing the boiler and other one for the power plant process. The modeling results are used as input data for the calculation of the operating profit. The profit is calculated by a cost function. The largest revenues of the cost function are associated with selling heat and power, and production subsidy, and the largest costs are related to the investment repayment and the purchase of fuel. A sensitivity analysis is done for the cost function. Process technical values are changed one by one, and at the same time the change in profit is monitored. The results are compared to the verification measurements carried at a reference power plant, and it is found that the results are not exactly the same. It can be concluded that the differences are due to deficiencies in the modeling and the short observing times of the measurements.

Practical implementation of the automated optimization method is initialized by defining the method, the associated control circuits and the necessary input data. The project will be continued by programming, testing and tuning the system in a real plant environment, and later by implementation of the predictive control.

## ALKUSANAT

Diplomityöni ja sitä edeltävä harjoittelun suoritin MW Power Oy:n toimistolla Vantaan Hakkilassa. Kuluneena vuotena olen oppinut valtavasti voimalaitoksen suunnittelusta, sen käytännön toiminnasta ja järjestelmistä, sekä sisäistänyt yliopistossa opiskelemiani asioita ammatilliseen käyttöön.

Työni valmistuessa kiitän MW Powerin työkavereitani ja varsinkin ohjaajaani Timo Aspelinia diplomityöni edistämisestä, suuntaviivojen luomisesta ja kaikenkattavista neuvoista, sekä 4HamCogenin voimalaitoksen henkilökuntaa avusta työni käytännön osuudessa.

Kiitän Lappeenrannan teknillisen yliopiston ohjaajiani Juha Kaikkoa ja Jussi Saarta työhöni liittyvistä rakentavista kommentteista sekä maan pinnalla pitämisestä.

Haluan kiittää myös muita opettajiani, yliopiston henkilökuntaa sekä edellisten harjoittelupaikkojeni työntekijöitä kaikesta siitä tietomäärästä ja kokemuksesta, joka minulle on tarjottu.

Valmistuessani kiitän perhettäni ja ystäviäni koko opiskeluaikani kestäneestä kannustuksesta ja tuesta sekä opiskelun vastapainotuksesta vapaa-ajalla.

Spécialement, je veux remercier Toi, ya Rzale deyalii, de tout ce que Tu est pour moi et de tout ce que Tu m'as donné pendant ces années.

Helsingissä 30.5.2012

Satu Komulainen

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	10
1.1 MW Power Oy yrityksenä .....	13
1.2 BioPower 8 prosessi.....	14
2 LAITOKSEN KÄYTÖNAIKAINEN OPTIMOINTI.....	17
2.1 Optimoinnin käsitteitä.....	17
2.1.1 Optimoinnin kohdefunktio.....	19
2.2 Deterministiset menetelmät.....	21
2.2.1 Lineaarinen sekalukuoptimointi .....	22
2.2.2 Dynaaminen optimointi .....	23
2.3 Satunnaisuuteen perustuvat menetelmät.....	24
2.3.1 Tilastollinen optimointi .....	24
2.3.2 Stokastinen optimointi.....	24
2.3.3 Sumea optimointi .....	26
2.4 Optimointisovellukset.....	26
2.4.1 Optimoinnin online- ja offline-mallit .....	27
2.4.2 Monitavoitteellinen optimointi .....	30
2.4.3 Voimalaitosyksiköiden välinen optimointi .....	32
3 ENNUSTAVA SÄÄTÖ.....	34
3.1 Säättöperiaate .....	35
3.2 Ennustavan säädön menetelmiä .....	40
3.3 Ennustavan säädön viritys.....	41
4 SOVELLUSKOHDDE JA OPTIMOINTIPERIAATE.....	44
4.1 Prosessin mittausjärjestelmä .....	44
4.2 Automaatio ja tiedonkeruu.....	45
4.3 Prosessidatan analysointi.....	48
4.4 Valittu optimointiperiaate .....	50
5 LAITOKSEN TOIMINNAN TEKNINEN KUVAUS .....	54
5.1 Prosessista laskettavat tunnusluvut .....	55

5.2	Rajoitteet .....	58
6	TAVOITEFUNKTIO JA SEN RATKAISU .....	59
6.1	Kustannusfunktio.....	61
6.2	Käytön optimointi sähkön ja lämmön myyntihinnan perusteella.....	67
6.3	Herkkyystarkastelu 1: tekninen malli vs. talousmalli.....	68
7	LAITOSMALLIN TODENTAMINEN .....	81
7.1	Herkkyystarkastelu 2: tekninen malli vs. vertailumittaukset .....	81
8	KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS.....	91
8.1	Optimointia varten tarvittavat tiedot .....	92
9	JATKOKEHITYS.....	97
9.1	Ennustavan säädön toteuttaminen .....	98
9.1.1	Höyryverkon hallintasovelluksen säätötapa.....	100
9.1.2	Ennusteiden teko .....	104
9.2	Palamisen hallinta.....	108
9.3	Dynaaminen simulointi .....	109
10	YHTEENVETO.....	111
	LÄHDELUETTELO .....	115

## LIITTEET

Liite 1: BioPower 8 pääprosessikaavio

Liite 2: Tursim-tasekuva

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### *Symbolit*

$E$	Energia	[MWh]
$h$	Askelluku	[-]
$k$	Ominaiskustannus	[Eur/MWh], [Eur/kg]
$K$	Kustannus	[Eur]
$P$	Teho	[MW]
$t$	Aika	[s], [h]
$z$	Suhdeluku	[%]
$\alpha$	Rakennusaste	[-]
$\eta$	Hyötysuhde	[%], [-]
$\phi$	Lämpöteho	[MW]

### *Alaindeksit*

br	Brutto
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
con	Ohjaushorisontin alaindeksi
Hö	Höyry
Inv	Investointi
Katt	Kattila
Kikut	Kiinteät kustannukset
Kust	Kustannukset
Kok	Kokonais-
Lä	Lämpö
max	maksimi, yläraja

min	minimi, alaraja
Mukut	Muuttuvat kustannukset
net	Netto
Ok	Omakäyttö (-sähköteho)
Pa	Polttoaine
pred	ennuste, prediction
Sä	Sähkö
Tuhö	Tuorehöyry

### ***Lyhenteet***

ACN	Prosessinohjaintyyppi
BFB	Kerrosleijukattila, bubbling fluidized bed boiler
BP8	BioPower 8, eräs MW Powerin standardivoimalaitos
CHP	Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantolaitos, combined heat and power
CV	Ohjatut muuttujat, controlled variables
DCS	Automaatiojärjestelmä, distributed control system
DMC	Dynaaminen matriisisäätö, Dynamic Matrix Control
DNA	Dynaaminen sovellusverkko, Dynamic Network of Applications
DV	Häiriömuuttujat, disturbance variables
EHAC	Laajennetun horisontin mukautuva säätö, Extended Horizon Adaptive Control
EPSAC	Laajennettu ennustava itsestään mukautuva säätö, Extended Prediction Self-adaptive Control
FBB	Leijupolttokattila, fluidized bed boiler
GPC	Yleistetty ennustava säätö, Generalized Predictive Control
Info	Information System
luvo	Ilman esilämmitin, Luftvorwärmer
M	Mittaus, measurement
MAC	Mallialgoritminen säätö, Model Algorithmic Control



me	Mittaus, measurement
MILP	Sekalukuoptimointi, mixed integer linear programming
MPC	Mallipohjainen ennustava säädin, Model Predictive Controller
MV	Toimisuureet, manipulated variables
O	Ohjaus, operation
PID	Proportional integral derivative (-säädin)
PBD	Power Boiler Designer, kattilan mallinnusohjelma
PFC	Ennustava toiminnallinen säätö, Predictive Functional Control
PLC	Programmable logic controller
S	Asetusarvo, setpoint
SOLO	Vaiheittainen avoimen piirin optimointi, sequential open loop optimization
sp	Asetusarvo, setpoint
SQL	Structured query language
WSI	Tiedonhakupalvelu, web service interface

# 1 JOHDANTO

Energiantuotanto on strateginen ala teollisuudessa tekniseltä ja taloudelliselta kannalta, ja sen tärkeys on jatkuvasti kasvussa energiankulutuksen lisääntyessä. Voimalaitosten tuotannossa pyritään mahdollisimman suureen energiatehokkuuteen, minkä vuoksi uusia prosessiratkaisuja kehitetään kokonaistaloudellisuuden kannalta tuottavammiksi. Kulutetun polttoaineen energia halutaan muuntaa hyödynnettävässä muodossa olevaksi energiaksi hyvällä hyötysuhteella, hyvällä katteella ja häviöitä karttaen. Lisäksi energiantuotantoon kiinnitetään nykyään erityistä huomiota ilmastokysymysten sekä eri polttoaineiden hankintatapojen ja saatavuuden vuoksi.

Modernin lämpövoimalaitoksen sähköntuottohyötysuhde on noin 30 – 40 %. Yhteistuotantolaitoksen kokonaishyötysuhde voi olla jopa yli 90 %. Kun voimalaitoksella otetaan käyttöön jokin optimointimenetelmä, polttoainekustannukset ja ympäristöjäte vähenevät keskimäärin 3 – 10 %. Samalla voimalaitoksen hyötysuhde kasvaa 1 – 4 %. Suuressa mittakaavassa katsottuna energian tuotannon, siirron ja jakelun optimointi on tärkeä talouteen vaikuttava haaste, joka vaikuttaa energiayhtiöiden kilpailukykyyn ja jopa valtioiden kehitykseen. Seuraava suuri yhteiskunnallinen askel energiatehokkuuden saralla olisi asiakkaiden energiankulutuksen optimointi. (Keel ja muut 2009, s. 3 - 14)

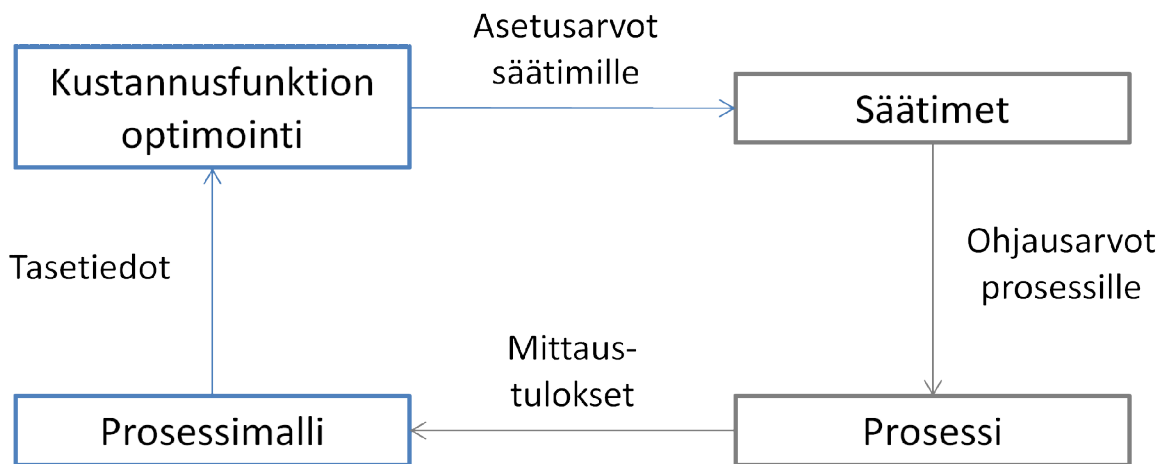
Voimalaitoksen tärkeimmät optimoinnissa käytettävät kriteerit ovat polttoainekustannuksen minimointi, polttoaineesta riippuvaisten kulujen, kuten ympäristömaksujen minimointi, suunniteltujen investointien ja käyttökulujen minimointi sekä voiton maksimointi. Optimointi tapahtuu neljän vaiheen kautta (Keel ja muut 2009, s. 15 - 16), joita tässäkin työssä sovelletaan:

1. Optimointiongelman muotoileminen matemaattisesti: optimoinnin kohdefunktion määrittäminen, säädettävien muuttujien valitseminen, optimaalisen ratkaisun rajoitteiden valitseminen sekä lähtötietojen alkuperän ja muodon määrittäminen.
2. Optimaalisten olosuhteiden määrittely ratkaisua varten.
3. Ratkaisumenetelmän valinta ja sopivien algoritmien käyttö.
4. Optimaalisen ratkaisun hakeminen.

Työn taustalla viitekehyksenä on MW Power Oy:n MultiPower CHP –voimalaitoskonseptin jatkokehitysprojekti, jonka tavoitteena on päästä hyödyntämään laitoksen historian aikana kertyvää prosessidataa älykkäästi. Vanhassa mallissa prosessidataa tarkastellaan vain satunnaisesti, esimerkiksi häiriötilanteiden syiden selvitystä varten. Prosessidataa voidaan hyödyntää älykkäästi niin, että tarvittua tietoa haetaan automaattisesti, siitä lasketaan vertailtavissa olevia tunnuslukuja ja kertyneen tiedon perusteella prosessia ajetaan entistä paremmin. Myös tämä prosessin historiadataan perustuva oppiminen ja sitä kautta tapahtuva uusien asetusarvojen hakeminen säätimille ovat automatisoitavissa, jolloin säätöjärjestelmää ohjataan käytön aikana joka hetki kohti kokonaisvaltaista optimia. Laitoksen tase- ja tunnuslukulaskennan määrittely on jo tehty ennen tätä diplomityötä. Tämän työn tavoitteena on määrittellä optimointimenetelmä, joka hyödyntää prosessin historiadataa, tietoja voimalaitoksen käytönaikaisista kassavirroista sekä matemaattista tuotannon optimointimenetelmää.

Alun kirjallisuusselvityksessä käydään läpi erilaisia tuotannon optimoinnin vaihtoehtoja, joita tähän asti on kehitetty. Osa vaihtoehtoista on selvästi teoreettisempia ja osa taas suoraan suunnattu tiettyyn käytännön kohteeseen. Alalla tehty tutkimus on johtanut hyvin mielenkiintoisiin teorioihin, joissa ratkaisua etsitään perinteiseen tapaan paikallisesti lähtökohdan ympäristöstä tai uudempia matemaattisia metodeja käyttäen kokonaisvaltaisesta näkökulmasta. Optimointia voidaan tehdä erilaisilla aikaväleillä, lyhyin hetkin päivittyvästä käytönaikaisesta optimoinnista pitempien aikavälien tuotannon suunnitteluun. Näiden läpikäytyjen mahdollisuuksien pohjalta valitaan tähän tapaukseen sopivat teoriat, joita soveltamalla saadaan tekniset ja taloudelliset näkökohdat yhteen saattava kokonaisuus.

Kuvassa 1 on yksinkertaistettu periaatekaavio kehitettävästä optimointi- ja säätöjärjestelmästä. Prosessin mittaustuloksista lasketaan voimalaitoksen tase prosessimallin määrittelyn mukaan, ja lasketut tasetiedot viedään kustannusfunktioon. Tuotot ja kustannukset huomioiva kustannusfunktio optimoidaan ympäristön olosuhteet ja muut reunaehdot huomioon ottaen, ja tuloksena saadaan käyttökatteen lisäksi prosessin säätimille uudet asetusarvot. Säädestä tulevien ohjausarvojen perusteella prosessia ohjataan seuraavan minuutin ajan, joka on valittu optimoinnin perusajanjaksoksi.



**Kuva 1.** Prosessin optimointi- ja säätöjärjestelmän periaatekaavio.

Tutkimusmetodina työn käytännön osuudessa on herkkyysanalyysi, jossa tarkastellaan yksittäisten prosessimuutosten vaikutusta koko prosessiin ja tuotannosta syntyvään käyttökatteeseen. Muutoksia seuraamalla löydetään helposti kulloinkin tarkasteltavan prosessisuureen arvo, jolla kate maksimoituu raja-arvojen sisällä. Huomioimalla säätimien keskinäinen hierarkia ja yhdistämällä optimaaliset säätöjen asetukset toisiinsa päästään parhaaseen mahdolliseen käyttökatteeseen. Todellisessa prosessissa on kuitenkin koko ajan runsaasti muuttuvia tekijöitä, joten optimitilanteeseen pyrkimisestä tulee säädölle jatkuva tila.

Kehitettävää optimointijärjestelmää ei päästä vielä tämän diplomityön puitteissa testaamaan käytännössä, koska sopivaa uutta voimalaitosprojektia ei juuri työn tekohetkellä ole suunnitella. Siispä työn laajuus ei vielä sisällä järjestelmän implementointia todelliseen kohdeympäristöön, vaan ainoastaan sen suunnittelun ja jatkokehityksen määrittelyn. Sen sijaan herkkyystarkasteluun liittyviä verifiointimittauksia tehtiin olemassa olevalla MW Powerin toimittamalla 4HamCogenin laitoksella Hamissa (Ham) Belgiassa.

Tuotannon ja kannattavuuden optimoinnin ohella muita tärkeitä kehityskohteita voimalaitoskonseptissa ovat esimerkiksi huollon optimointi ja säädön optimointi, jossa tarkistetaan laitteiden mitoitus sekä säätimien oikeat alueet. Nämä säätö- ja huoltokohteet on kuitenkin rajattu tämän työn ulkopuolelle. Lähteinä työssä on käytetty yleisen matemaattisen kirjallisuuden sekä tehtyjä tutkimuksia selittävien artikkelien ja seminaarijulkaisujen lisäksi yrityksen sisäisiä lähteitä. Metson ja MW Powerin sisäistä materiaalia on käytetty lähinnä kuvailemaan työn viitekehystä sekä selvittämään, millaisiin olemassa oleviin prosessinkäsittelytyökaluihin nyt kehitettävä optimointijärjestelmä voidaan yhdistää.

## 1.1 MW Power Oy yrityksenä

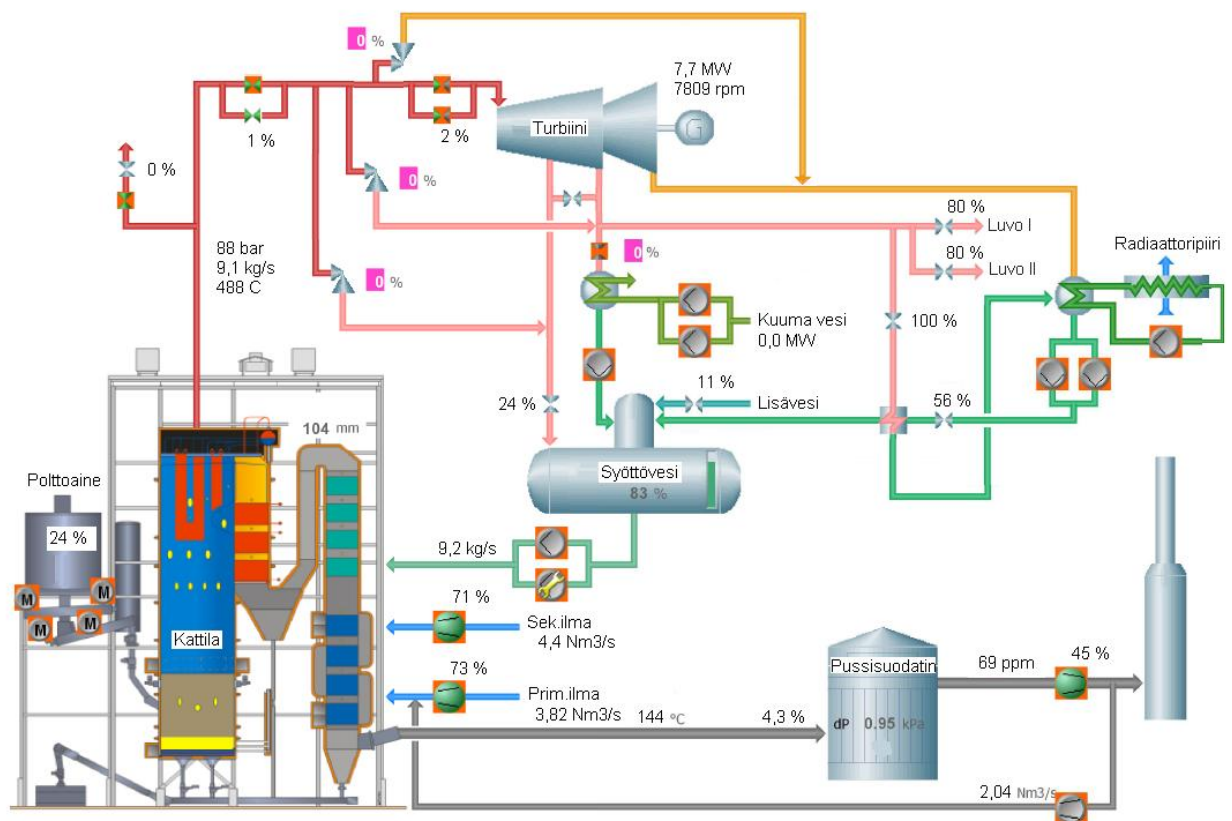
MW Power Oy on Metso Oyj:n (60 %:n omistus) ja Wärtsilä Oyj:n (40 %:n omistus) yhteisyri-  
tys, joka kehittää ja valmistaa pieniä ja keskisuuria, lähinnä biopolttoaineita, mutta edelleen  
myös fossiilisia polttoaineita hyödyntäviä lämpö- ja voimalaitoksia sekä tarjoaa niihin liittyviä  
huoltopalveluja. Yhteisyritys perustettiin vuonna 2009 ja sen pääasiallisia asiakkaita ovat  
kunnat, laitokset, itsenäiset energiantuottajat sekä prosessiteollisuus. Jatkuva tuotekehitys  
on oleellinen osa yrityksen toimintaa. Yrityksen pääasiallisena markkina-alueena on perintei-  
sesti ollut Pohjois-Eurooppa ja Venäjä, mutta laajentuminen Keski- ja Itä-Euroopan markki-  
noille on jo alkanut. (MW Power 2012a, MW Power 2011c) Suomessa MW Power toimii Van-  
taalla (entinen MW Biopower Oy), Turussa (entinen Noviter Oy) ja Kiuruvedellä (entinen  
Sermet Oy). Lisäksi yritys toimii Ruotsissa nimellä MW Power AB (entinen VEÅ AB) ja Viros-  
sa nimellä Oü Noviter Eesti.

MW Powerin omistajat ovat kumpikin suuria, monikansallisia yhtiöitä. Metso on kestävä  
teknologian tuottaja, joka toimii energia-, sellu- ja paperi-, automaatio-, kaivos- ja rakennus-  
teollisuuden toimialoilla. Metsolta on peräisin MW Powerin vahva osaaminen kerrosleijukatti-  
lateknologiassa. Wärtsilä tuottaa meri- ja energia-aloille koko elinkaaren mittaisia energian-  
tuotantoratkaisuja. Wärtsilältä on peräisin voimalaitosten modularisointiajattelu sekä pyörivän  
kekoarinan teknologia. (MW Power 2012a, MW Power 2011c)

Viisi tuotetta, joita MW Power tarjoaa, ovat BioPower, MultiPower, BioHeat, Oil&Gas ja Ser-  
vices. Modulaarisia, standardoituja BioPower-voimalaitoksia on kokoluokassa 3 - 10 MW<sub>Sä</sub>.  
Polttotekniikkaratkaisut ovat BioGrate- pyörivä kekoarina- ja BFB-kerrosleijukattila. Tämän  
työn lähtökohtana on nimellissähköteholtaan 10-megawattinen BP8-voimalaitos, jonka poh-  
jalta kehitetään MultiPower CHP -voimalaitoskonseptia ja sen prosessin optimointia. Multi-  
Power-laitokset ovat keskisuuren kokoluokan 10 – 60 MW<sub>Lä</sub> sähköä ja lämpöä tuottavia, asi-  
akkaan tarpeen mukaan räätälöityjä kiinteän polttoaineen BFB-kattilalaitoksia. BioHeat on  
pieni, kekoarinakattilalla varustettu kuumaa vettä tai höyryä tuottava biolämpölaite kokoluo-  
kassa 4 – 18 MW<sub>Lä</sub>. Oil&Gas-laitokset ovat nimensä mukaisesti öljyä ja kaasua hyödyntäviä  
kattilalaitoksia, joissa kattilatyypinä on vesiputki- tai tulitorvi-tuliputkikattila. Services on  
huoltopalvelu, joka kattaa niin varaosat kuin laajat elinkaaren mittaiset huoltosopimuksetkin.  
(MW Power 2011c)

## 1.2 BioPower 8 prosessi

MW Powerin kerrosleijukattilaan ja väliottoturbiiniin perustuva BioPower 8 on pienen kokoluokan yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantolaitos. Sen yksinkertaistettu kaavio on esitetty kuvassa 2 ja hieman yksityiskohtaisempi päävirtauskaavio liitteessä I. Höyryvoimalaitoksen mallinnusohjelmalla tehty tasekuva on liitteessä II.



Kuva 2. BioPower 8 yksinkertaistettu prosessikaavio (kuvaa muokattu). (MW Power 2011b)

Prosessiin tulevat seuraavat massa- ja energiavirrat:

- Kiinteä biopolttoaine
- Nestemäinen tai kaasumainen apupolttoaine
- Petihiekka
- Palamisilma
- Lisävesi
- Vedenkäsittelykemikaalit

Prosessista poistuvat seuraavat massa- ja energiavirrat:

- Sähköenergia myyntiin
- Kuuma vesi, kuten kaukolämpö, myyntiin
- Mahdollisesti prosessihöyry myyntiin
- Savukaasut
- Tuhka
- Ulospuhallettu vesi, jätevesi
- Höyry starttiventtiilin kautta
- Lämpö radiaattorijäähdyttimien kautta ja muut lämpöhäviöt

### ***Kattilatekniikka***

Kattilassa käytetään normaalisti kiinteää biopolttoainetta kuten metsähaketta, ja polttoainete-ho on noin 32 MW. Kattilan kerrosleijuarinan pohjalla on vesijäähdytteiset ilmapalkit (HY-BEX™), joiden kautta johdetaan leijutuskaasu eli primääri-ilman ja kiertokaasun seos pri-määri-ilmasuuttimille. Hiekka ja polttoaine tulevat kattilan seinissä olevien syöksytorvien kautta. Leijukerroksen lämpötila on yleensä 800 – 850 °C, mutta polttoaineen laadusta ja muista palamisolosuhteista riippuen se voi vaihdella noin sata astetta suuntaan tai toiseen. Tuhkaa ja leijutushiekkaa poistetaan arinan läpi tuhkanpoistoaukoista ilmapalkkien välistä. Ylösajo- ja häiriötilanteita varten kattilan kylkeen on asennettu myös öljy- tai kaasukäyttöiset startti- ja kuormapolttimet.

### ***Kattilan vesi-/höyrykierto***

Luonnonkiertokattilassa vesi kiertää perustuen sen nestemäisen ja kaasumaisen olomuodon tiheyseroihin. Syöttövesi tulee syöttövesipumpuilta ensin ekonomaiserille, jossa se esilämmitetään savukaasuilla. Pumpuilla tuotetun paineen ansiosta lämmitetty vesi nousee ylös lieri-öön, jossa vallitsee kylläinen paine ja lämpötila. Vesi erottuu säiliön alaosaan ja höyry sen yläosaan.

Lieriön pohjasta laskuputket johtavat veden tulipesän ja toisen vedon seinien alakammioille ja niistä edelleen alakiertoputkilla kattilan seinien membraaniputkille, joissa tapahtuu veden kiehuminen ja höyrystyminen. Tulipesän alaosa on massattu oikean palamislämpötilan saavuttamiseksi ja seinäputkien eroosion estämiseksi. Tulipesän höyrystinputkien pääasiallinen lämmönsiirtomuoto on säteily, ja savukaasukanavassa sijaitsevilla höyrystinputkilla sekä muilla putkipaketeilla se on konvektio. Höyry nousee putkissa tiheyseron vuoksi takaisin lieriöön.

Lieriöstä höyry viedään tulistimille ensin kattilan kakkosvetoon ja siitä järjestyksessä niin, että viimeinen eli kolmas tulistinvaihe on tulipesän päällä, missä savukaasu on kuuminta. Tulistuksen lämpötilaa säädetään ruiskutusten avulla. Tulistusvaiheiden välillä on ruiskutussuuttimet, joihin tuodaan syöttövettä. Tulistettu, oikealla lämpötila-alueella oleva höyry viedään turbiinille. Höyryn normaalit käyttöarvot BP8-voimalaitoksessa kattilan jälkeen ovat 93 bar(a), 505 °C ja 10,6 kg/s.

### ***Prosessin vesi-/höyrykierto***

Tuorehöyrylinjasta höyry viedään normaalisti turbiinille, mutta se tai osa siitä voidaan myös johtaa reduktioventtiilien kautta turbiinin ohi esimerkiksi käynnistyksen aikana tai häiriötilanteissa. Omakäyttöreduktio johtaa syöttövesisäiliöön ja lämmöntuotannon reduktio kuumavesilämmönsiirtimelle, mikä varmistaa kaukolämmön tuotannon turbiinin häiriötilanteissa. Turbiinin ohitusreduktio johtaa lauhduttimelle.

Turbiinilla höyry paisuu lauhduttimen alipaineeseen, jota pidetään yllä radiaattorein eli jäähdytyspuhaltimin jäähdytetyllä pääjäähdytyskierrolla. Puhaltimet pyörivät sähkömoottorien avulla ja ne sijaitsevat radiaattorikentässä. Generaattorilta saatu sähköteho on 9,9 MW<sub>sä</sub>. Turbiinilta otetaan kaksi väliottoa, joista ensimmäinen on säätämätön ja johtaa omakäyttöreduktion tavoin syöttövesisäiliölle. Toinen on säädetty väliotto ja vie normaalissa ajotilanteessa kaukolämmönsiirtimelle, palamisilman esilämmittimille (höyryluvoille) ja lauhteen matalapaine-esilämmittimelle. Kuumavesilämmönsiirtimen ja lauhduttimen lauhteet pumpataan syöttövesisäiliölle, mistä syöttövesi pumpataan jälleen kattilaan.



## 2 LAITOKSEN KÄYTÖNAIKAINEN OPTIMOINTI

Tässä diplomityössä kehitetään voimalaitosprosessin käytönaikainen tuotannon optimointimenetelmä. Yleisesti ottaen tuotantoa voidaan optimoida tehon, hyötysuhteen tai kannattavuuden suhteen. Jälkimmäiseen vaihtoehtoon liittyvät olennaisesti polttoaineen ja tuotettavien energiamuotojen hinnat. Käytännön optimointitehtävään kuuluu myös herkkyyshanalyysi, jossa tarkastellaan eri muuttujien vaikutuksen suuntaa ja suuruutta lopputuloksiin.

Kirjallisuusselvityksenä tässä luvussa käsitellään aiheeseen liittyvää teoriaa vaihtoehtoisten prosessin optimointiratkaisujen läpikäymiseksi. Osa annetuista esimerkeistä on teoreettisempia ja osa käytännönläheisempiä. Ratkaisualgoritmien perusrakenteeseen kuuluvat annetut alkuarvot, laitoksen toimintaa kuvaava malli sekä laskennasta saatavat tulokset. Käytönaikaisuus ilmenee siten, että optimointilaskentaa tehdään käytössä olevalle laitokselle tietyin määraajoin, ja laitosta ohjataan tai on mahdollista ohjata saatujen tulosten perusteella. Kyse siis ei ole vain kertaluontoisesta laitoksen suunnitteluun liittyvästä prosessin optimoinnista vaan reaaliajassa tapahtuvasta parempaan prosessin tilaan pyrkimisestä.

Voimalaitosprosessin optimointiin voidaan periaatteessa soveltaa samoja menetelmiä kuin muihinkin suuriin ja monimutkaisiin kohteisiin, mutta kuitenkin on huomioitava laitostyyppin erityispiirteet. Biopolttoaineita käyttävässä höyryvoimalaitoksessa erityistä on polttoaineen laatuun sekä palamiseen liittyvä epävarmuus ja vaihtelu, joka vaikuttaa suoraan tuorehöyryn arvojen tasapainoon ja pysyvyyteen. Siksi prosessia tasaannuttavat säätö- ja optimointiratkaisut ovat erittäin tärkeitä.

### 2.1 Optimoinnin käsitteitä

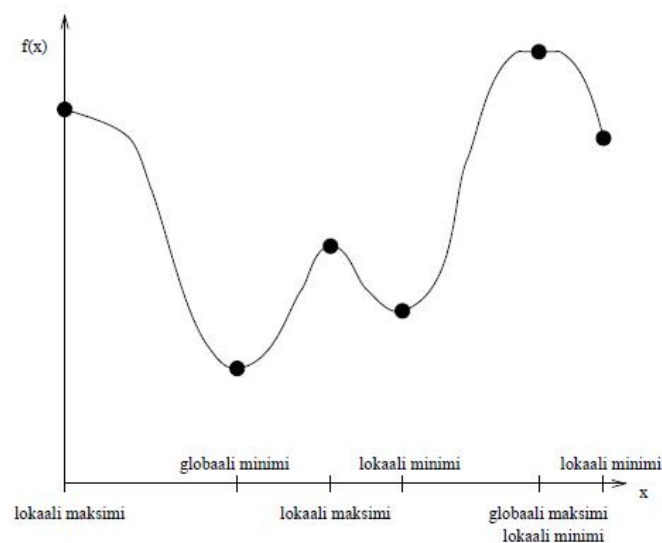
Optimointi tarkoittaa määritellyn kohdefunktion maksimointia tai minimointia täyttäen samalla asetetut rajoitteet. Asiakkaiden tarpeiden ja kasvavan kilpailun vuoksi pelkästään kannattava ratkaisu ei ole läheskään aina riittävä, vaan ratkaisun on oltava paras mahdollinen. Prosessissa tai sen ajotavassa pienetkin muutokset voivat pitkällä aikavälillä johtaa merkittäviin säästöihin. (Belegundu ja Chandrupatla 1999, s. 1)

Optimointiin on kehitetty lukuisia teorioita ja ratkaisualgoritmeja. Käytännön optimointiongelmat vaativat viritystä, aluesovitusta eli skaalausta ja olemassa olevien tekniikoiden muokkaamista tiettyyn sovellukseen sopivaksi. Usein on kokeiltava eri optimointitapoja parhaaseen lopputulokseen pääsemiseksi. (Belegundu ja Chandrupatla 1999, s. 1)

Suurin osa teknisistä ongelmista liittyy rajoitettuun minimointiin. Rajoitteet johtavat epälineaariseen optimointiin, jossa ne esitetään muodossa ”suurempi kuin”, ”pienempi kuin” tai ”yhtä suuri kuin”. Rajoitteet ovat päätösmuuttujien funktioita, samoin kuin optimoinnin kohteena oleva kohde- tai kustannusfunktio. (Belegundu ja Chandrupatla 1999, s. 3)

Vain yksinkertaiset lineaariset ongelmat on helppo ratkaista manuaalisesti. Käytännössä monimutkaiset lineaariset ja kaikki epälineaariset optimointitehtävät ratkaistaan tietokoneilla numeerisesti eli käyttäen likimääräisiä arvoja jollakin laskentatarkkuudella. Toisaalta optimointimenetelmät voidaan jakaa myös deterministisiin ja satunnaisuuteen perustuviin, ja näihin pääryhmiin kuuluvia menetelmiä käsitellään seuraavissa luvuissa.

Yksinkertaisissa tapauksissa optimoinnilla haetaan paikallista eli lokaalia minimiä (kuva 3), mikä onnistuu helposti perinteisillä menetelmillä. Lokaali minimi löytyy esimerkiksi derivaatan nollakohdan avulla tai alkuarvauksen perusteella iteratiivisesti. Sen sijaan globaalin minimin, joka on pienin paikallisista minimeistä, hakeminen on huomattavasti haasteellisempaa, ja siihen käytetäänkin satunnaisuuteen perustuvia menetelmiä. Jos koko ongelma on muodoltaan konvekksi, lokaali minimi on samalla myös globaali minimi, mutta aina tätä yhtäläisyyttä ei voida osoittaa. (Haataja 2004, s. 34 ja 154)



**Kuva 3.** Globaalit ja lokaalit minimit ja maksimit. (Jyväskylän yliopisto)

### 2.1.1 Optimoinnin kohdefunktio

Optimointiongelman ratkaisu sisältää seuraavat vaiheet (Haataja 2004, s. 17 - 18):

1. Alkuperäinen tieteellinen tai teknillinen ongelma
2. Ongelman pohjalta muodostettu matemaattinen malli
3. Optimointitehtävän muodostaminen
4. Ratkaisumenetelmän valinta
5. Ensin yksinkertaistetun, sitten koko optimointitehtävän ratkaisu ja tulosten tarkistus, mallin toimivuuden tarkistus
6. Herkkyysanalyysi annetun mallin syöttödatan suhteen
7. Mallin riittävyyden tarkistus alkuperäisen ongelman perusteella

Mikäli tulokset eivät ole riittävän hyvät tai tarkat, palataan lähtöpisteeseen ja arvioidaan tarvittava malli, ratkaisumenetelmä ja –tarkkuus uudelleen.

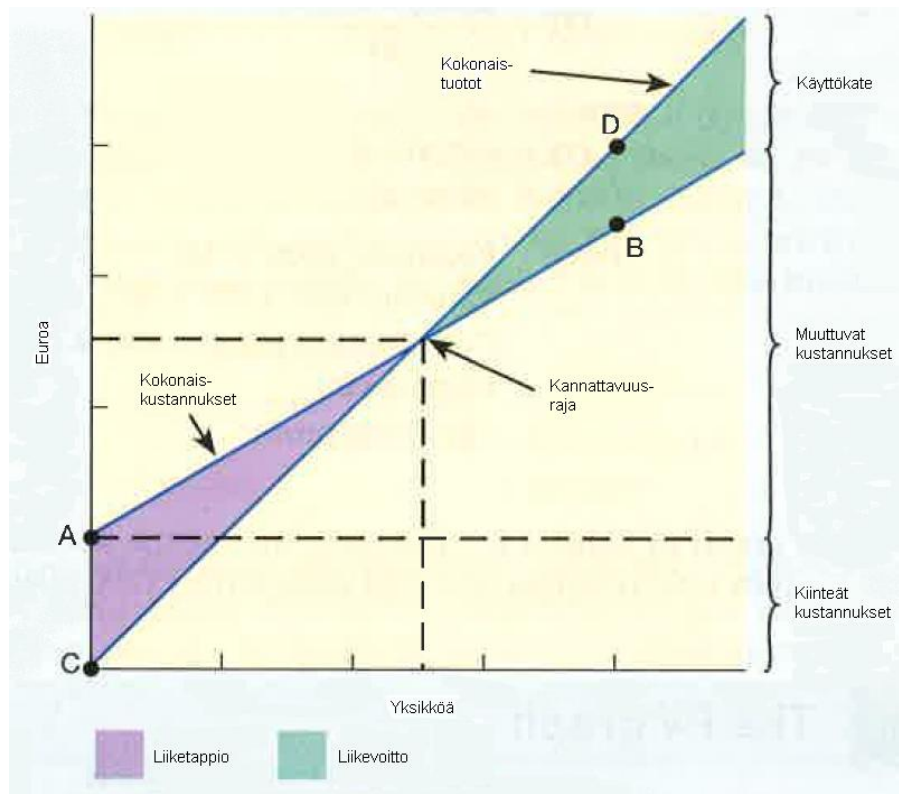
Teollisuudessa usein, kuten tämänkin työn tapauksessa, pääasiallinen optimoitava tekijä on tuotantotoiminnasta syntyvä kate. Tällöin optimoinnin kohdefunktio eli kustannusfunktio on muotoa (Bhimani ja muut 2008, s. 245):

$$\text{Käyttökate} = \text{Tuotot} - \text{Muuttuvat kustannukset} - \text{Kiinteät kustannukset}, \quad (1)$$

eli optimointitehtävä on muotoa

$$\text{MAX}(K_{\text{Kate}}) = K_{\text{Tuotot}} - K_{\text{Mukut}} - K_{\text{Kikut}} \quad (2)$$

Tuotto- ja kustannuskaavio on esitetty kuvassa 4. Tuotannon kannattavuusraja on siinä pisteessä, jossa kokonaistuottojen ja –kustannusten käyrät leikkaavat (break-even point). Vaaka-akselilla voisi voimalaitostapauksessa olla esimerkiksi energia ja yksikkönä megawattitunti. Pisteessä A huomioidaan pelkät kiinteät kustannukset, sillä siinä ei ole vielä tuotettu yhtään yksikköä. Tuotto on nolla (piste C). Kaavion violetilla alueella tuotanto on käynnissä, mutta se on vielä tappiollista, eli kustannukset ovat tuottoja suuremmat. Vihreällä alueella ollaan jo kannattavassa tuotannossa, sillä tuotot (piste D) ovat suuremmat kuin tuotannosta aiheutuvat kustannukset (piste B). (Bhimani ja muut 2008, s. 244 - 245)



**Kuva 4.** Tuotto- ja kustannuskaavio (kuvaa muokattu). (Bhimani ja muut 2008, s. 245)

Lähde (Hashemi 2009) esittää kustannusfunktion yhdistetyn sähkön, lämmön ja jäähdytyksen tuotannolle. Tarkoituksena on päivittäisen tuotantokatteen maksimointi. Riippuen kustannustermien sisällöstä funktiossa huomioidaan tai ei huomioida esimerkiksi polttoaine- tai kiinteitä kustannuksia. Katteen funktiossa on huomioitu seuraavat termit (Hashemi 2009, s.224):

Tuotot:

- Pätösähkön myyntituotto, verkkoon
- Loissähkön myyntituotto, verkkoon
- Pätösähkön myyntituotto, paikallinen asiakkaan sähkökuorma
- Loissähkön myyntituotto, paikallinen asiakkaan sähkökuorma
- Lämmön myyntituotto
- Jäähdytyksen myyntituotto

Kustannukset:

- Tehomaksu
- Omakäyttösähkötustannus
- Päätösköön ostokustannus, verkosta (oman sähköntuotannon ollessa alhaalla)
- Loissähkön ostokustannus, verkosta
- CHP-sähkön tuotantokustannus
- CHP-lämmön talteenottokustannus
- Varakattilalla tuotetun lämmön kustannus
- Absorptiojäähdyttimellä tuotetun kylmän kustannus
- Lämmön varastointi- ja siirtokustannus – tehonhallintakustannus

Lähteessä (Tulokas 2002) kehitetyssä CHP-laitoksen optimoinnin kohdefunktiossa maksimoidaan laitoksesta saatavaa hyötyä. Uuden voimalaitoksen tarkoituksena on tuottaa sähköä ja lämpöä niin, että asiakkaalle tulee kustannussäästöjä. Säästöä tulee siitä, ettei sen enää tarvitse ostaa sähköä verkosta eikä tuottaa lämpöä vanhoilla lämminvesikattiloilla. Funktio sisältää seuraavat termit (Tulokas 2002, s. 39 - 41):

- CHP-laitoksen käytöllä säästetty paikallinen sähkönostokustannus
- Säästetty sähkösiirtokustannus
- Säästetty sähkövero
- Säästetty lämmöntuotantokustannus
- Säästetty sähkösiirtohäviö
- Sähkösiirtotulo sähköyhtiön taseeseen
- Muuttuvat kustannukset

## 2.2 Deterministiset menetelmät

Perinteisiä deterministisiä eli ei-satunnaisuuteen perustuvia optimointimenetelmiä ovat esimerkiksi lineaarinen menetelmä, Newtonin menetelmä, gradienttimenetelmä (steepest ascent / descent method) ja konjugaattigradienttimenetelmä. Näiden ongelma on kokonaisvaltaisen tilanteen hahmottamisen puute, eli näillä menetelmillä löydetään kyllä nopeasti tulos, mutta tulos saattaa olla jokin paikallinen optimi, ei kokonaisoptimi. Tulokset eivät myöskään

välttämättä ole täysin luotettavia, jos tavoitefunktiossa on epäjatkuvuutta tai kohinaa eli sessiarvojen satunnaisheilahtelua. Seuraavaksi käsitellään lineaarista sekalukuoptimointia ja dynaamista optimointia, joita koskee tämä sama ongelma.

### 2.2.1 Lineaarinen sekalukuoptimointi

Lineaarista optimointia käytetään hyvin vähän voimalaitoskokoluokan sovelluksissa menetelmän rajoitteiden vuoksi. Lähteessä (Eskelinen 1999) esitetään kuitenkin voimalaitoksen käyttötalouden optimointia lyhyellä aikavälillä stationääritilan lineaarisilla yhtälöillä. Kyseessä on kaasuturbiinin ja lämmön talteenottokattilan sisältävä prosessi. CHP-voimalaitosprosessin malli sisältää epäyhtälörajoitteita lämmön ja sähkön tuotannolle, yhtäsuuruusrajoitteita jokaisen alisysteemin massa- ja energiataseille sekä päätösmuuttujia. Optimoinnissa käytetään sekalukuoptimointia (mixed-integer linear programming MILP). MILP-malli sisältää satoja rajoitteita ja muuttujia, joista osa on binäärisiä. (Eskelinen 1999, s. 72 - 73)

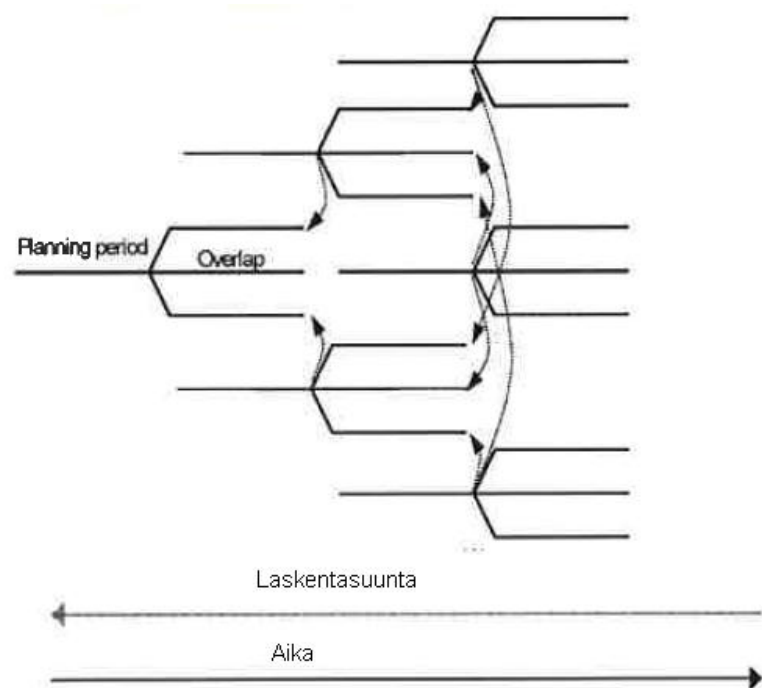
Optimointitehtävän kohdefunktio on voimalaitoksen kassavirtafunktio, joka maksimoidaan lyhyellä aikavälillä, eli muutamasta tunnista muutamaan viikkoon. Optimaalinen ajotapa johdetaan erilaisissa olosuhteissa riippuen tehontarpeesta ja ympäristöolosuhteista. Herkkyyksianalyysillä huomioidaan tärkeiden parametrien vaikutus parhaaseen ratkaisuun. Tarvittavat ennusteet määritellään. Ratkaisuna ongelmaan saadaan kysytyn sähkön ja lämmön tuottamiseen tarvittavan minimienergiämäärän hinta, optimaalinen tehon jakautuminen eri laitoksen komponenttien välillä sekä sähkön ja lämmön tuotannon marginaalikustannukset. (Eskelinen 1999, s. 73)

Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että vaikka suuret käytännön optimointiongelmat ovatkin lähes aina epälineaarisia, voidaan lineaarista mallia kuitenkin niissäkin toisinaan hyödyntää. Osa epälineaarisista ongelmista voidaan nimittäin linearisoida siten, että epäyhtälörajoitteet muutetaan yhtäsuuruus- ja erisuuruusehdoiksi täyte- ja ylijäämämuuttujilla (slack and surplus variables). Lineaarinen optimointitehtävä voidaan ratkaista esimerkiksi simplexmenetelmällä. (Belegundu ja Chandrupatla 1999, s. 92 - 96)

## 2.2.2 Dynaaminen optimointi

Dynaaminen optimointi on eräs epälineaarinen optimointitapa. Dynaaminen optimointitehtävä perustuu toisistaan erotettaviin vaiheisiin (stage). Kussakin vaiheessa optimaalista vastetta varten tarvittavat päätökset riippuvat ainoastaan systeemin nykyisestä tilasta ja myöhemmistä päätöksistä. Nykyinen vaihe saavutetaan aiemmin tehtyjen päätösten perusteella. Optimaalisessa menettelytavassa päätökset tehdään nykyisen tilan ja tulevaisuutta koskevien odotusten perusteella. (Belegundu ja Chandrupatla 1999, s. 327 - 333)

Optimointiongelmaa ratkaistaessa dynaaminen optimointi tähtää suoraan optimaaliseen ratkaisuun muiden tapojen päätyessä vähittäisiin iteraatioihin. Tässäkin ratkaisu tosin saattaa edelleen olla vain lokaali minimi. Ongelman ratkaisun suunta voi olla etu- tai takaperoinen (forward or backward recursion scheme) (kuva 5). (Belegundu ja Chandrupatla 1999, s. 327 - 333) Takaperin edettäessä optimointiongelman lopputulosta muokataan niin, että seuraavilla askelilla selvitettyt tiedot voidaan sisällyttää siihen (Weber ja Woll 2006, s. 3). Dynaamisessa optimoinnissa siis huomioidaan ilmiöiden muutos ajan suhteen ja edellisen optimointihetken vaikutus seuraavaan. Dynaamisen optimoinnin vastakohta on staattinen optimointi. Siinä on kyse yksittäisistä, toisistaan riippumattomista optimointihetkistä.



**Kuva 5.** Dynaamisen optimointitehtävän ratkaisusuunta voi olla vastakkainen kuluvaan aikaan nähden. (Weber ja Woll 2006, s. 3)

## 2.3 Satunnaisuuteen perustuvat menetelmät

Kaikki satunnaisuuteen perustuvat menetelmät ovat epälineaarisia ja ei-deterministisiä. Satunnaismenetelmiä ovat tilastolliset, stokastiset ja sumeat menetelmät.

### 2.3.1 Tilastollinen optimointi

Tilastollinen optimointi perustuu kokeelliseen ajattelutapaan, jossa suunnitteluvaiheessa tehdään empiirisiä kokeita. Näin monimutkaisen prosessin käyttäytymistä opitaan ymmärtämään paremmin. Kyseessä voi olla todellinen prosessi, sen pienoismalli- tai pilottiversio, simulointimalli tai ohjelmakoodi. Optimoinnissa ja kokeiden suunnittelussa prosessin sisääntulot käsitellään ohjattavina muuttujina. Ulostulot puolestaan ovat niitä muuttujia, joiden arvoa halutaan muuttaa ohjattavien muuttujien kautta, ja niitä nimitetään prosessin vasteiksi. Niillä myös mitataan prosessin laatua. (Del Castillo 2007, s. 3 - 4)

Todellisia prosesseja mallinnetaan ottaen huomioon prosessin kohina. Kohina tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että ohjattavien tekijöiden (controllable factors) täysin samanlaiset asetukset eivät johda täysin samanlaisiin vastearvoihin. Vasteiden erot johtuvat muista, kokeessa huomioon ottamatta jätetyistä tekijöistä. (Del Castillo 2007, s. 4)

Tässä työssä tilastollista menetelmää sovelletaan käytönaikaisesti niin, että voimalaitoksen historiadatasta haetaan nykyhetken ulkoisia olosuhteita parhaiten vastaava tilanne. Mikäli kyseisen historian hetken käyttökate on nykyhetken katetta parempi, sovelletaan sen hetken säätimien asetusarvoja nykyhetkeen. Periaatteesta kerrotaan lisää luvussa 4.4.

### 2.3.2 Stokastinen optimointi

CHP-voimalaitosten tai laitossyksiköiden välisessä optimoinnissa tärkeä lähtökohta on yleensä lämmön kysyntä, mutta toisen haasteen tarjoaa samalla sähkön vaihteleva ja epävakaa hinta. Ratkaisuksi lähteessä (Weber ja Woll 2006) esitetään palautuvan stokastisen optimoinnin ja lähestymistapana laskennallisen palautuvuuden yhdistämistä. Laitoksen käynnissä tai poissa päältä oloa voidaan kuvata stokastisella optimoinnilla seuraavalla suunnitteluai-



kävälillä. Kaksivaiheisen stokastisen optimoinnin ensimmäisessä vaiheessa annettuja tietoja ovat sähkön ja lämmön kysynät, ja seuraavan vaiheen lämmön kysynnälle ja sähkön hinnalle tehdään skenaarioita. Stokastisen laskennan suunta on vastakkainen ajan kulumiselle (backward stochastic induction) kuten dynaamisessa optimoinnissa. Lämmön kysynnän vaihtelua mallinnetaan ARMAX-mallilla, jossa astepäiväluvut ovat muuttujina, ja optimoinnin tarkoituksena on voimalaitosyksiköiden välinen optimointi. Siinä siis selvitetään, minkä yksiköiden on milloinkin kannattavinta olla käynnissä. (Weber ja Woll 2006, s.1 - 5)

Stokastisen rekursiivisen regressiofunktion lähtöpiste valitaan satunnaisesti. Regressiofunktion suunta ei ole suoraan havaittavissa, joten stokastinen gradientti määritellään muulla tavoin. Tarkoituksena on löytää regressiofunktion stationäärinen piste, joka on minimi tai maksimi. Rekursiivinen yhtälö siis konvergoi kohti tällaisia pisteitä. (Del Castillo 2007, s. 368 - 370) Löydetyistä lokaaleista stationääripisteistä voidaan valita globaali optimi.

### ***Metaheuristinen optimointi***

Metaheuristisessa optimoinnissa pohjana on sopiva algoritmi vaikealle optimointitehtävälle, joka usein liittyy operointipisteen etsintään, insinööritekniikkaan tai tekoälyyn ja jolle ei tunneta tätä tehokkaampaa klassista ratkaisutapaa. Metaheuristiikat ovat yleisesti ottaen iteratiivisia stokastisia algoritmeja, jotka etenevät kohti globaalia optimia eli funktion kokonaisvaltaista ääripäätä kohdefunktion satunnaisten pisteiden ja todennäköisyyksien avulla. Metaheuristisen stokastisen optimoinnin etuja ovat yksinkertainen konsepti, parametrien vähäisyys ja implementoinnin helppous. Laskennassa ei tarvita lainkaan derivointia.

Algoritmit oppivat ongelmaa kuvastavat piirteet ja niiden avulla pyrkivät löytämään arvion parhaasta ratkaisusta. Tärkeitä käsitteitä ovat oppiminen, intensifiointi ja diversifiointi. Diversifiointi tarkoittaa prosessia, jonka tarkoituksena on kerätä tietoa käsiteltävästä ongelmasta. Tällöin uusi arvo valitaan täysin satunnaisesti koko määrittelyjoukosta. Intensifioinnin tarkoituksena on käyttää löydettyä tietoa ja tarkentaa kiinnostavien alueiden tutkimista, eli arvo valitaan edellisen arvon vierestä. Muisti tukee etsintää ja mahdollistaa etsinnän vain todennäköisillä alueilla. Metaheuristiikka etenee iteratiivisesti niin, että intensifioinnin, diversifioinnin ja oppimisen vaiheet vaihtelevat. Esimerkiksi algoritmi nimeltä Harmony Search käyttää arvojen heuristisessa valinnassa näitä kolmea metaheuristisen optimoinnin sääntöä. Lähtö-

kohta on usein valittu sattumanvaraisesti ja algoritmia käytetään, kunnes lopetusehto täyttyy. (Belmadani ja muut 2009, s. 44 ja 46)

Metaheuristiikka on strategia, joka ohjaa optimin etsintäprosessia. Lokaalin optimin välttäminen perustuu joko ratkaisun huononemisen sallimiseen, tai uusien laskennan aloitusratkaisujen luomiseen. Pääasiallinen ero metaheuristisen ja täysin satunnaisuuteen perustuvan optimoinnin (random search) välillä on se, että metaheuristisen optimoinnin satunnaisuus ei ole pelkästään sattumanvaraista, vaan älykästä. (Blum ja Roli 2003, s. 2 - 3) Esimerkkejä stokastisista metaheuristiikoista ovat geneettiset ja evoluutioalgoritmit.

### **2.3.3 Sumea optimointi**

Sumeassa logiikassa lausekkeille ei anneta pelkästään diskreettejä totuusarvoja, esimerkiksi 1 = tosi ja 0 = epätosi, vaan reaalisia totuusarvoja suljetulla välillä  $[0,1]$ . Tällöin esimerkiksi osittainen ehdon täytyminen voi saada arvon 0,4 tai 0,7. Päätökset tehdään epävarmuuksista ja osittain puuttuvista tiedoista huolimatta. Sumea logiikka mahdollistaa kielelliset prosessinsäätömääräykset, eli se käyttää ihmisen todellista päättelyä muistuttavia kielellisiä malleja (Airikka ja Nieminen 2010, s. 5). Näin sumeaa logiikkaa hyödyntävä optimointijärjestelmä on helposti ymmärrettävä operaattoreille. Luvussa 9.2 kerrotaan Metso Automaation kehittämästä, sumeaa optimointia käyttävästä kattilassa tapahtuvan palamisen optimointijärjestelmästä.

## **2.4 Optimointisovellukset**

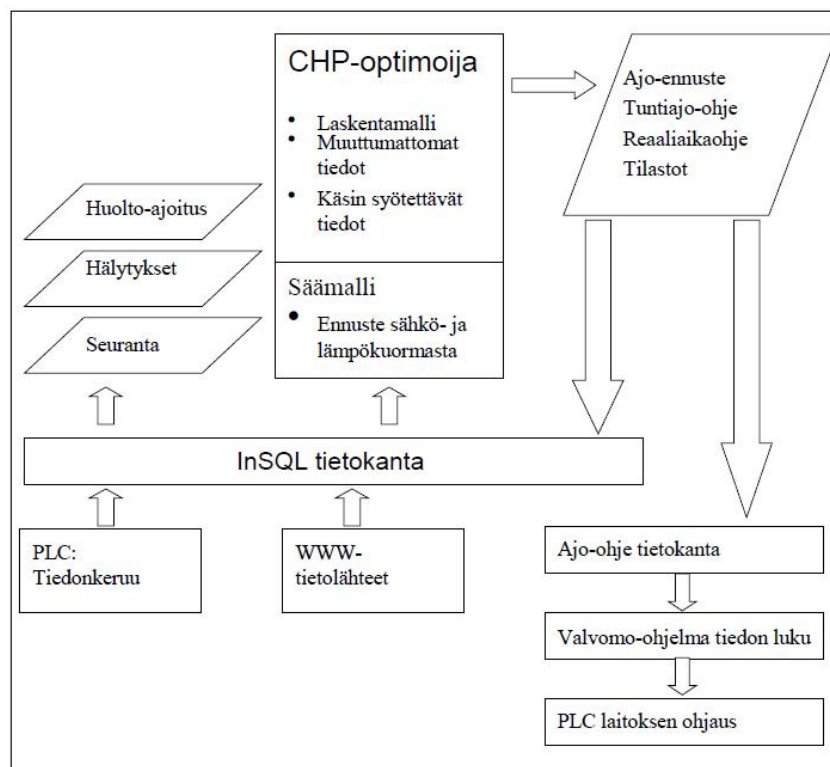
Erilaisia optimointiteorioita on erittäin paljon. Niitä voidaan jaotella eri tavoin, ja ne ovat osittain sisäkkäisiäkin. Vielä enemmän on näitä teorioita käytäviä ja toisiinsa yhdistäviä käytännön sovelluksia, joista tässä luvussa esitellään muutama.

### 2.4.1 Optimoinnin online- ja offline-mallit

Optimointimalli voi olla määritelty etukäteen melko pitkälle aikavälille, kuten päivälle, viikolle tai vuodelle. Tällöin on kyseessä offline-malli, joka sopii lähinnä yksinkertaisille ja säännöllisesti käyville prosesseille. Jos taas tuotettu kuorma vaihtelee tavalla, jota ei voida etukäteen ennustaa, optimointi on tehtävä aina tietyin määräajoin seuraavalle ajanhetkelle ja kyseessä on online-optimointi. Mikäli systeemi sisältää sähköntuotannon ohella myös lämmön tai jäähdytyksen tuotantoa, säädöstä aiheutuva prosessivaste saadaan termodynaamisten ominaisuuksien vuoksi vasta viiveen jälkeen. Viiveet ovat online-optimoinnissa pääasiallinen rajoitettava tekijä. (Hashemi 2009, s. 224)

Esimerkki online-optimointiohjelmasta on lähteessä (Tulokas 2002) energiayhtiölle kehitetty optimointijärjestelmä, jossa reaaliaikaoptimointi suoritetaan minuutin välein. Paikalliset sähkö- ja lämpökuormat esitetään kymmenen minuutin liukuvina keskiarvoina, ja laitoksen tulevaa käyttöä ennustetaan historiatietoihin perustuvalla aikasarjamallilla. (Tulokas 2002, s. 43) Kehitetty optimointialgoritmi vertailee laitoksen katetta eri sähköntuotannon käyttöasteilla. Näistä valitaan se, jolla kate on maksimissa. Laitoksen tulot tulevat sähkön ja lämmön myynnistä, ja menot kiinteistä sekä muuttuvista kustannuksista. Kiinteitä kustannuksia ovat tietoliikenneyhteys-, vartiointi-, valaistus- ynnä muut kulut, muuttuvia taas polttoaine- ja huoltokulut, jotka vaihtelevat energiantuotannon mukaan. (Tulokas 2002, s. 33)

Optimointi käsittää ajo-ohjeen luomisen seuraavalle minuutille. Lisäksi kerran vuorokaudessa lasketaan vuorokausiohje. Laitoksen ohjauslogiikasta voidaan valita toinen seuraavista käyttötavoista: teho-ohjekäyttö ja ajomallikäyttö. Teho-ohjekäytössä lasketaan optimiteho reaali-lukuna 0...1 (eli 0...100%), jolla CHP-yksikköä ajetaan. Ajomallikäytössä on valittavissa erilaisia malleja: lämmöntuotanto lisäkattiloilla ja sähkön osto verkosta; paikallista sähkön- tai lämmönkulutusta seuraavat mallit ja CHP-yksikön täyden tehon ajomalli. (Tulokas 2002, s. 30-31) Kyseinen ohjelma ei kuitenkaan huomioi systeemin dynaamista käyttäytymistä. Prosessin ohjaus tapahtuu laitoslogiikan kautta PID-säätimillä. (s. 79 ja 89) Laitoksella tehtiin verifiointimittauksia, joiden tuloksia tarkasteltiin tuntitasolla eli samalla aikavälillä kuin sähkön hinnan päivitys tapahtuu. (s. 80) Kuvassa 6 on optimointiympäristön rakenne. Optimointiympäristö tarkoittaa laitosoptimointia suorittavaa, tiedon lukuosan ja logiikan muodostamaa kokonaisuutta. Tiedon lukuosa liittyy työssä kehitettyyn optimointiohjelmaan, tiedonkeruuseen, tiedonkäsittelyyn ja laitoksen ohjaukseen. (s. 60)

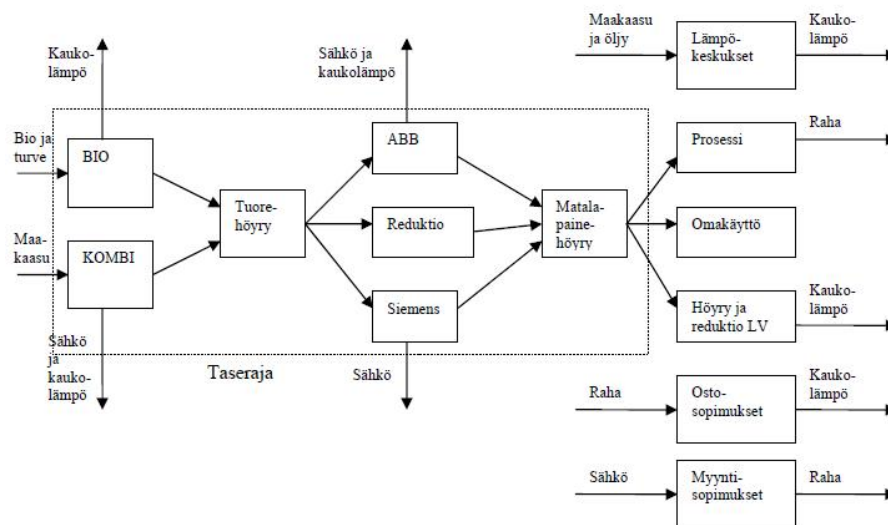


**Kuva 6.** Optimointiympäristön periaatteellinen toimintakaavio. (Tulokas 2002, s. 61)

Lähteessä (Markkanen 2004) valittiin voimalaitoksen optimointitavaksi numeerisiin menetelmiin kuuluva luettelointimenetelmä. Järjestelmällä voidaan laskea tunti- tai päiväkohtainen laitteiston käyttöennuste, joten sitä voidaan pitää offline-mallina. Luettelointimenetelmällä lasketaan tietokoneella kaikki tuotantomahdollisuudet, joita vertaillaan. Ohjelman tarkoitus on minimoida voimalaitoksen tuotantokustannuksia. Tärkeintä on selvittää, mitkä laitteista kannattaa pitää käynnissä ja mitkä poissa päältä, mutta kovin tarkkaan prosessin tehoja ei laske- ta. Ne määräytyvät kaukolämmön- ja höyrynkulutuksen mukaan. Vertailuista tuotantomah- dollisuuksista parhaan tuoton antava eri ajotapojen yhdistelmä tallennetaan raportille. Opti- mointia jatketaan, kunnes jokin toinen ratkaisu tulee paremmaksi, ja tallennetaan. Kaikki huonompaa tuottoa ehdottavat ratkaisut hylätään. Erilaiset ajotapoihin liittyvät rajoitteet vä- hentävät optimoitavaa joukkoa. Kuvassa 7 on optimointiohjelman periaatekaavio.

Valmiisiin optimointialgoritmeihin liittyvien hankaluuksien vuoksi kohteen optimointitehtävään ei valittu valmista ratkaisukaavaa. Sen sijaan systeemiä kuvataan simulointimallilla, jossa laskennat tehdään. Järjestelmälle annetaan lähtötietoina alkuarvot ja laskettavan ajan ennus- teet. Tarvittavia lähtötietoja ovat 1) kaukolämmön kulutusennuste, 2) ulkolämpötilaennuste,

3) polttoaineiden hintaennusteet ja 4) osto- ja myyntisopimuksen mukaiset hinnat. Ohjelman puute on se, ettei se huomioi edellisiä eikä tulevia tunteja. Ohjelma saattaa ehdottaa jonkin laitteen käyttöönottoa ja alasajoa vuorotunnein, mikä ei ole lainkaan järkevää. Siksi pidempien ajanjaksojen tarkasteleminen parantaa tilannetta. (Markkanen 2004, s. 82 - 97)



**Kuva 7.** Hovinsaaren voimalaitoksen optimointimallin yksinkertaistettu kaavio. (Markkanen 2004, s. 85)

Lähde (Wärtsilä 2010) kuvaa moottorivoimalaitokselle suunniteltua offline-optimointiohjelmaa. Ohjelman tarkoitus on luoda operaattorille suosituksia laitoksen tehokkaammasta käytöstä. Lähtötiedot voidaan lukea järjestelmästä, tai ne voidaan testausmielessä syöttää käsin. Operaattorin päätöksen mukaan suositukset voidaan ottaa käyttöön tai jättää ottamatta. Laitosta voi käyttää joko kaksoispolttoainekäytöllä tai pelkällä nestemäisellä polttoaineella. Näiden kahden eri ajotavan polttoainekustannuksia voidaan vertailla tällä ohjelmalla. (Wärtsilä 2010, s. 2 - 5 ja 7)

Operoinnin ohjenäytöllä on tiedot lähtöarvoista, laitoksen päälaitteiden käynnissä olosta ja käyttökustannuksista sekä laitoksen toimintapistekuvaaja. Käynnissä olo ja tehotiedot sekä lähtötietojen perusteella lasketut suositukset näytetään moottorista, absorptiojäähdyttimistä, kompressorijäähdyttimistä sekä lisäpolttimeista. Käyttökustannukset sisältävät kahden moottorin kevyen polttoöljyn sekä maakaasun kulutuksen ja lisäpolttimen polttoaineen kulutuksen, polttoainekustannukset USD/tunti ja kokonaiskustannukset. Toimintapistekuvaajan vaaka-

akselilla on bruttosähköntuotanto [kW] ja pystyakselilla jäähdytetyn veden tuotanto [kW]. Näin kuvaajan perusteella voi helposti laskea rakennussuhteen. Kuvaajalla näkyy pisteenä lähtöarvoihin perustuva laskettu käyntipiste sekä eri värillä järjestelmästä luettuun prosessidataan perustuva käyntipiste. (Wärtsilä 2010, s. 6)

#### 2.4.2 Monitavoitteellinen optimointi

Lähde (Lazzaretto ja Toffolo 2002) esittelee monitavoitteellisen optimointiratkaisun, jossa energiantuotanto optimoidaan kolmen erillisen tavoitteen suhteen: maksimaalisen eksergiahyötysuhteen, minimaalisten taloudellisten kustannusten ja minimaalisten ympäristövaikutusten suhteen. Kolmen kohdefunktion yhtäaikainen ratkaisu tuottaa tuloksena optimaalisten ratkaisujen pinta-alan, Pareto-optimaalisen rintaman. Pinta on pistejoukko, jossa kohdefunktioiden arvot ovat sidoksissa toisiinsa. Tällöin yhden funktion arvon parantaminen huonontaisi vähintään toista kahdesta muusta funktiosta. Kohdefunktiot ovat seuraavaa muotoa (Lazzaretto ja Toffolo 2002 s. 1147).

Eksergiafunktio:

$$\zeta = \frac{\dot{W}_{\text{Net}} + \dot{m}_{\text{Steam}}(e_2 - e_1)}{\dot{m}_{\text{Fuel}} \cdot e_{\text{Fuel}}}, \quad (3)$$

missä	$\zeta$	Laitoksen eksergiahyötysuhde	[%]
	$\dot{W}_{\text{Net}}$	Nettosähköteho	[kW]
	$\dot{m}_{\text{Steam}}$	Höyryn massavirta	[kg/s]
	$e_2 - e_1$	Höyryn ominaiseksergian muutos kulutuskohteen yli [kJ/kg]	
	$\dot{m}_{\text{Fuel}}$	Polttoaineen massavirta	[kg/s]
	$e_{\text{Fuel}}$	Polttoaineen ominaiseksergia	[kJ/kg]

Talouxfunktio:

$$\dot{C}_{\text{Total}} = \dot{C}_{\text{Fuel}} + \sum_i \dot{Z}_i, \quad (4)$$

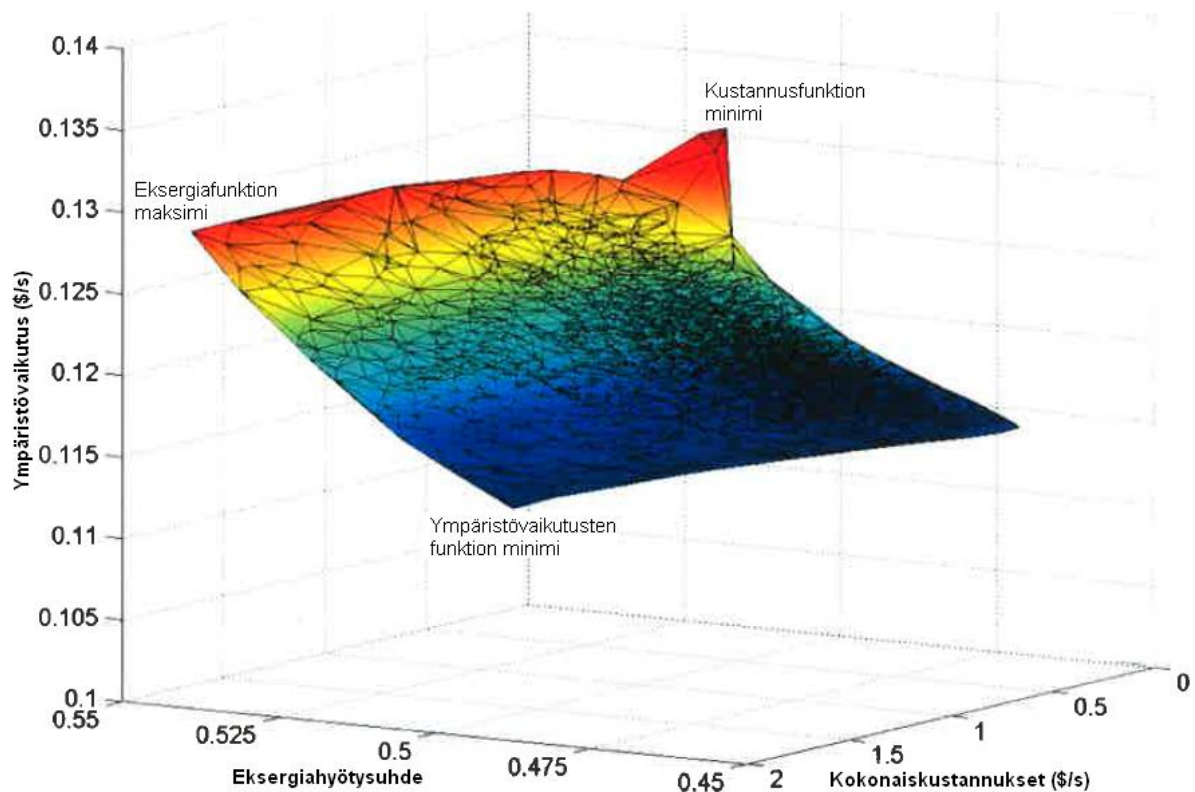
missä	$\dot{C}_{\text{Total}}$	Kokonaiskustannus	[\$]
	$\dot{C}_{\text{Fuel}}$	Polttoainekustannus	[\$]
	$\sum_i \dot{Z}_i$	Komponenttikohtaisten kustannusten summa	[\$]

Ympäristöfunktio:

$$\dot{C}_{\text{Env}} = c_{\text{CO}_2} \cdot \dot{m}_{\text{CO}_2} + c_{\text{NO}_x} \cdot \dot{m}_{\text{NO}_x}, \quad (5)$$

missä	$\dot{C}_{\text{Env}}$	Ympäristökustannus	[\$]
	$c_{\text{CO}_2}$	Hiilidioksidin yksikkökustannus	[\$/kg <sub>CO2</sub> ]
	$\dot{m}_{\text{CO}_2}$	Hiilidioksidin massavirta	[kg <sub>CO2</sub> /s]
	$c_{\text{NO}_x}$	Typenoksidin yksikkökustannus	[\$/kg <sub>NOx</sub> ]
	$\dot{m}_{\text{NO}_x}$	Typenoksidien massavirta	[kg <sub>NOx</sub> /s]

Erilaisilla polttoaine-ilmasuhteilla saadaan erilaisia Pareto-rintamia, joista esimerkki on kuvassa 8. Rintamasta voidaan tehdä projektioita kahden kyseessä olevan funktion suhteen. Herkkyysanalyysissä voidaan tarkastella prosessin kannalta tärkeimpiä muuttujia ja niiden suhdetta optimipisteisiin. Lähteen testilaitoksena oli kaasuturbiinin sisältävä kombivoimalaitos, jossa määrääviä tekijöitä olivat kompressorin painesuhde, turbiinin sisääntulolämpötila ja ennen polttokammiota olevan savukaasu-ilma-lämmönsiirtimen tehokkuus. (Lazzaretto ja Toffolo 2002, s. 1145 ja 1151)



**Kuva 8.** Kolmiobjektiivisen funktion optimaaliset arvot Pareto-rintamana polttoaine-ilma-suhteella 0,68 (kuvaa muokattu). (Lazzaretto ja Toffolo 2002, s. 1147)

### 2.4.3 Voimalaitosyksiköiden välinen optimointi

Taloudellinen tuotannon jako (economic dispatch) tarkoittaa energiantuotannossa olevien generointivälineiden käyttöä mahdollisimman alhaisin kustannuksin asiakkaiden palvelemiseksi ottaen huomioon energian tuotanto- ja siirtolaitteiston käyttörajoitteet. Taloudellinen tuotannon jako käsittää pääasiassa kaksi komponenttia, eli tämän päivän sähköntuotannon ja seuraavan päivän tuotannon suunnittelun. (FERC 2005, s. 2)

Tämän päivän taloudellinen tuotannon jako pitää sisällään kuorman, tuotannon ja energiansiirron tarkkailun kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseksi. Taajuus pidetään oikealla tasolla ja tuotannon jakoa tarkkaillaan tunneittain. Näin sähkönsiirrossa virrat ja jännitetasot pidetään sallittujen rajojen sisällä. Mikäli korjaavia toimenpiteitä tarvitaan, voidaan tämänhetkisiä tai uusia tuotantosunnitelmia rajoittaa tai muuttaa. (FERC 2005, s. 4)

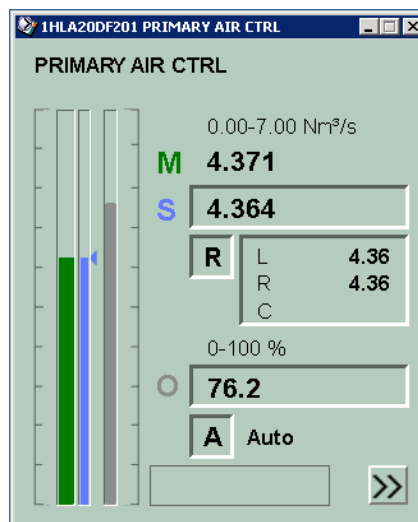


Seuraavan päivän tuotantoyksiköt valitaan ja aikataulutetaan kullekin tunnille perustuen enustettuun kuormaan. Suunnittelussa huomioidaan kunkin tuotantoyksikön tekniset rajoitteet, kuten generaattorin tehon muutos aika, maksimi- ja minimitehot, lyhin mahdollinen ajoaika ja aika, joka generaattorin on oltava poissa käynnistä, kun se on ajettu alas. Myös yksikköjen ominaiskustannukset huomioidaan. Ne riippuvat muun muassa hyötysuhteesta ja muuttuvista kustannuksista, kuten polttoaineesta. Kustannuksia tulee myös ympäristömaksuista sekä ylösajoista. (FERC 2005, s. 3)

Käytännössä taloudellisimman mahdollisen tuotannon jakotavan etsiminen tarkoittaa yhtä kuin optimointi, ja sitä kohti päästään optimaalisella säädöllä. Taloudellinen tuotannon jako on siis joukko manuaalisia tai automaattisia optimointimenetelmiä, joiden päämääränä on kohdentaa energiantuotanto tietyille energialähdevalikoimalle. Kyseessä onkin lähinnä laaja tuotannon jako eri voimalaitosten kesken, eikä niinkään tietyn laitoksen prosessin sisäinen optimointi. Teoreettisesti tarkasteltuna tuotannon jako koostuu monista deterministisistä ja stokastisista optimointiongelmista, jotka voivat olla staattisia tai dynaamisia, epälineaarisia, suuridimensioisiaakin ongelmia ja ne voivat sisältää reaali- ja kokonaislukumuuttujia. Huomioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi laitosten hyötysuhdekäyrät ja sähkönsiirtohäviöt. Toisaalta tuotantoon vaikuttavat myös poliittiset ja sosiaaliset tekijät. (Tzafestas 1982, s. 217 - 220)

### 3 ENNUSTAVA SÄÄTÖ

Prosessia ohjaavat säätimet. Säätö koostuu mittauksesta (measurement M), asetusarvosta (setpoint S) ja ohjauksesta (operation O); esimerkki säätöikkunasta on kuvassa 9. Säädin säätää ohjauksen avulla mitattua arvoa asetusarvon mukaiseksi. Perinteisesti säätö on toteutettu vain tämänhetkisiin tilanteisiin reagoivilla PID-säätimillä, mutta säätö voidaan suunnitella niin, että se ottaa huomioon menneisyydessä tapahtuneet tilanteet sekä ennakoituvia säätötarpeita olosuhteiden muuttuessa.



**Kuva 9.** Primääri-ilmamäärän perussäädin, jossa M = virtausmittaus, S = virtauksen asetusarvo ja O = puhaltimen ohjaus. (MW Power 2012b)

Tämän diplomityön aikana ei toteuteta säädön ennustavuutta demonstraatiovoimalaitokselle, mutta sen tulevaa käyttöönottoa valmistellaan tämän kirjallisuusselvityksen osalta. Luvussa 9.1 kuvataan lisää ennustavan säädön toteuttamistapaa, joka on jo käytössä Metso Automaatiolla ja josta voidaan mahdollisesti ottaa soveltuvia osia käyttöön myös MW Powerille.

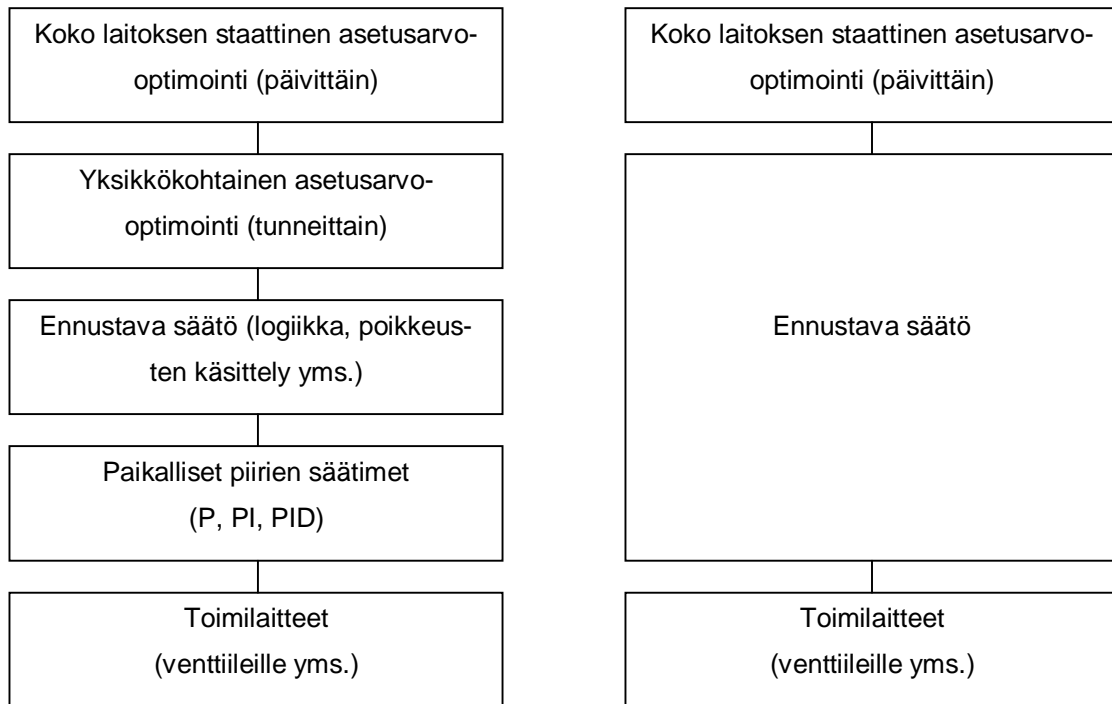
Mallipohjainen ennustava säätö (model predictive control MPC, käytetään myös suomennosta malliprediktiivinen säätö) huomioi paitsi reaaliaikaisen prosessin tilanteen, myös tulevaisuudessa tapahtuvat ennustetut muutokset. Se on ainoa tavallista PID-säätöä edistyneempi säätötapa, joka on laajalti levinnyt teollisuudessa. Se kykenee kommunikoimaan laitteiston kanssa ja käsittelemään toimilaitteiden rajoitteita. Teollisuuskäyttöä on edistänyt ennustavan

säädön perusajatuksen ymmärrettävyys. Säädetävällä käsitellään monimuuttujaista laitosta tarvitsematta tehdä ohjelmiston käyttöönottovaiheessa itse prosessiin muutoksia. MPC-säätimellä myös hallitaan pitkiäkin aikaviiveitä sisältävät säätösilmukat ilman, että se olisi paljon PID-säädintä vaikeampi viritettävä. Ennustava säätö mahdollistaa laitoksen käymisen lähempänä raja-arvoja kuin pelkkä PID-säätö, ja tällöin saavutetaan toistuvasti parhaat ja tuottavimmat käyttöarvot. Esimerkiksi kuormanmuutostilanteissa prosessin mittaustulokset pysyvät lähellä asetuservoja, koska muutoksiin reagoidaan ajoissa. Järjestelmän takaisinmaksuaika on lyhyt. (Maciejowski 2002, s. xi ja 1) Säättöongelmien ratkaisu voidaan toteuttaa esimerkiksi Matlabilla ja sen työkaluilla Control System Toolbox, Model Predictive Control Toolbox ja Optimization Toolbox (Maciejowski 2002, s. xii).

### 3.1 Säättöperiaate

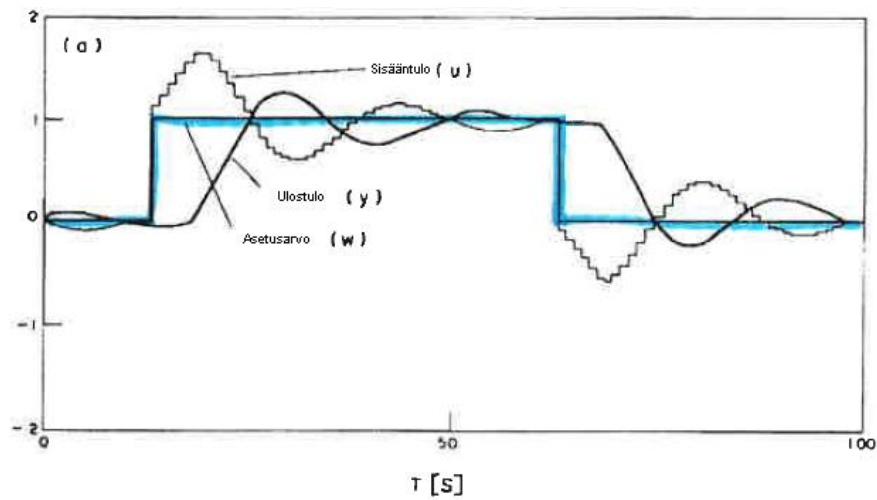
Kuvan 10 vasemmanpuoleisessa osassa on kuvattu tyypillisen nykyisen prosessiteollisuuden ennustavan säätöjärjestelmän rakenne. Ylimpänä hierarkiassa on asetuservojen määrittäminen, usein usealla eri aikavälillä. Tämä optimointi perustuu taloudellisiin vaatimuksiin, joten siihen saattaa liittyä dynaamisia ajan mukaan muuttuvia asetuservoja. Alimmalla tasolla ovat paikalliset säätimet sekä niiden säätöpiireihin liittyvät toimilaitteet. Keskitasolla staattisen ja paikallisen säädön välissä on perinteisesti ollut monimutkainen taso, joka sisältää muun muassa logiikan ja poikkeustilanteiden käsittelyn, joita ei voi hoitaa periaatteella ”yksi säätöpiiri, yksi asetuservo”. Tällä tasolla on usein tapauskohtaisia ratkaisuja yksittäisiin ongelmiin, joita tulee esille laitoksen elinkaaren aikana, eikä tämä järjestely juuri tuota optimaalisia tuloksia. Sen sijaan ennustava säätö sijoitettuna tälle tasolle on hyvin tehokas optimointiratkaisu sekä pohja integroidulle ongelmanratkaisulle. (Maciejowski 2002, s. 26 - 27) MPC-säädön ja perussäätöjen välille tarvitaan vain liittynät molemminpuolista tiedonsiirtoa varten.

Joissakin ennustavan säädön sovelluksissa, kuten servolaitteistoissa, ei ole erillisiä paikallisten piirien PID-säätimiä, vaan ne on yhdistetty keskitason ennustavaan säätöön (kuva 10 oikea puoli). On odotettavissa, että ennustavan säätötavan levitessä uusille sovellusalueille tällainen yhdistetty rakenne tulee yleistymään. (Maciejowski 2002, s. 28) Tapa kuitenkin sopii vain hyvin säännönmukaisesti toimiville prosesseille, jollainen höyryvoimalaitosprosessi ei ole.

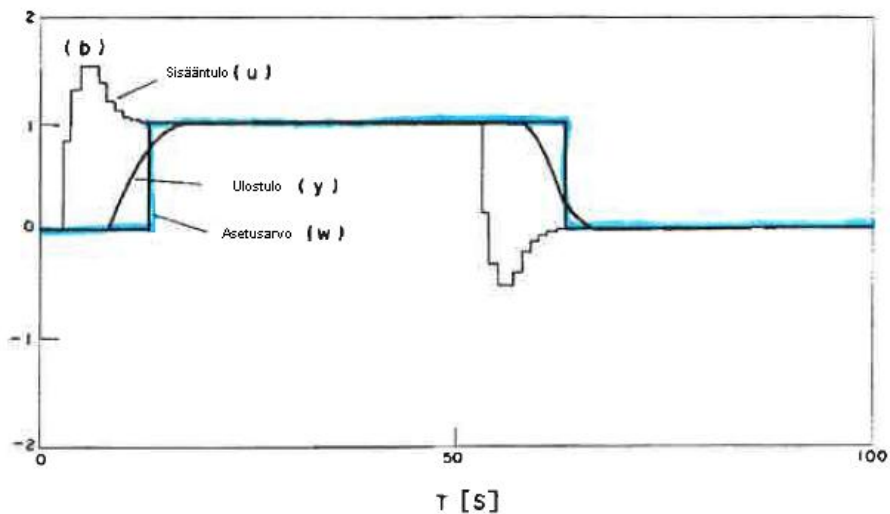


**Kuva 10.** Vasen kaavio: Tämänhetkinen tyypillinen ennustavan säädön hierarkia. Oikeanpuoleinen kuva: Mahdollinen tulevaisuuden ennustavan säädön hierarkia. (Kaavioita muokattu.) (Maciejowski 2002, s. 27 - 28)

Ennustavan säädön ero tavalliseen PI-säätöön liittyy lähinnä asetusarvon muutoksesta aiheutuvan säätötoimenpiteen aloitusajankohtaan (kuvat 11 ja 12). PI-säädössä asetusarvon muutos aiheuttaa reaktion prosessin sisääntuloarvossa eli säätösignaalissa, jonka muutos taas vaikuttaa viiveellä prosessin ulostuloarvoon eli mittaustulokseen. Sisään- ja ulostuloarvot alkavat iteroitua kohti asetusarvoa. Sen sijaan ennustava säätö muuttaa sisääntuloarvoa jo ennen asetusarvon muutosta ja myös prosessin ulostuloarvoja saadaan etukäteen. Näin prosessin tila on jo lähellä uutta asetusarvoa sen lopulta muuttuessa. (De Keyser ja muut 1988, s. 150)



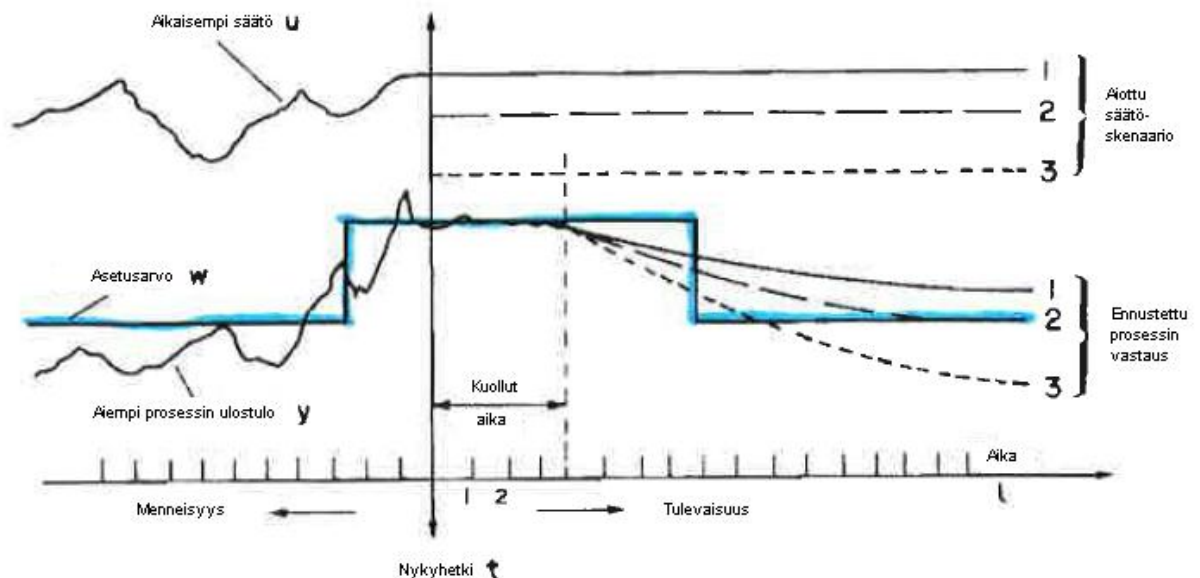
**Kuva 11.** Prosessin normaali PI-säätö (kuvaa muokattu). (De Keyser ja muut 1988, s. 150)



**Kuva 12.** Prosessin ennustava LRP-säätö (kuvaa muokattu). (De Keyser ja muut 1988, s. 150)

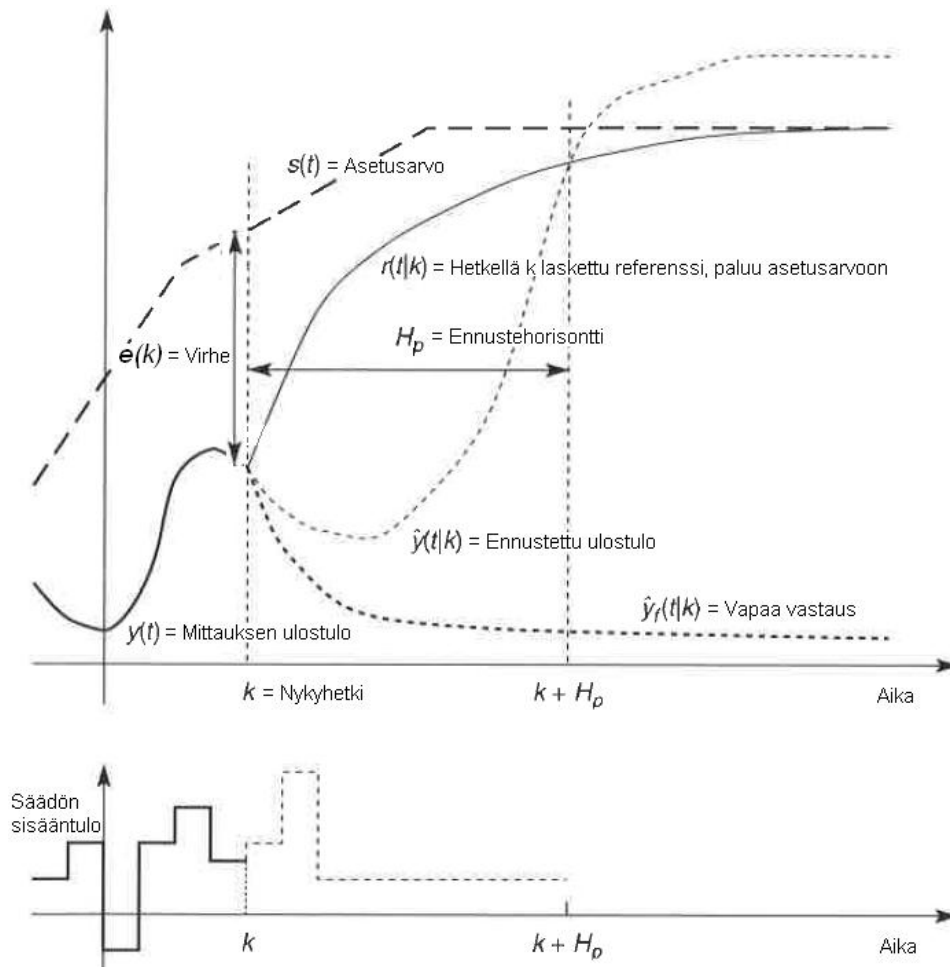
Kuvassa 13 on esitetty pitkän aikavälin ennustavan säädön periaate. Jokaisella ajanhetkellä  $t$  tehdään pitkän aikavälin ennuste aikahorisontille, joka sisältää  $L$  säätökierrosta. Ennuste tehdään joko täsmällisesti tai epäsuorasti säätöalgoritmista ja se perustuu prosessin dynamiikan matemaattiseen malliin. Kuvassa tulevaisuuden säätöskenaario on esitetty vakiona, mutta se voi hyvin myös muuttua ajan funktiona. Säädön perimmäisen tavoitteen mukaan valitaan paras skenaario prosessin ulostulon viemiseksi asetuservoonsa. Tämä paras skenaario pannaan täytäntöön todellisen prosessin sisääntulona, mutta vain kyseisellä nykyhetkellä. Seuraavana ajanjaksona koko laskenta suoritetaan uudestaan ja uusi säätötoimenpide

määritellään viimeisimpien mittausten perusteella. Tätä tarkoittaa ”liukuvan horisontin periaate”. (De Keyser ja muut 1988, s. 149) Ennustavassa säätötavassa siis pääasiana ei ole säätimen asetusarvon muuttaminen, vaan mittaustulosta muutetaan ennustetun asetusarvon mukaan. Tässä diplomityössä kehitetyssä säätötavassa lähtökohta on hieman erilainen, sillä tavoitteena on säätimien asetusarvojen hakeminen kohdalleen niin, että prosessi optimoituu. Tässäkin tavassa voidaan silti käyttää hyväksi ennusteita.



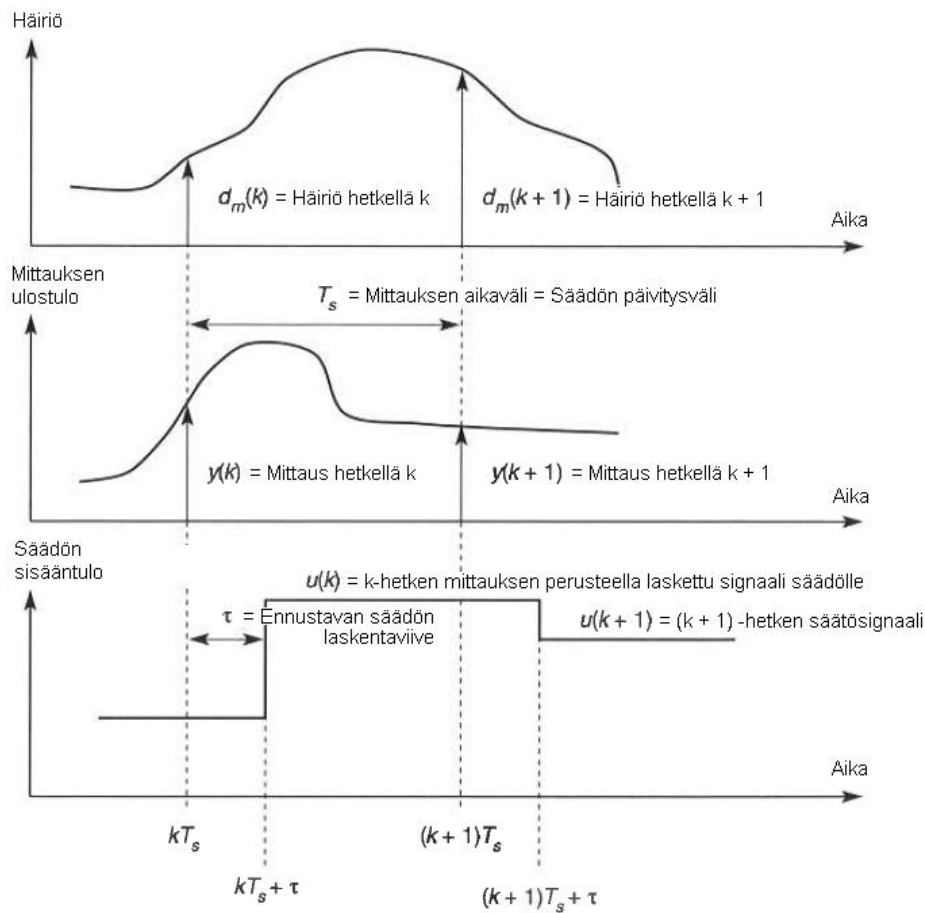
**Kuva 13.** Pitkän aikavälin ennustava säädin (kuvaa muokattu). (De Keyser ja muut 1988, s. 150)

Kuvassa 14 on kuvattu sama asia kuin edellä hieman eri näkökulmasta. Siinä on liukuva horisontti  $H_p$  nykyhetken  $k$  ja määritellyn päätehetken  $k + H_p$  välillä, ja ennusteet alkavat nykyhetkestä. Referenssi  $r$  on laskettu niin, että asetusarvoon palataan mahdollisimman pian, esimerkiksi eksponentiaalisella käyrällä. Referenssi ei kuitenkaan ole sama kuin ennustettu ulostuloarvo  $\hat{y}$ , joka pyrkii asetusarvoon omalla tavallaan. Kuitenkin ennustehorisontin pääteisteessä ulostuloarvon käyrä leikkaisi referenssikäyrän. Kunkin ennustehetken suosittelusta säädön sisääntuloista toteutetaan jälleen ensimmäisen hetken ennuste samalla kun uutta ennustetta aletaan jälleen laskea. (Maciejowski 2002, s. 7 - 9)



**Kuva 14.** Ennustavan säädön perusajatus (kuva muokattu). (Maciejowski 2002, s. 8)

Ennustava säätö sisältää myös käytönaikaisen optimoinnin, joten reaaliaikaisiinkin tapahtumiin kyetään reagoimaan (kuva 15). Koska jokaisen iterointikierroksen laskenta vaatii oman aikansa, sisältää säätömalli viiveen, joka on kuvassa merkitty  $\tau$ :lla. Koska todellisissa prosesseissa on usein satoja mittauksia, myös laskentaviive voi käytännössä vaihdella säätöpiiristä riippuen. Siksi uusi säätösignaali annetaan joko heti laskennan valmistuttua kyseiselle piirille, mikä johtaisi parempaan mutta monimutkaisempaan säätöön, tai sitten on odotettava standardiajan kulumista, ennen kuin kaikki säätösignaalit annetaan yhtä aikaa koko prosessille. (Maciejowski 2002, s. 50 - 52) Kuvassa häiriö hetkellä  $kT_s$  aiheuttaa muutoksen mittauksen ulostulossa ja säätötoimenpiteen viiveen jälkeen hetkellä  $kT_s + \tau$ . Kun häiriöstä on selvitty, säätö normalisoituu jälleen laskentaviiveen jälkeen.



**Kuva 15.** Häiriön mittaus ja aiheutunut säätötoimenpide yhden laskentaiteraation sisällä (kuva muokattu). (Maciejowski 2002, s. 51)

### 3.2 Ennustavan säädön menetelmiä

Ajan myötä on kehitetty erilaisia itsestään mukautuvia pitkän aikavälin ennustavia säätötapoja (self-adaptive long-range predictive control methods), joista merkittävimpiä on lueteltu seuraavassa (De Keyser ja muut 1988, s.151 - 154).

1. MAC, mallialgoritmien säätö (Model Algorithmic Control). Tässä säätötavassa prosessi kuvataan impulssin vastekertoimen perusteella:

$$\text{Ulostulo hetkellä } (t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \text{Impulssin vastekerroin}(j) \cdot \text{Sisääntulo hetkellä } (t - j) \quad (6)$$



2. DMC, dynaaminen matriisisäätö (Dynamic Matrix Control). Tässä prosessi kuvataan askelvasteen (step response) perusteella:

$$\begin{aligned} \Delta \text{Ulostulo hetkellä}(t + 1) &= \text{Sisäisen mallin ulostulo hetkellä}(t + 1) \\ - \text{Ulostulo hetkellä}(t) &= \text{Askelvastekerroin}(1) \cdot \Delta \text{Sisääntulo hetkellä}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

3. EPSAC, laajennettu ennustava itsestään mukautuva säätö (Extended Prediction Self-adaptive Control). Prosessi mallinnetaan parametrisesti näin, kun  $A(\cdot)$  ja  $B(\cdot)$  ovat polynomeja ja  $z^{-1}$  on siirtymäoperaattori (shift operator):

$$A(z^{-1}) \cdot \text{Ulostulo hetkellä}(t) = B(z^{-1}) \cdot \text{Sisääntulo}(t - \text{Viive}) + \text{Häiriösignaali} \quad (8)$$

4. EHAC, laajennetun horisontin mukautuva säätö (Extended Horizon Adaptive Control). Prosessi mallinnetaan näin:

$$A(z^{-1}) \cdot \text{Ulostulo hetkellä}(t) = B(z^{-1}) \cdot \text{Sisääntulo}(t - \text{Viive}) \quad (9)$$

Muita ennustavan säädön tapoja ovat (Maciejowski 2002, s. 26):

5. GPC, yleistetty ennustava säätö (Generalized Predictive Control)
6. PFC, ennustava toiminnallinen säätö (Predictive Functional Control)
7. SOLO, vaiheittainen avoimen piirin optimointi (Sequential Open Loop Optimization)

### 3.3 Ennustavan säädön viritys

Mallipohjaisen ennustavan säädön viritys perustuu ennustus- ja säätöhorisonttien pituuksien, kustannusfunktion painotuskertoimien sekä säätimen sisäisen mallin sisältämän kohinamallin parametrien valintaan. Viritys voidaan tehdä melko helposti heuristisella tavalla, sillä kaikilla vitysparametreilla on looginen vaikutus säätimen toimintaan. Parametreilla on selkeä fyysikaalinen merkitys, kuten absoluuttiset raja-arvot tai prosessimuuttujien muutosnopeudet. (Majanne 2005, s. 1502, 1504)

Ennustavaa säädintä voi virittää muuttamalla yhtä ainoaa v erityssuuretta (tuning parameter). Tämä suure vaikuttaa nopeuteen, jolla säädin reagoi asetusarvon muutoksiin ja häiriöihin. (De Keyser ja muut 1988, s. 151) Virityssuureen valinnalla on suuri vaikutus mallin käytön helppouteen. Valinta kannattaa kohdistaa sellaiseen suureeseen, jolla on joka tilanteessa yksiselitteinen vaikutus prosessin säätöön. Suureen, esimerkiksi ennustehorisontin pituuden, arvon kasvattamisen pitäisi siis aina vaikuttaa samoin, esimerkiksi säätöä hidastavasti. (s. 158)

Edellisessä luvussa kuvatuille ennustavan säädön menetelmille sopivia virityssuureita on lueteltu seuraavassa (paksunnettu on suositeltavin):

- MAC: virityssuure  $\alpha$ ,  $\beta$  tai  $l$
- DMC: virityssuure  $\beta$  tai  $l_u$
- EPSAC: virityssuure  $\gamma(k)$ ,  $\lambda$ ,  $l$  tai  $P(z^{-1})$
- EHAC: virityssuure  $l$

Suureiden merkitykset ovat seuraavat (De Keyser ja muut 1988, s. 155 - 156):

- Aikavakioon liittyvä  $\alpha$ , joka vaikuttaa säädön nopeuteen tai hitauteen (**MAC**)
- Määrä  $\beta$ , jolla sakotetaan (penalize) sisääntulomuuttujien eli säätömuuttujien muutoksista (**MAC**, **DMC**). Yleisesti sakkofunktiomenetelmissä rajoitteita sisältävä optimointitehtävä muutetaan rajoitteettomaksi, ja kohdefunktion lisätään sakkotermillä painotettuna rajoitteen rikkomisesta johtuva kustannus (Haataja 2004, s. 147).
- Painotuskerroin  $\gamma(k)$  säätöjen asetusarvoille (**EPSAC**)
- Designsuure  $\lambda$ , joka ilmaisee, painotetaanko säätövirhettä läheisessä vai kaukaisessa tulevaisuudessa (**EPSAC**)
- Ennustehorisontin pituus  $l$  (**MAC**, **EHAC**)
- Säätöhorisontti  $l_u$  (**DMC**)
- Design-polynomi, ulostulojen kerroin  $P(z^{-1})$  (**EPSAC**)

Malleilta vaaditaan monenlaisia käyttöominaisuuksia. Kuormahäiriön ilmetessä algoritmin ei pitäisi muodostaa staattista säätövirhettä. Mallin pitäisi siis olla jäykkä (robust) verrattuna kuormahäiriöihin. Mallin jäykkyyttä voidaan verrata myös stokastiseen prosessin kohinaan. Normaalisti nopea säädön viritys johtaa parempaan kohinan vaimennukseen. Jos virityssuu-

re on valittu niin, että säätö toimii hyvin nopeasti, voi ilmetä epäminimivaihenollia (non-minimumphase zeros), joista voi tulla ongelmia. Ennustavan säädön pitäisi olla jäykkyydeltään sellainen, että se kykenee käsittelemään epäminimivaihenollat. (Keyser ja muut 1988, s. 159 - 160)

Prosessisuureiden muutoksesta huolimatta mallien on saavutettava tarvittava säätösuorituskyky. Parametrisella säädöllä viiveen muuttuminen sisältää ennustemallin rakenteen muuttumisen. Lisäksi parametristen mallien (EPSAC ja EHAC) on kyettävä selviämään väärästä prosessimallirakenteesta. Tätä design-ongelmaa ei ole ei-parametrisilla malleilla. Kun säädön suorituskyky huononee todellisen ja malliprosessin eroavaisuuksien kasvaessa, suljetun silmukan (closed loop) on pysyttävä vakaana, asetusarvojen muutoksia pitää seurata ja tehohäiriöistä pitää selvittää. (Keyser ja muut 1988, s. 161)

## 4 SOVELLUSKOHDE JA OPTIMOINTIPERIAATE

Tässä luvussa kuvataan ympäristö, jossa tämän diplomityön kehitystyö tehdään. Voimalaitosprosessin ohjaus perustuu automaatiojärjestelmään (Distributed Control System eli DCS) ja informaatiojärjestelmään (Information System eli Info). Info on palvelin, johon kerätään prosessitieto DCS:stä ja jossa sitä analysoidaan määrittelyn mukaan. Infossa sijaitsee kaikki prosessin historiatieto.

### 4.1 Prosessin mittausjärjestelmä

MW Powerin BioPower 8 -laitoksen mittausjärjestelmä perustuu instrumentointiin, joka valitaan viranomaisten säädösten sekä asiakas- ja säätötarpeiden mukaisesti. Lämpötilamittausten sensorit ovat yleensä Pt100-tyyppisiä resistanssiantureita, joihin on nelijohtoinen yhteys ja jotka on varustettu 4 – 20 mA:n lähettimillä. Suurissa lämpötiloissa käytetään K-tyyppin (NiCrNi) termoelementtiantureita. Lähettimet on yleensä integroitu anturien päähän, mutta prosessiolosuhteiden vuoksi lähetin voi olla myös liitântäkotelossa tai ohjaustaulussa. (MW Power 2011a, s. 9)

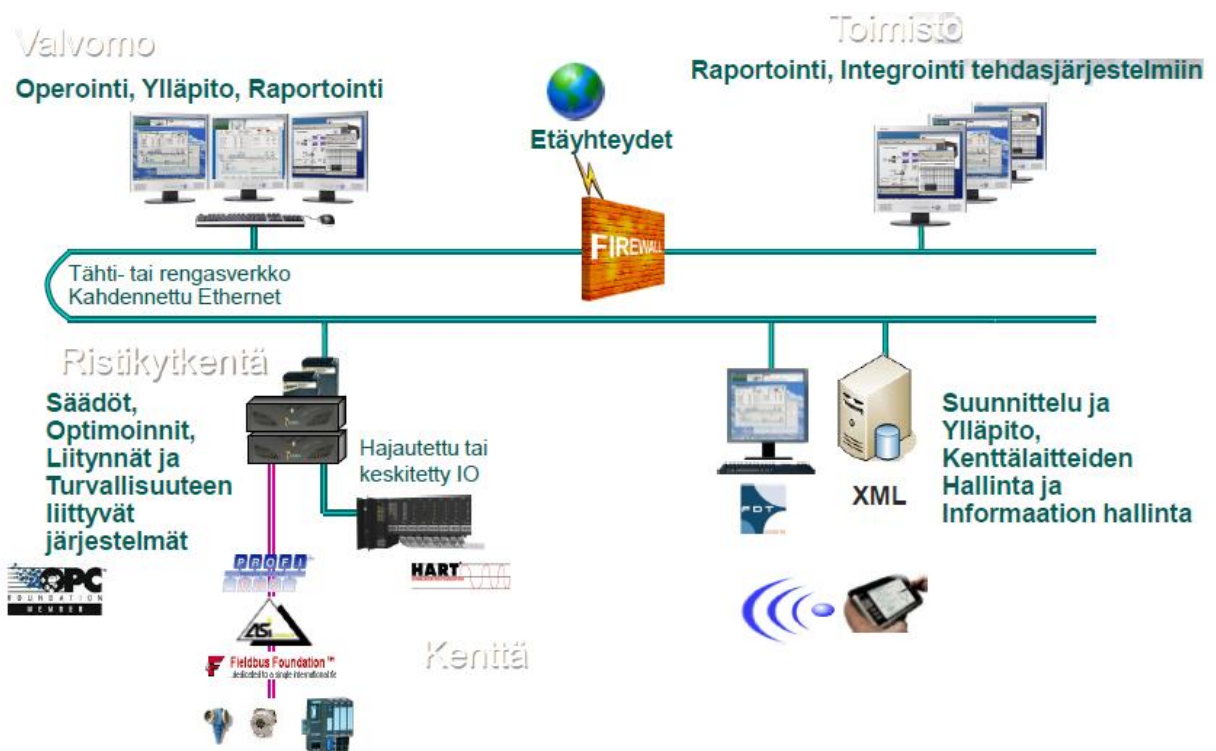
Paineenmittaukseen käytetään analogisia 4 – 20 mA:n paine-erolähettäjiä. Virtausmittauksiin käytetään magneettisia ja suutinmittareita. Hetkelliselle virtaukselle käytetään 4 – 20 mA:n signaalia ja kokonaisvirtaukselle pulssisignaalia. Virtausmittausten tuloksia käytetään tehokaskuihin. (MW Power 2011a, s. 9)

Pintamittauksille käytetään analogisia lähettäjiä. Kattilasiilon pinta mitataan ultraääni- tai mikroaaltokytkinlaitteella. Vesipinnan ilmaisin on elektrodityyppinen. Savukaasusta mitataan happi, ja mittaustulosta käytetään ilmamäärän säätöön. Rajakytkimet ovat induktiivisiä. Kaikki turvallisuuteen liittyvät, säätöön käytettävät mittaukset on yhdistetty väylillä turvalogiikkaan, joka voi olla toteutettu esimerkiksi viranomaishyväksytyllä PLC:llä (paikallinen säädin, programmable logic controller). Kaikki kattilan suojaukseen liittyvät mittaukset perustuvat lähetinsignaaleihin. (MW Power 2011a, s. 9)

## 4.2 Automaatio ja tiedonkeruu

Voimalaitoksen säätö on toteutettu pääasiassa automaatiojärjestelmällä. DCS:ää käytetään prosessin ohjaukseen, säätöön, operointinäyttöihin, tiedonkeruuseen sekä hälytyksiin ja niiden käsittelyyn. Prosessia ohjataan pääasiassa valvomosta käsin. Kentällä tehtäviä toimenpiteitä liittyy lähinnä laitoksen kylmäkäynnistykseen sekä huoltoon. Erilaisia turvalaitteita ja -lukituksia käytetään vähentämään ja hallitsemaan prosessin häiriöiden vaikutusta ja niiden aiheuttamaa turvallisuusriskiä. Järjestelmät on suunniteltu niin, että laitosta voi ajaa miehittämättömänä. Operointiasemia on kaksi, ja niillä olevilta näytöiltä voi suorittaa täysin samat prosessin ohjaustoimenpiteet. Säätöjärjestelmä myös kerää prosessidataa. Tieto tallennetaan informaatiojärjestelmään, joka on osa automaatiojärjestelmää. Infossa tietoa voidaan käsitellä ja siellä tehdään myös raportointi. (MW Power 2011a, s. 3)

Automaatiojärjestelmä perustuu väylätekniikkaan (kuva 16). Mittausinstrumentit ja prosessin ohjaimet on liitetty I/O-väylillä kenttäkoteloihin, joissa ne kootaan tietoliikenneväyliin. Automaation, instrumentoinnin ja prosessinohjausjärjestelmien tiedonsiirtoon käytettävät kenttäväylät voivat olla useaa eri tyyppiä, ja väylässä kulkeva signaali voi olla digitaalisessa (tuettu- ja tyyppinä esimerkiksi Profibus tai Foundation Fieldbus) tai analogisessa muodossa (Metso DNA 2011). Ethernet-tietoliikenneväylällä mittaussignaalit kuljetetaan automaatiojärjestelmään ja ohjaussignaalit vastakkaiseen suuntaan kenttälaitteille. Prosessia ohjataan ACN-prosessinohjaimilla.

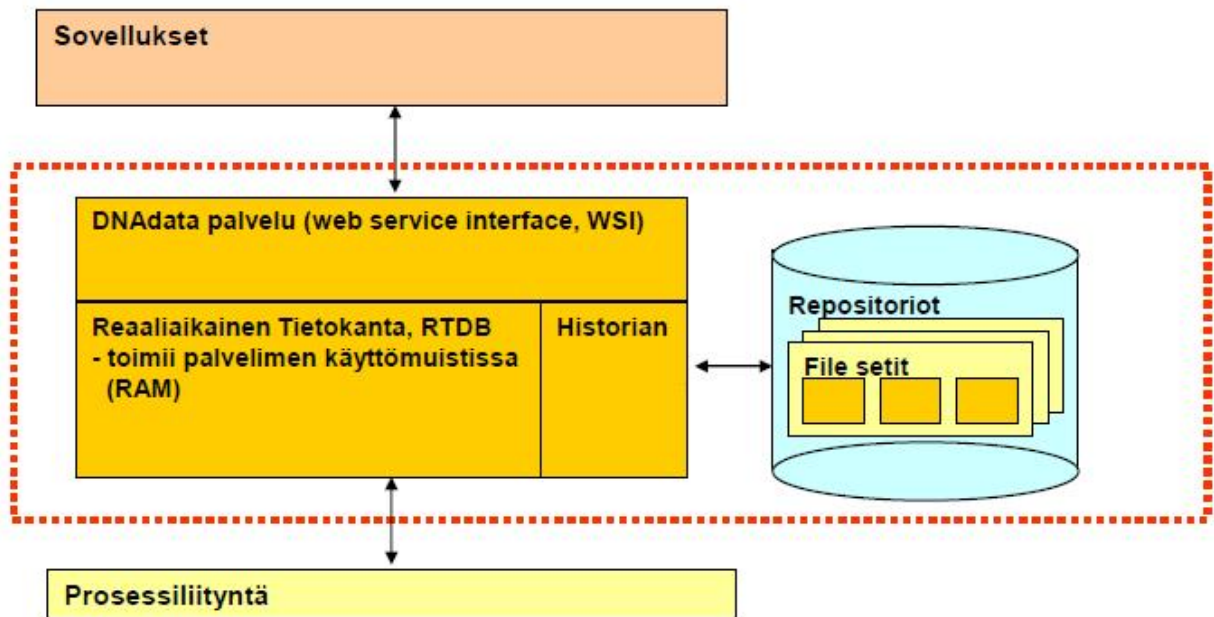


**Kuva 16.** Metso DNA –automaatiojärjestelmän arkkitehtuuri, jossa kenttäväylät kytkevät yhteen kenttälaitteet, I/O:t ja prosessinohjauspalvelimet. (Metso DNA 2011)

Prosessin historiatietoa voidaan lukea jälkepäin DNA Historia –järjestelmästä (kuva 17). Tieto tallentuu AspenTechin kehittämällä tekniikalla tietueisiin (record), joissa jokainen positio on yksi rivi positiotaulussa (kuva 18). Tietueet voivat tallentaa arvoja pitkältikin aikaväliltä levyllä oleviin arkistotiedostoihin (disk archive files). Kaikki kuhunkin positioon liittyvä tieto on tallennettu nimettyihin kenttiin eli sarakkeisiin. Tietueet kuuluvat määrittelyperheisiin, jotka voivat sisältää erilaisia kenttiä. Yleisimmin käytettyjä määrittelyperheitä ovat esimerkiksi analogiset muuttujat, kokonaislukumuuttujat ja keruuryhmät. Määrittelyperheet kuuluvat Info-Plus.21-tietokantaan (IMS Tagset). Seuraavassa listassa on määrittelyperheiden nimiä (Metso DNA Info 2011):

- |   |                |
|---|----------------|
| - Analogiset muuttujat                            | IP_AnalogDef   |
| - Diskreetit eli kokonaislukumuuttujat (binäärit) | IP_DiscreteDef |
| - Keruuryhmät                                     | loLLTagUnsDef  |
| - Pääryhmät                                       | loGroupsDef    |
| - Repositorit                                     | DiskHistoryDef |
| - SQL laskennat                                   | QueryDef       |

SQLplus on datankäsittelytyökalu määrittelyominaisuuksineen. Se toimii InfoPlus.21-tietokannan kanssa. Molemmat sijaitsevat DNA Historian palvelimella. SQLplussaa käytetään kyselytyökaluna reaaliaikaiseen dataan, historiatietoon ja konfigurointi-informaatioon. Query Writerilla voidaan tehdä QUI-kyselyitä ja ylläpitää tietokantaa.



Kuva 17. DNA Historian rakenne. (Metso DNA Info 2011)

		Kentät				
Esimerkki : Analogiset positiot						
Recordit	Nimi	Kuvaus	Yksikkö	Aikaleima	Arvo	Laatu
	25LIC-100:me	Sekoitussäiliö	%	21/08/09 12:00:01.0	75	Good
	25LIC-100:pos	Sekoitussäiliö	%	22/08/09 12:00:01.0	50	Good
	25LIC-100:spa	Sekoitussäiliö	%	23/08/09 11:59:55.0	74	Good
	25FC-100:me	Jauhin 1 lähtövent.	l/s	24/08/09 12:00:01.0	3.4	Good
	25FC-100:pos	Jauhin 1 lähtövent.	%	25/08/09 11:59:57.0	45	Good
	25FC-100:spa	Jauhin 1 lähtövent.	l/s	26/08/09 11:55:00.0	3.3	Good

Kuva 18. Positioiden historiatieto tallennetaan DNA Historian tietokannassa tietueisiin. (Metso DNA Info 2011)

### 4.3 Prosessidatan analysointi

Tiedonkeruusta saadaan haluttua prosessitietoa, jota analysoidaan Info-palvelimella. Tätä tietoa voidaan käyttää muun muassa prosessin optimointiin. Prosessin hyvyyden selvittämiseksi datasta lasketaan muun muassa hyötysuhteita koko prosessille ja sen osakomponenteille. Datan avulla voidaan myös laskea sellaisten prosessipisteiden tietoja, joista ei ole suorittamattomia mittauksia. Esimerkiksi jonkin lämmönsiirtimeen massa- ja energiataseiden avulla voidaan laskea yhden siihen liittyvän virtauksen massavirta ja lämpötila, kun muiden lämmönsiirtimeen liittyvien virtausten vastaavat ominaisuudet tunnetaan. Tämä taselaskenta tehdään Info-palvelimella.

Metso DNA on kehittänyt prosessidatan analysointiin ja raportointiin joukon työkaluja, kuten DNA Report, DNA Tracer, DNA Diary, DNA Eco Diary ja DNA Entry. Näillä työkaluilla voidaan tehdä lista- tai diagrammimuotoisia raportteja määritellyistä positioista (esimerkki kuvassa 19), piirtää kuvaajia menneisyyden ja nykyhetken prosessiarvoista, kirjata tapahtumia muistiin, tehdä hävikkiraportointia ja antaa informaatiojärjestelmälle alkuarvotietoja. (Metso DNA Info 2011). Seuraavassa luvussa 4.4 kerrotaan, miten prosessidataa voidaan hyödyntää käytönaikaisessa prosessin optimoinnissa.



DAILY REPORT - FLUE GAS MONITORING									
metso									
Printing time: 27/05/2011 08:59									
Time	Net steam output EI01075 MW	NOx		SO2		Dust		CO	
		Measurement (dry) AI14099 mg/m <sup>3</sup> (n)	Reduced concentration (dry 6 % O2) mg/m <sup>3</sup> (n)	Measurement (dry) AI14093 mg/m <sup>3</sup> (n)	Reduced concentration (dry 6 % O2) mg/m <sup>3</sup> (n)	Measurement (moist) AI14097 mg/m <sup>3</sup> (n)	Reduced concentration (dry 6 % O2) mg/m <sup>3</sup> (n)	Measurement (dry) AI14100 mg/m <sup>3</sup> (n)	Reduced concentration (dry 6 % O2) mg/m <sup>3</sup> (n)
26/05/11 00:00	111.9	176.1	162.6	0.0	0.1	4.6	5.5	118.4	109.2
26/05/11 01:00	112.6	175.4	162.2	0.1	0.1	1.7	2.0	134.4	123.5
26/05/11 02:00	115.4	180.1	175.4	0.1	0.1	0.9	1.2	100.5	94.4
26/05/11 03:00	115.6	180.3	171.2	0.2	0.2	0.7	1.0	108.8	102.8
26/05/11 04:00	116.9	191.7	179.3	0.2	0.3	2.6	3.2	99.5	92.7
26/05/11 05:00	113.3	189.6	174.6	0.5	0.5	3.4	4.1	105.9	97.7
26/05/11 06:00	115.5	191.8	177.0	0.5	0.4	0.6	0.8	98.1	90.9
26/05/11 07:00	114.9	193.3	178.0	0.6	0.6	1.3	1.6	90.5	81.6
26/05/11 08:00	118.8	203.4	185.8	0.4	0.4	6.1	7.2	118.7	106.3
26/05/11 09:00	130.1	207.6	198.5	0.3	0.3	5.5	6.8	126.4	117.5
26/05/11 10:00	126.4	198.8	188.2	0.1	0.1	9.2	11.7	121.9	113.9
26/05/11 11:00	133.4	188.5	175.7	0.0	0.0	6.7	8.5	201.0	187.5
26/05/11 12:00	130.1	189.4	179.5	0.0	0.0	6.6	8.0	88.6	85.1
26/05/11 13:00	125.0	196.6	185.2	0.2	0.3	9.6	12.0	94.5	88.0
26/05/11 14:00	119.8	197.7	185.5	0.5	0.4	5.1	6.3	87.1	80.5
26/05/11 15:00	122.3	202.4	188.5	0.3	0.2	1.5	1.9	98.6	94.0
26/05/11 16:00	122.6	205.1	187.7	0.1	0.1	12.9	15.2	84.4	78.2
26/05/11 17:00	124.3	205.6	189.9	0.1	0.0	10.4	12.4	109.2	99.2
26/05/11 18:00	127.1	204.3	191.7	0.1	0.1	0.6	0.8	101.5	94.6
26/05/11 19:00	126.8	206.4	191.7	0.2	0.2	1.5	1.9	114.5	104.4
26/05/11 20:00	124.2	200.6	186.5	0.7	0.6	2.5	3.1	156.9	144.7
26/05/11 21:00	123.9	194.7	185.2	1.2	1.1	2.0	2.6	107.8	103.5
26/05/11 22:00	127.7	197.4	191.2	2.7	2.6	11.8	15.3	83.4	80.3
26/05/11 23:00	131.6	193.9	183.0	1.1	1.1	9.2	14.4	158.6	147.9
Average	122.1	194.6	182.3	0.4	0.4	4.9	6.1	112.9	104.9
Sum	2930.1								
Minimum	111.9	175.4	0.0	0.0	0.0	0.6	0.8	83.4	78.2
Maximum	133.4	207.6	0.0	2.7	2.6	12.9	15.3	201.0	187.5

**Kuva 19.** Esimerkki tiedonkeruun tuloksena saatavasta automaattisesta päästöraportista. (Metso 2011a)

Tiedonkeruuseen ja prosessilla tehtäviin kokeisiin liittyy tiettyjä häiriötekijöitä. Kerätty data sisältää luonnostaan kohinaa, joka tarkoittaa hyödylliseen tietoon kuulumatonta satunnaisvaihtelua. Siksi myös muutokset prosessissa saattavat olla vain satunnaisia ja näennäisiä. Kohinan sekä prosessin tasaantumisen hitauden vuoksi prosessidataa on tarkasteltava kriittisesti ja ilmiöitä on seurattava riittävän pitkällä aikavälillä silloin, kun se on turvallista. Prosessin hitaus johtuu massavirtojen ja laitteiden fyysisistä ominaisuuksista, kuten nopeuksista, ominaislämpökapasiteeteista ja lämmönsiirrosta.

Eri prosessimuuttujien vaikutusta toisiinsa selvitetään herkkyyksianalyysillä. Tässä analyysissä muutetaan yhden suureen asetusarvoa kerrallaan ja annetaan prosessin tasaantua eli asetua uuteen tasapainotilaan muutoksen jälkeen. Muutoksia havainnoidaan ja kertynyttä mitta-

usdataa tarkastellaan kokeen jälkeen. Tässä vaiheessa on tärkeää minimoida kohinan vaikutus itse tuloksista. Eri prosessiarvoista seurataan niiden absoluuttisia sekä prosentuaalisia muutoksia, ja tulosten perusteella löydetään paras asetusarvo kyseisessä tilanteessa kyseiselle muuttujalle. Tämän diplomityön aikana tehtyjen mallinnusten herkkyystarkastelu esitetään luvussa 6.3 ja mittauksen herkkyystarkastelu luvussa 7.1.

Prosessidataa analysoitaessa on kiinnitettävä huomiota muihinkin mahdollisiin virhelähteisiin kuin kohinaan. Virhettä voi tulla kahden eri prosessisuureen, A:n ja B:n, samanaikaisesta, mutta toisistaan riippumattomasta muutoksesta. Tarkasteltaessa suureen A muutoksen vaikutusta muuhun prosessiin saattaakin suureen B samanaikaisella muuttumisella olla myös merkittävä vaikutus prosessiin. Tällöin tehdään virheellinen johtopäätös A:n merkittävyydestä. Näin käy helposti varsinkin biovoimalaitoksessa polttoaineen laadun vaihdellessa kokeiden aikana. Esimerkiksi seurattaessa turbiinin välittohöyryn määrän vaikutusta tuotettuun sähkötehoon on tarkkailtava myös tuorehöyryn laatua, jonka olisi pysyttävä vakiona. Mikäli polttoaineen laadussa tai syöttömäärässä tapahtuu muutoksia, myös tuorehöyryn arvoissa voi ilmetä vaihtelua. Tällöin kyseinen koe ei ole kelvollinen.

Usein itse mittalaitteiden virhe on melko merkityksetön prosessin kohinaan verrattuna, mutta toisinaan sekin voi olla merkittävä. Esimerkiksi tulipesän lämpötilamittauksen tulos riippuu anturin likaantumisen tuhkapitoisen savukaasun vaikutuksen alaisena, ja myös höyryn virtausmittaukset ovat epätarkkoja. Sen sijaan veden lämpötila- ja painemittaukset ovat oikein asennettuina hyvin luotettavia. Tällöin virhettä tulee mittausvirheen sijaan ennemminkin itse analysointiin liittyvistä inhimillisistä tekijöistä, kuten ulkoisten olosuhteiden huomioon ottamatta jättämisestä.

#### **4.4 Valittu optimointiperiaate**

Yleensä käytännön optimointisovelluksissa on käytetty piirteitä useista eri optimointimenetelmistä, ja siten käytännön ratkaisut voidaan luokitella eri tavoin eri pääryhmien alle. Luvussa 2 käytiin läpi erilaisia voimalaitoksen käytönaikaisen optimoinnin menetelmiä. Näitä menetelmiä soveltaen kehitetään tässä työssä MultiPower CHP -voimalaitosprosessille sopiva optimointitapa. Eräs optimointialgoritmin valintaa rajoittava tekijä on prosessin kohina. Derivaattapohjainen optimointimenetelmä olisi muutoin hyvä, mutta kohina ja osittaisderivaattojen toimintaominaisuudet eivät sovi yhteen, eli algoritmista olisi vaikea saada toimivaa. Sen-

kin käyttömahdollisuutta kannattaa kuitenkin vielä selvittää lisää, sillä laskentaan vaikuttavaa prosessin kohinaa on mahdollista vaimentaa esimerkiksi ottamalla datasta kymmenen minuutin liukuva keskiarvo. Toinen vaihtoehto on valita suora, derivaattoja käyttämätön menetelmä. Nyt valittava optimointitapa on suora deterministinen menetelmä, jollaisesta tässä esitetään havainnollisena esimerkkinä Hooke-Jeeves-niminen algoritmi.

Hooke-Jeeves-menetelmä on suora haku, joka aloittaa optimipisteen haun jostakin alkupisteestä ja tutkii jokaisen koordinaattiakselisuunnan tietyllä askelpituudella. Kaikkien positiivisten ja negatiivisten suuntien kokeiltuja pisteitä verrataan ja näin löydetään paras piste. Mikäli uusi piste on parempi kuin alkuperäinen lähtöpiste, selvitetään seuraavaksi, antaako siirtymisen edelleen samaan suuntaan hyvän tuloksen. Mikäli mikään kokeilluista pisteistä ei anna alkuperäistä parempaa tulosta, askeleen kokoa pienennetään ja vertailupisteet haetaan uudestaan. Kuvassa 20 on esitetty etsinnän pseudokoodi, ja kuvassa 21 on etsinnän tuloksena saatava polku. Menetelmän ongelmana saattaa olla alati pienenevä askelkoko oltaessa hyvin lähellä etsittävää funktion minimiä. Kun minimi siirtyy eri kohtaan, menetelmä ei välttämättä enää osaa kasvattaa askelkokoaan. Siksi askelkoon muutosta ei pitäisi pakottaa pieneneväksi. (Lampinen ja muut 2005, s. 15)

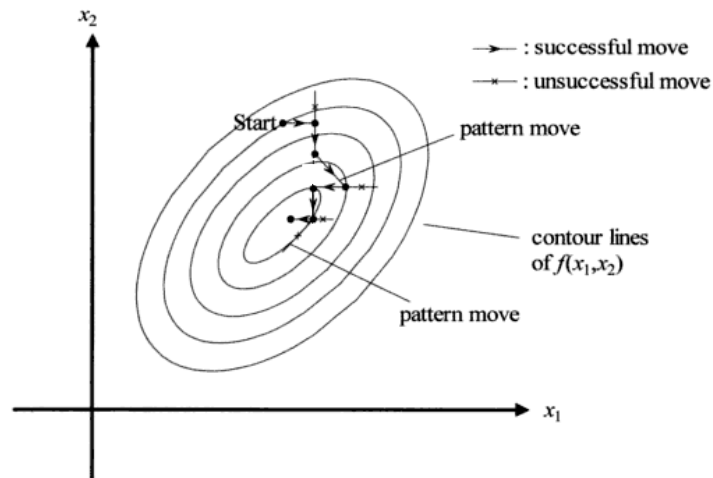
```

...
while (h > h_min) //as long as step length is still not small enough
{
    x_1 = explore(x_0, h); //explore the parameter space
    if (f(x_1) < f(x_0)) //if improvement could be made
    {
        x_2 = x_1 + (x_1 - x_0); //make differential pattern move
        if (f(x_2) < f(x_1)) x_0 = x_2;
        else x_0 = x_1;
    }
    else h = h*reduction_factor;
}
...

function explore(vector x_0, vector h)
{ //---note that e_i is the unit vector for coordinate i---
  for (i=0; i<D; i++) //for all D dimensions
  {
    if (f(x_0+e_i*h) < f(x_0)) x_0 = x_0 + e_i*h; //check coordinate i
    else if (f(x_0-e_i*h) < f(x_0)) x_0 = x_0 - e_i*h;
  }
  return(x_0);
}

```

**Kuva 20.** Hooke-Jeeves-metodin pseudokoodi. (Lampinen ja muut 2005, s. 15)



**Kuva 21.** Hooke-Jeeves-metodilla tehty haku. Positiivisesta akselin suunnasta etsitään aina ensin (kuvaa muokattu). (Lampinen ja muut 2005, s. 16)

Normaalisti käytön aikana säätimien ohjauksen optimaalinen suunta voidaan selvittää kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on laskea säätimelle suunta laitosmallin, kustannusfunktion ja herkkyyksianalyysin tulosten perusteella, kuten seuraavissa luvuissa tullaan kertomaan. Jos tämä laskenta tuottaa odotusten vastaisesti huononevan katteen, eli optimointitapa ei tuota toivottua tulosta, siirrytään käyttämään optimointialgoritmia katteen parantamiseksi. Toinen tapa on hyödyntää Info-palvelimella olevaa historiatietokantaa, josta saadaan valmiita kokemusperäistä tietoa säätimien vaikutuksesta laitoksen kokonaistalouteen. Aivan uuden voimalaitoksen käyttöönotossa ei tätä järjestelmää voida hyödyntää, koska silloin historiadataa ei ole vielä kertynyt riittävästi vertailukohteeksi.

Kun automaatiojärjestelmä on otettu käyttöön, dataa kertyy päivittäin lisää ja samankaltaiset ajotilanteet alkavat toistua toisaalta päivittäin, toisaalta viikoittain tai vuodenajoittain. Nykyhetken ja historian hetkien välillä vertailtavia asioita ovat lähinnä ulkoiset olosuhteet ja vaatteet, kuten ulkoilman lämpötila, polttoaineen lämpöarvo, asiakkaiden tehontarve sekä tuotusta sähköstä ja lämmöstä saadut hinnat. Nämä ovat osittain samoja asioita kuin mistä voidaan saada ennustetietoja ennustavaa säätöä varten. Näin ennusteita voidaan jo valmiiksi verrata mahdollisimman samankaltaiseen tilanteeseen menneisyydessä, ja siten opitun tiedon pohjalta suunnitellaan voimalaitoksen tuotanto esimerkiksi seuraavalle vuorokaudelle tai pidemmälle aikavälille. Mikäli ennustava säätö on käytössä, voidaan myös säädössä käytettäviä ohjausarvoja ennustaa historiadatan perusteella.

Historiadatasta haetaan nykytilannetta parhaiten vastaava tilanne ja sieltä luetaan säätimien silloiset asetusarvot. Nämä vanhat asetusarvot otetaan käyttöön uudelleen nykyhetkenä. Samoin historiasta selvitetään tilanteeseen sopiva ohjaus. Tällöin varsinkin muutostilanteissa vältetään hidas ja vähittäinen iterointi kohti asetusarvoa, sillä sopiva ohjaus otetaan heti käyttöön. Kun historiaan perustuva kokemustieto on hyödynnetty, aletaan prosessia säätää vielä sitäkin paremmaksi, tarkalleen tähän hetkeen sopivaksi. Asetusarvon on tarkoitus tulla sellaiseksi, että tuotannosta saatava kate optimoituu.

Optimointi on säätöä määrittävä tekijä, eli optimoinnin tuloksena saadaan ulkoisista tekijöistä riippuvat asetusarvot pääsäätimille. Näiden asetusarvojen suuntaan prosessia ohjataan seuraavan minuutin ajan. Optimointiin tarvittavat säätöpiirit ja muut tiedot on kerrottu luvussa 8.1. Historiadan käytön perusajatuksena on nopeuttaa optimointiprosessia. Iteraatio kohti kunkin säätimen optimiasetusarvoa voi olla hidasta, mutta kokemuseräisen tiedon avulla voidaan päästä yhdellä harppauksella hyvin lähelle optimipistettä, jolloin ohjaus nopeutuu.

## 5 LAITOKSEN TOIMINNAN TEKNINEN KUVAUS

Tämän työn käytännön osuudessa kehitetty tuotannon optimointimenetelmä on laitosmalliin ja kustannusfunktioon perustuva menetelmä, jonka avulla tullaan myöhemmin tämän diplomityön jälkeen kehittämään voimalaitoksen käytönaikainen, automatisoitu versio. Kuten edellisessä luvussa 4.4 mainittiin, historiadatan hakuun perustuvaa tilastollista menetelmää ei voida käyttää laitoksen käyttöiän alussa eikä muutoinkaan uusissa ulkoisissa olosuhteissa. Tällöin optimointi suoritetaan perustuen laitos- ja talousmalleihin. Jos malleihin perustuva prosessin optimointikaan ei tuota joka minuutti paranevaa käyttökatetta ympäristöolosuhteiden pysyessä tasaisina, siirrytään käyttämään luvussa 4.4 esiteltyä optimointialgoritmia.

Käytännössä voimalaitoksella laitosmalli tarkoittaa prosessin mittaustietojen perusteella käytönaikaisesti Info-palvelimella tehtävää prosessin taselaskentaa, josta saadaan tuloksina muun muassa tiedot prosessin sisäisistä sekä sisään ja ulos tulevista prosessin massavirroista ja tehoista. Koska tätä optimointijärjestelmää ei nyt tehdä suoraan oikealle voimalaitokselle, korvataan yksi yhtenäinen laitosmalli kahden eri mallinnusohjelman tuloksilla. Toinen ohjelmista on kattilan suunnitteluun, mitoitukseen ja simulointiin käytetty Power Boiler Designer (PBD), ja toinen on vesi-/höyryprosessin mallinnukseen ja simulointiin käytetty Tur-sim. Ohjelmiin annetaan lähtötietoina BP8-prosessin alkuperäiseen määrittelyyn liittyvät arvot, prosessi mallinnetaan ja erilaisia prosessitilanteita simuloidaan. Tursim-ohjelmalla tehty prosessikaavio testien vertailutilassa on liitteessä II, ja siitä selviää BP8:n kyseisen ajotilan-teen käyttötietoja. Malleista saadut tulokset eli prosessiarvot ja tehot siirretään Excel-taulukkolaskentaohjelmaan. Excelissä tietoja käytetään laitoksen toiminnan taloudellisen kokonaiskatteen ratkaisemiseen, mistä kerrotaan luvussa 6.

Laitosmalliin alkuarvona annetaan esimerkiksi vaadittu tuotettava sähkö- tai lämpöteho, jolloin polttoaine- ja tuorehöyrymäärät muuttuvat. Vaihtoehtoisesti polttoainetehoa pidetään vakiona, jolloin tuotetun energiamäärän annetaan muuttua. Näitä muutoksia ja niiden suuruuksia selvitetään herkkyytarkastelussa, josta kerrotaan luvussa 6.3. Merkittäviä prosessimuuttujia ovat edellä mainittujen tehojen ohella muun muassa välittohöyryn paine ja massavirta, syöttöveden lämpötila, lauhteen ja ilman esilämmittimien tehot sekä pääjäähdytysveden massavirta ja lämpötila. Jälkimmäinen lämpötila riippuu merkittävästi ulkoilman lämpötilasta, kun vesikiertoa jäähdytetään radiaattoreilla. Samoin ulkoilman lämpötilasta riippuu tuoilman lämpötila, vaikka palamisilma otetaankin kattilahuoneesta.

Periaatteessa muuttujia voisivat olla myös laitoksen kannalta pysyvämmät tekniset ratkaisut, kuten lämmönsiirtimien koko. Lämmönsiirtopintojen uusi mitoitus johtaisi kuitenkin laitoksen investointikustannuksen muutokseen ja uuteen laitoksen takaisinmaksuaikaan. Tällaisia muuttujia ei nyt huomioida. Muuttujina ei myöskään pidetä BP8-prosessin oleellisia suunnitteluparametreja, kuten tuorehöyryn painetta ja lämpötilaa. Rajoitteensa optimointialueeseen tuovat lisäksi mahdolliset sähkön, lämmön ja höyryn tuotantosopimukset.

Tuotantoa optimoitaessa pyritään periaatteessa maksimaaliseen prosessihyötysuhteeseen ja tuotetun energiamäärän kannalta optimaaliseen rakennusasteeseen. Toisaalta, kun huomioidaan lisäksi taloudelliset tekijät, eri energiamuodoista saatavat hinnat voivat johtaa erilaiseen, talouden kannalta optimaaliseen rakennusasteeseen. Toisin sanoen tekninen ja taloudellinen optimointi voivat antaa eri tulokset. Tämän työn optimointiratkaisussa pyritään nimenomaan ottamaan huomioon taloudelliset tekijät ja optimoimaan prosessi niiden kannalta.

## 5.1 Prosessista laskettavat tunnusluvut

Prosessidatan perusteella lasketaan tiettyjä tunnuslukuja, jotka kertovat prosessin teknisestä hyvyydestä. Niitä voidaan pitää laitospölyn välituloksina prosessia optimoitaessa, ja niiden muutoksia seurataan samoin kuin katteenkin muutoksia. Tunnuslukuja ei kuitenkaan suoraan pidetä optimoinnin kohteina tai ehtoina.

Kattilahyötysuhde kertoo, kuinka suuri osuus polttoaineen tehosta siirtyy kattilan vesi/höyrypiiriin.

$$\eta_{\text{Katt}} = \frac{\Phi_{\text{Tuhö}}}{\Phi_{\text{Pa}}} = \frac{\Phi_{\text{Tuhö}}}{\Phi_{\text{Pa_pää}} + \Phi_{\text{Pa_apu}}}, \quad (10)$$

missä	$\eta_{\text{Katt}}$	Kattilahyötysuhde	[%]
	$\Phi_{\text{Tuhö}}$	Kattilassa veteen ja höyryyn siirtyvä teho	[MW <sub>Hö</sub> ]
	$\Phi_{\text{Pa}}$	Polttoaineteho	[MW <sub>Pa</sub> ]
	$\Phi_{\text{Pa_pää}}$	Pääpolttoaineen teho	[MW <sub>Pa</sub> ]
	$\Phi_{\text{Pa_apu}}$	Apupolttoaineen teho	[MW <sub>Pa</sub> ]

Sähkön bruttotuotannon hyötysuhde on tuotetun kokonaissähkötehon suhde kokonaispolttoainetehtoon.

$$\eta_{\text{Sä}_{\text{br}}} = \frac{P_{\text{Sä}_{\text{br}}}}{\Phi_{\text{Pa}}}, \quad (11)$$

missä	$\eta_{\text{Sä}_{\text{br}}}$	Sähkön bruttotuotannon hyötysuhde	[%]
	$P_{\text{Sä}_{\text{br}}}$	Bruttosähköteho	[MW <sub>Sä</sub> ]

Lämmöntuotannon hyötysuhde on tuotetun kaukolämpötehon suhde kokonaispolttoainetehtoon.

$$\eta_{\text{Lä}} = \frac{\Phi_{\text{Lä}}}{\Phi_{\text{Pa}}}, \quad (12)$$

missä	$\eta_{\text{Lä}}$	Lämmöntuotannon hyötysuhde	[%]
	$\Phi_{\text{Lä}}$	Kaukolämpöteho	[MW <sub>Lä</sub> ]

Höyryntuotannon hyötysuhde on asiakkaalle tuotetun prosessihöyryn suhde kokonaispolttoainetehtoon.

$$\eta_{\text{Hö}} = \frac{\Phi_{\text{Hö}}}{\Phi_{\text{Pa}}}, \quad (13)$$

missä	$\eta_{\text{Hö}}$	Höyryntuotannon hyötysuhde	[%]
	$\Phi_{\text{Hö}}$	Höyryteho	[MW <sub>Hö</sub> ]

Kokonaishyötysuhde huomioi kaiken tuotetun tehon suhteessa polttoainetehtoon ja on siksi parempi kuin yksittäisten tehokomponenttien hyötysuhteet.



$$\eta_{\text{Kok\_br}} = \frac{P_{\text{Sä\_br}} + \Phi_{\text{Lä}} + \Phi_{\text{Hö}}}{\Phi_{\text{Pa}}} \quad (14)$$

missä  $\eta_{\text{Kok\_br}}$  Kokonaishyötysuhde [%]

Rakennusaste tarkoittaa tuotetun sähkötehon suhdetta tuotettuihin lämpötehoihin eli kuumaan veteen ja mahdolliseen prosessihöyryyn.

$$\alpha = \frac{P_{\text{Sä\_br}}}{\Phi_{\text{Lä}} + \Phi_{\text{Hö}}} \quad (15)$$

missä  $\alpha$  Rakennusaste (power-to-heat ratio) [-]

Polttoainesuhde kuvaa sitä osuutta, jolla voimalaitos on käynyt pää- eli biopolttoaineella verrattuna polttoaineen kokonaiskulutukseen. Kun polttoainesuhde on mahdollisimman suuri, fossiilista apupolttoainetta on käytetty vain vähän. Tämä on edullista kustannusten ja päästöjen kannalta.

$$z_{\text{Pa}} = \frac{E_{\text{Pa\_pää}}}{E_{\text{Pa\_pää}} + E_{\text{Pa\_apu}}} = \frac{\Phi_{\text{Pa\_pää}} \cdot t_{\text{Pa\_pää}}}{\Phi_{\text{Pa\_pää}} \cdot t_{\text{Pa\_pää}} + \Phi_{\text{Pa\_apu}} \cdot t_{\text{Pa\_apu}}} \quad (16)$$

missä  $z_{\text{Pa}}$  Polttoainesuhde [%]

$E_{\text{Pa\_pää}}$  Pääpolttoaineen energia [MWh<sub>Pa</sub>]

$E_{\text{Pa\_apu}}$  Apupolttoaineen energia [MWh<sub>Pa</sub>]

$\Phi_{\text{Pa\_pää}}$  Pääpolttoaineen teho [MW<sub>Pa</sub>]

$t_{\text{Pa\_pää}}$  Pääpolttoaineen käyttöaika [h]

$\Phi_{\text{Pa\_apu}}$  Apupolttoaineen teho [MW<sub>Pa</sub>]

$t_{\text{Pa\_apu}}$  Apupolttoaineen käyttöaika [h]

## 5.2 Rajoitteet

Säätöjärjestelmää ohjelmoitaessa DCS:ään asetetaan kullekin säätimelle sen ylä- ja alarajat. Rajoitteita asetetaan turvallisuuden ja prosessin hallittavuuden vuoksi. Voimalaitoksen käytössä on huomioitava seuraaviin teemoihin liittyviä rajoitteita (Weber ja Woll 2006, s. 2 - 3):

- Polttoaineen kulutukseen ja kapasiteettiin liittyvät rajoitteet:
  - o Maksimi- ja minimisähkötehot
  - o Polttoaineen kulutus
  - o Polttoaineen kulutuksen ja kattilan tuottaman lämmön välinen suhde
  - o Tuotetun lämmön maksimi- ja minimiarvot
- Ylös- ja alasajojen sekä kuormanvaihdon rajoitteet:
  - o Ylös- ja alasajo- sekä kuormanvaihtoprosessit
  - o Minimikäyttöajat
- Väliottoja sisältävän lauhdeturbiinin rajoitteet:
  - o Polttoaineen kulutus
  - o Käytön maksimi- ja minimirajoitteet
- Tuotannon ja kulutuksen tasapaino
  - o Sähkö
  - o Lämpö

Toisen lähteen mukaan prosessille voidaan antaa seuraavanlaisia rajoitteita ja ehtoja (Hashemi 2009, s. 225):

- Tuotannon ylä- ja alarajat energiantuotantolaitteille
- Lämpövaraston koon ja tyhjennysnopeuden rajoitteet
- Energian kysyntätarpeet on tyydytettävä
- Rakennussuhde
- Kun sähkökuorma on alarajaansa pienempi ja sähkön myyntihinta on alhainen, CHP-laitos ajetaan alas
- Kun lämpökuorma on alarajaansa pienempi, kattilalaitos ajetaan alas
- Lämmönhukka on sallittua vain silloin, kun lämpövarasto on täynnä

## 6 TAVOITEFUNKTIO JA SEN RATKAISU

Tässä työssä esitetty optimointimenetelmä perustuu voimalaitoksen tekniseen laitosmalliin sekä taloudelliset tuotot ja kustannukset huomioivaan talousmalliin. Laitosmalli, jota käytiin läpi kappaleessa 5, tarkoittaa käytännössä prosessin määrittelyä eli prosessin taselaskentaa. Voimalaitoksen tase lasketaan kerran minuutissa, ja laskennan tuloksia käytetään prosessin ohjaukseen. Teknisen ja taloudellisen mallin yhdistäminen ja muu menetelmän periaate on esitetty kaaviona kuvassa 22.

Tehtyjen mittausten perusteella tiedetään prosessin todellinen tila, ja mittausdata viedään sisääntulona laitosmalliin. Laitosmalli sisältää koko prosessin taselaskennan, joka on jo määriteltä ennen tätä diplomityötä. Laitosmallissa tehtävän laskennan tuloksena saadaan teho- ja tunnuslukuja, joiden suuruutta ja muutosta seurataan. Tarvittavat tulokset viedään talousmalliin, jossa lasketaan voimalaitoksen käyttökate reaaliaikaiset hintatiedot huomioon ottaen. Talousmallin perusteella annetaan säätimille uudet asetusarvot eli suunnat ja suuruudet, joiden tarkoituksena on tuottaa reunaehtojen rajoissa entistä parempi kate seuraavan minuutin aikana. Optimoinnin kannalta oleellisin tieto on suunta, jota kohden säädin pyrkii seuraavan säätösyklin ajan.

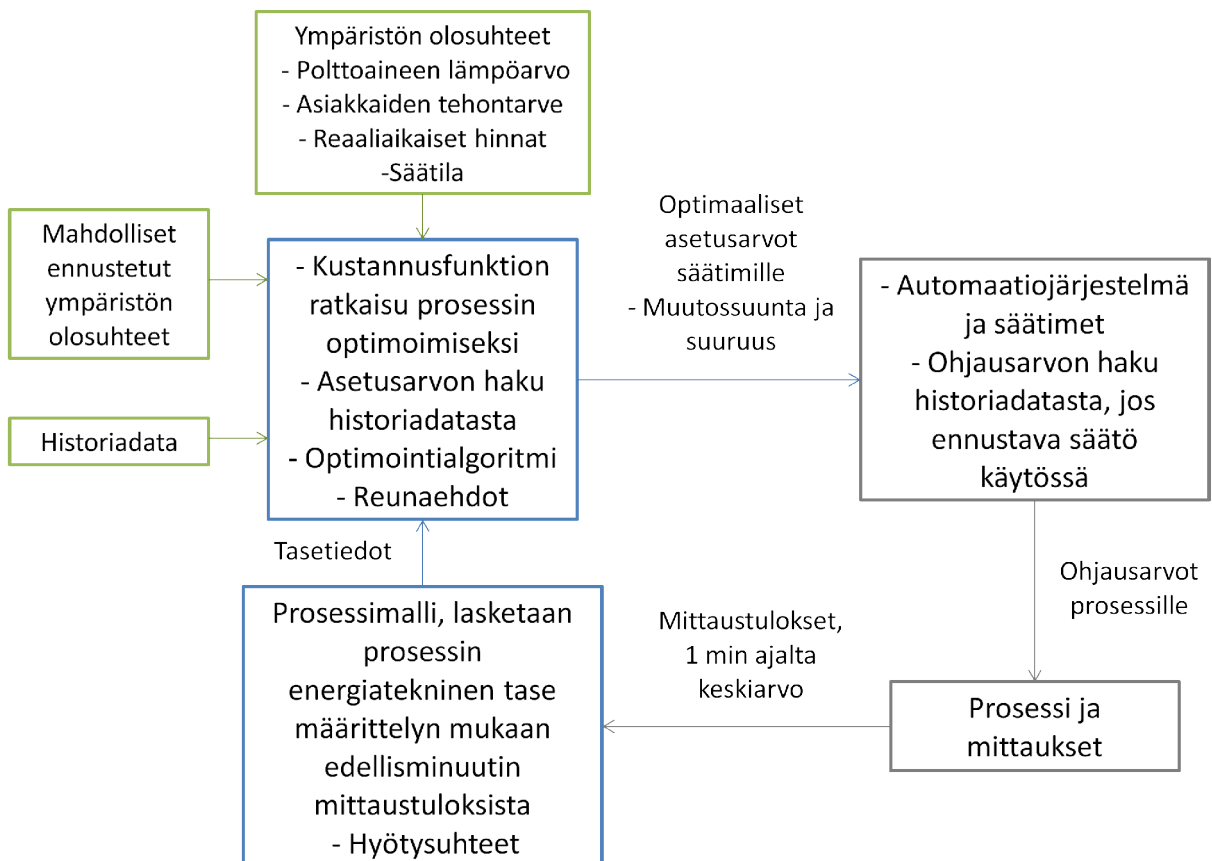
Mikäli pelkkiä kustannuksia yritettäisiin optimoida eli saada mahdollisimman alhaisiksi, jouduttaisiin helposti ristiriitaan tuotannon maksimoinnin kanssa. Alhaiset kustannukset voivat nimittäin merkitä huonoa laatua esimerkiksi polttoaineessa tai prosessivedessä, ja huono laatu ennustaa vakavia ongelmia. Siksi prosessille asetetaan maksimi- ja minimiarvorajoitteita, kuten luvussa 5.2 mainittiin.

Talousmalliin tuodaan tasetietojen lisäksi tiedot muista ulkoisista olosuhteista eli polttoaineen lämpöarvosta, asiakkaiden tehontarpeesta ja säätilasta. Jos ennustava säätö on käytössä, talousmalliin tuodaan myös ennusteet tulevista ulkoisista olosuhteista, ja näiden perusteella säätöjärjestelmä ennakoi muutoksia muuttamalla ohjausarvojaan ajoissa. Siten järjestelmällä on aikaa reagoida muutoksiin ilman yllätyksistä aiheutuvaa häiriötä.

Optimointiin liittyvät laskennat päätettiin tehdä kerran minuutissa. Näin lyhyellä aikavälillä puhutaan käytönaikaisesta online-optimoinnista. Pitempääkin aikaväliä on hyödyllistä tarkastella, mutta tällöin tulee huomioitavaksi hieman erilaisia tekijöitä. Esimerkiksi viikkoa tai vuotta optimoitaessa on huomioitava seisakkeihin kuluva aika, joka ei vaikuta lyhyellä aikavälillä. Jo tunnissa ulkoiset olosuhteet ehtivät muuttua merkittävästi. Minuuttia lyhyemmällä aikavä-

leillä taas prosessi on melko staattinen, eikä tietomäärä juuri lisääntyisi, vaikka laskennat tehtäisiin esimerkiksi sekunnin välein.

Käytännön toteutusvaiheessa mitattujen prosessiarvojen siirtämisessä laitosmalliin, siellä tapahtuvassa laskennassa, laskennan tulosten siirtämisessä talousmalliin ja reaaliaikaisten hintatietojen sekä tarvittavien sää-, kulutus- ja hintaennusteiden hakemisessa tullaan käyttämään Metso Automaation kehittämiä tiedonkeruun työkaluja, mutta sitä ei tehdä vielä tämän diplomityön aikana.



**Kuva 22.** Laitos- ja talousmallien yhdistäminen, ulkopuoliset prosessia määrittävät olosuhteet sekä säätöjärjestelmä.

Koska tässä diplomityössä kehitettyä optimointijärjestelmää ei vielä voida toteuttaa oikealle voimalaitokselle, todelliset automaatio- ja informaatiojärjestelmät korvataan muilla ohjelmistoilla. Laitosmallista, eli tässä PBD:stä ja Tursimista, saadut prosessitiedot siirretään Exceltaulukkolaskentaohjelmaan, jossa niiden perusteella lasketaan laitoksen kate. Tärkeimpiä

Tursimista saatavia tietoja ovat sähkö- ja lämpötehot. PBD:stä saadaan polttoaineteho sekä tuhkan ja savukaasun massavirrat ja savukaasun hiilidioksidipitoisuus. Laskentaan tarvitaan myös muita alkuarvoja kuin prosessitietoja, esimerkiksi hintoja ja käyntitietoja. Osa Excel-laskennan alkuarvoista on arvioitu asiantuntijalausunnan tai kokemuksen perusteella, kuten kemikaalien ja petihiekan kulutukset sekä lisä- ja jätevesien massavirrat.

Kukin tuloa tai kustannusta aiheuttava teho ja massavirta kerrotaan tarkasteluajalla eli yhdellä minuutilla. Näin saadut energiat ja massat kerrotaan vielä ominaishinnallaan, jolloin saadaan kyseinen tulo tai kustannus minuutissa. Laskemalla voimalaitoksen kassavirran osat yhteen muodostetaan kustannusfunktio, jonka tuloksena saadaan kate.

## 6.1 Kustannusfunktio

Kustannusfunktioita voidaan käsitellä suurimman taloudellisen tuoton kohdefunktiona, jota optimoidaan hetkittäin. Kohdefunktion termit ovat laitostallista saatavia prosessiarvoja sekä ulkoisia tekijöitä kuten hintoja. Käytännössä kohdefunktio sisältää rajoitteita, niin että esimerkiksi kaukolämpöä tai prosessihöyryä tuotetaan joka tapauksessa tarvittava määrä, vaikkei se olisikaan kannattavin ratkaisu. Vaihtoehtoisia tapoja toteuttaa voimalaitoksen prosessin optimointi voisivat olla esimerkiksi kohdefunktion muodostaminen parhaalle prosessihyötysuhteelle tai suurimmalle yhteenlasketulle tuotetulle teholle. Kustannusfunktioon liittyvää teoriaa ja esimerkkejä on käyty läpi luvussa 2.1.1.

Suurimman taloudellisen tuoton kohdefunktio:

$$\begin{aligned}
 \text{MAX}(K_{\text{Kate}}) = & \\
 & K_{\text{Sä\_myynti\_net}} + K_{\text{Lä\_myynti}} + K_{\text{Hö\_myynti}} + K_{\text{Tuki}} + K_{\text{Pääst\_myynti}} - \\
 & K_{\text{Inv}} - K_{\text{Kikut}} - K_{\text{Huolto}} - K_{\text{Pa\_pää}} - K_{\text{Pa\_apu}} - K_{\text{Live}} - K_{\text{Hiekka}} - \\
 & K_{\text{Kemik}} - K_{\text{Pääst\_osto}} - K_{\text{Tuhka}} - K_{\text{Jäve}} - K_{\text{Muut mukut}} - K_{\text{Ok}} - K_{\text{Sä\_siirto\_net}} - K_{\text{Sä\_vero\_net}} - K_{\text{Sä\_osto}} - \\
 & K_{\text{Lä\_osto}} - K_{\text{Pa\_lä\_vero}}, \tag{17}
 \end{aligned}$$

missä	$K_{\text{Kate}}$	Laitoksen käytön kate	[Eur]
	$K_{\text{Sä\_myynti\_net}}$	Sähkön myynnistä saatava tuotto	[Eur]

$K_{Lä\_myynti}$	Lämmön myynnistä saatava tuotto	[Eur]
$K_{Hö\_myynti}$	Höyryn myynnistä saatava tuotto	[Eur]
$K_{Tuki}$	Bioenergian tuotannosta maksettu tuotantotuki	[Eur]
$K_{Pääst\_myynti}$	Päästökaupan myyntituotto	[Eur]
$K_{Inv}$	Investoinnin takaisinmaksukustannus (pääomakustannus)	[Eur]
$K_{Kikut}$	Kiinteät kustannukset, kuten henkilöstökulut, vuokra ja korot	[Eur]
$K_{Huolto}$	Huoltokustannukset: työ, työkalut ja varaosat	[Eur]
$K_{Pa\_pää}$	Pääpolttoainekustannus	[Eur]
$K_{Pa\_apu}$	Apupolttoaine- (öljy / kaasu) kustannus	[Eur]
$K_{Live}$	Lisäveden ostokustannus	[Eur]
$K_{Hiekka}$	Petihiekan ostokustannus	[Eur]
$K_{Kemik}$	Kemikaalien ostokustannus	[Eur]
$K_{Pääst\_osto}$	Päästökaupan ostokustannus	[Eur]
$K_{Tuhka}$	Tuhkan loppukäsittelykustannus	[Eur]
$K_{Jäve}$	Jäteveden käsittelykustannus	[Eur]
$K_{Muut\ mukut}$	Muut muuttuvat kustannukset	[Eur]
$K_{Ok}$	Omakäyttösähkönkulutuksen kustannus	[Eur]
$K_{Sä\_siirto\_net}$	Sähkönsiirtokustannus	[Eur]
$K_{Sä\_vero\_net}$	Sähkövero	[Eur]
$K_{Sä\_osto}$	Sähkön verkostaostokustannus	[Eur]
$K_{Lä\_osto}$	Kaukolämmön verkostaostokustannus	[Eur]
$K_{Pa\_lä\_vero}$	Lämmöntuotantoon käytetyn fossiilisen polttoaineen valmistevero	[Eur]

### **Kustannusfunktion termit**

Seuraavaksi käydään läpi kustannusfunktion termit sekä esitetään muutamia ajatuksia tulojen parantamiseksi sekä kustannusten vähentämiseksi. Laitoksen käyttökateen  $K_{\text{Kate}}$  laskemista varten käydään läpi myös termien laskentaperiaatteet.

Tehoihin liittyvät termit  $K_{\text{Sä\_myynti\_net}}$ ,  $K_{\text{Lä\_myynti}}$ ,  $K_{\text{Hö\_myynti}}$ ,  $K_{\text{Pa\_pää}}$  ja  $K_{\text{Pa\_apu}}$  lasketaan kukin samankaltaisten yhtälöiden mukaan energian ja ominaiskustannusten perusteella. Kuhunkin tehoon liittyvät omat säätöpiirinsä. Kuten luvussa 8 tullaan toteamaan, osa säätöpiireistä on muita tärkeämpiä, ja ylimmän ohjesäännön tehojen suuruuksista antavat optimointilaskenta ja sen raja-arvot. Tärkeintä on säätää rakennusaste sähkön- ja lämmöntuotannon välillä sel-laiseksi, että kyseisellä hetkellä saavutetaan paras mahdollinen kate.

Esimerkiksi laitosmallissa oleva sähköenergiatermi on funktio, joka riippuu prosessin muista arvoista. Kullekin säädölle määritetään muutosnopeus sekä suunta, johon sen pitää mennä seuraavan minuutin ajan, jotta päästäisiin lähemmäs maksimaalista katetta. Tämä kokonaisuus määrittää tällöin myös tuotetun sähköenergian suuruuden. Mikäli samaan aikaan halutaan maksimoida sekä sähkön- että lämmöntuotantoa, riippuu valittu rakennusaste eri energiamuotojen hinnoista ja kokonaiskannattavuudesta. Kunkin asetusarvon muutosnopeus viritetään optimointijärjestelmän käyttöön otossa sellaiseksi, että se vastaa prosessin säätimen muutosnopeutta. Toisin sanoen optimointi ei saa epästabiloida prosessia, vaan optimointi tulee virittää prosessia vastaavaksi.

Alla lasketaan esimerkkinä sähkön myyntiin liittyvä kustannus. Sähkön myynnistä saatavan tuoton funktio:

$$K_{\text{Sä\_myynti\_net}} = E_{\text{Sä\_pätö\_net}} \cdot k_{\text{Sä\_pätö}} + E_{\text{Sä\_lois\_net}} \cdot k_{\text{Sä\_lois}}, \quad (18)$$

missä	$K_{\text{Sä\_myynti\_net}}$	Sähkön myynnistä saatava tuotto	[Eur]
	$E_{\text{Sä\_pätö\_net}}$	Myytävä nettopätösähköenergia	[MWh <sub>Sä</sub> ]
	$k_{\text{Sä\_pätö}}$	Pätösähkön ominaismyyntihinta	[Eur/MWh <sub>Sä</sub> ]
	$E_{\text{Sä\_lois\_net}}$	Myytävä nettoloissähköenergia	[MWh <sub>Sä</sub> ]
	$k_{\text{Sä\_lois}}$	Loissähkön ominaismyyntihinta	[Eur/MWh <sub>Sä</sub> ]

Pätösähköenergia  $E_{Sä\_pätö\_net}$  on pätöteho kertaa aika. Samalla tavalla lasketaan loissähköenergia  $E_{Sä\_lois\_net}$ . Muiden energiamuotojen osalta ei huomioida erikseen pätö- ja loistermejä. Sähkötehoista käytetään merkintää  $P_{Sä}$  ja lämpötehoista merkintää  $\Phi$ , esimerkiksi kaukolämmöstä  $\Phi_{Lä}$  ja polttoainetehosta  $\Phi_{Pa}$ . Ehtoina sähkön tuotannossa ovat sähköverkkoyhtiön kanssa sovitut tuotannon ylä- ja alarajat ja lämmön ja höyryn tuotannossa sopimukset asiakkaiden kanssa.

$$E_{Sä\_pätö\_net} = P_{Sä\_pätö\_net} \cdot t_{Sä}, \quad (19)$$

missä	$P_{Sä\_pätö\_net}$	Pätöteho	[MW <sub>Sä</sub> ]
	$t_{Sä}$	Sähkön tuotannon saatavuus	[h]

Pääpolttoainekustannusta voidaan vähentää parantamalla kattilakyötysuhdetta prosessiteknisin ratkaisuin. Käytönaikaisessa laskennassa on huomioitava, kumpi mahdollisista polttoaineista on kulloinkin käytössä vai ovatko kumpikin, ja kustannus lasketaan vain kulloinkin käytössä olevalta polttoaineelta. Lyhyen aikavälin optimoinnissa käyttöaika eli yksi minuutti on lähes verrattavissa käyntitietoon: laskentaminuutilta kertyvä kustannus lasketaan aina sen mukaan, onko kyseinen massavirta käytössä minuutin aikana vai ei. Esimerkiksi startti- ja kuormapolttimet ja niiden tarvitsema apupolttoaine ovat käytössä vain ajoittain. Polttimien käyntitiedot ovat siis toisinaan 0, jolloin kyseisen minuutin kustannusta ei lasketa, ja toisinaan 1, jolloin kustannus lasketaan. Sen sijaan petihiekan lisäyksestä ja pohjatuhkan poistosta lasketaan keskiarvo pitkälle aikavälille, jolloin niiden ”käyntitietoja” ei tarvitse huomioida.

Apupolttoainetta eli öljyä tai kaasua pyritään käyttämään mahdollisimman vähän sen kalliin hinnan ja haitallisten ympäristövaikutusten vuoksi. Kun turhia kattilan ylös- ja alasajoja välteään, käynnistyspoltinta tarvitsee käyttää harvoin. Jos lisäksi pääpolttoaine on hyvälaatuista, tukipolttimen käyttö ja samalla apupolttoainekustannus vähenee. Automaattisessa laskennassa kustannuksen huomioimisen ehtona pitää olla jommankumman polttimen positiivinen käyntitieto.

Bioenergian tuotannosta maksetaan tuotantotukea  $K_{Tuki}$  myydyltä sähköenergialta, energia [MWh<sub>Sä</sub>] kertaa ominaistuotantotuki [Eur/MWh<sub>Sä</sub>] yhtälön (18) tavoin. Tuotantotuen maksuehtona voi olla laitoksen tietty vähimmäiskokonaishyötysuhde.



Päästökaupan myyntituotto  $K_{\text{Pääst\_myynti}}$  riippuu savukaasujen mukana päästetystä hiilidioksidimäärästä. Yleisesti ottaen Euroopan Unionin päästökauppa-alueella pienet, alle 50 MW:n voimalaitokset eivät osallistu päästökauppaan, jolloin termi voidaan merkitä nolllaksi. Jos päästökauppaan osallistutaan, on tarkoituksenmukaista vähentää päästöjä käytönaikaisesti mahdollisimman hyvällä palamisella. Mikäli oma kiintiö alitetaan, voidaan oikeuksia myydä. Hiilidioksidimäärä saadaan kertomalla sen massavirta  $[t_{\text{CO}_2}/\text{h}]$  tarkasteltavalla ajanjaksolla, joka nyt on yksi minuutti eli 0,0167 tuntia. Samoin lasketaan mahdollisesta kiintiön ylityksestä aiheutuva ostokustannus  $K_{\text{Pääst\_osto}}$ , jossa huomioidaan kiintiön ylittävä hiilidioksidimäärä  $M_{\text{CO}_2\text{-yli}}$ .

$$K_{\text{Pääst\_myynti}} = M_{\text{CO}_2\text{-ali}} \cdot k_{\text{Pääst\_myynti}} \quad (20)$$

missä	$K_{\text{Pääst\_myynti}}$	Päästökaupan myyntituotto	[Eur]
	$M_{\text{CO}_2\text{-ali}}$	Kiintiön alittava hiilidioksidimäärä	[t <sub>CO2</sub> ]
	$k_{\text{Pääst\_myynti}}$	Päästökaupan ominaismyyntihinta	[Eur/t <sub>CO2</sub> ]

Samamuotoisella yhtälöllä 20 lasketaan lisäveden, petihiekan ja kemikaalien ostokustannukset  $K_{\text{Live}}$ ,  $K_{\text{Hiekka}}$  ja  $K_{\text{Kemik}}$  sekä tuhkan ja jäteveden käsittelykustannukset  $K_{\text{Tuhka}}$  ja  $K_{\text{Jäve}}$ , eli niiden tarkasteluajanjakson määrä kerrotaan yksikkökustannuksella [Eur/kg]. Lisäveden ostokustannusta voidaan vähentää estämällä mahdollisuuksien mukaan prosessiveden likaantumista sekä kierrättämällä ulospuhallusvettä takaisin. Petihiekan ostokustannusta voidaan vähentää tyhjentämällä vain tarvittava määrä pohjatuhkaa. Hyvälaatuisella polttoaineella pohjatuhkaa ei tarvitse poistaa yhtä paljon kuin huonolaatuisella. Huonolaatuinen polttoaine saattaa sisältää kiviä, metalleja ja muita epäpuhtauksia, joista kaikkea ei onnistuta erottamaan polttoaineenkäsittelyssä. Pohjatuhka voidaan seuloa ja kierrättää kelvollinen hiekka takaisin pesään. Kemikaalikustannus riippuu jonkin verran putkiston kunnosta sekä lisäveden laadusta. Kemikaalien määrää ei kuitenkaan ole järkevää laskea kustannusten vähentämisen toivossa alle suositusten, sillä laitoksen kokonaiskustannuksiin verrattuna kemikaalikustannus on pieni, ja annostelun vähentämisen haittavaikutukset voivat olla hyvin suuret.

Tuhka viedään kaatopaikalle loppusijoitettavaksi. Jos biopolttoaine on ollut hyvälaatuista, sen tuhkaa voidaan mahdollisesti hyödyntää esimerkiksi maantäyttöaineeksi, jolloin käsittelykustannuksia ei välttämättä tule. Jätevettä ei yleensä saa päästää luontoon sellaisenaan ympäristösyistä, vaan se on puhdistettava joko itse tai johdettava viemärillä jätevedenpuhdistamol-

le. Näistä valitaan tilannekohtaisesti helpoin tai kustannustehokkain vaihtoehto. Muut muuttuvat kustannukset  $K_{\text{Muut mukut}}$ , kuten valaistus, lasketaan ominaiskustannustensa ja käyttötietojensa perusteella.

Investoinnin takaisinmaksukustannus  $K_{\text{Inv}}$  on koko vuodelle kohdistuva takaisinmaksumäärä jaettuna tarkasteluajanjakson pituisiin osuuksiin, siis kustannus minuutissa. Kiinteiden kustannusten  $K_{\text{Kikut}}$ , kuten henkilöstökulujen, vuokran ja korkojen määrä ei riipu tuotannosta, vaan pysyy vakiona. Vuotuinen normaali kiinteiden kustannusten määrä jaetaan tarkasteluajanjaksoille samoin kuin investointikustannus. Samoin toimitaan huoltokustannusten  $K_{\text{Huolto}}$  eli huoltotyön, työkalujen ja varaosien kanssa, eli niille arvioidaan vuoden kokonaismaksu, joka jaetaan tarkasteluajanjaksoille. Huoltoseisokkien ajankohdat pyritään valitsemaan edullisesti ja kestoja lyhentämään mahdollisuuksien mukaan.

Omakäyttösähkönkulutuksen kustannuksia  $K_{\text{Ok}}$  voidaan vähentää esimerkiksi taajuusmuuntajakäyttöillä. Pääjäähdytyspiirin lämpötilan asetusarvo kannattaa valita ulkoilman lämpötilan sekä prosessin kokonaisoptimikustannusten mukaan, jolloin radiaattorit pyörivät vain tarpeellisella teholla. Sähkön omakäyttö voidaan laskea joko alla olevan yhtälön mukaan, tai yksinkertaisesti vähentämällä generaattorin tuottamasta bruttotehosta myyty nettoteho. Kun voimalaitoksen automaatiassa omakäyttöteho on jo valmiiksi mitattuna, voidaan omakäyttösähköenergia laskea suoraan kertomalla se tarkasteluajanjaksolla kuten yhtälössä 19. Sopimuksesta riippuen joskus omakäyttösähkökin pitää ostaa. Muutoin se näkyy vain menetettynä sähkön myyntitulona.

$$K_{\text{Ok}} = E_{\text{Ok}} \cdot k_{\text{Ok}} = [E_{\text{Rad}} + E_{\text{Pa-syöttö}} + E_{\text{Tuhkankäs}} + E_{\text{Kompr}} + E_{\text{Ventt}} + E_{\text{Moott}} + E_{\text{Autom}} + E_{\text{Muu ok}}] \cdot k_{\text{Ok}}, \quad (21)$$

missä	$K_{\text{Ok}}$	Omakäyttösähkönkulutuksen kustannus	[Eur]
	$E_{\text{Ok}}$	Omakäyttösähköenergia	[MWh <sub>Sä</sub> ]
	$k_{\text{Ok}}$	Omakäyttösähkön ominaishinta	[Eur/MWh <sub>Sä</sub> ]
	$E_{\text{Rad}}$	Radiaattorikentän kuluttama sähkö	[MWh <sub>Sä</sub> ]
	$E_{\text{Pa-syöttö}}$	Polttoaineen syötön kuluttama sähkö	[MWh <sub>Sä</sub> ]
	$E_{\text{Tuhkankäs}}$	Tuhkankäsittelyn kuluttama sähkö	[MWh <sub>Sä</sub> ]
	$E_{\text{Kompr}}$	Paineilmakompressorin kuluttama sähkö	[MWh <sub>Sä</sub> ]
	$E_{\text{Ventt}}$	Toimilaitteventtiilien kuluttama sähkö	[MWh <sub>Sä</sub> ]

$E_{Moott}$	Muiden kuin radiaattorikentän moottorien käyttämä sähköenergia (muun muassa pumpput ja puhaltimet)	[MWh <sub>Sä</sub> ]
$E_{Autom}$	Automaatiojärjestelmän kuluttama sähkö	[MWh <sub>Sä</sub> ]
$E_{Muu\ ok}$	Muu omakäytösähkö	[MWh <sub>Sä</sub> ]

Sähkönsiirtokustannus  $K_{Sä\_siirto\_net}$  huomioidaan myydyn sähköenergian osalta, ja sen suuruus riippuu verkkoyhtiön kanssa tehdystä sopimuksesta. Se lasketaan yhtälön 18 tavoin siirrettävä sähköenergia kertaa ominaishinta. Sähköveroa  $K_{Sä\_vero\_net}$  tarvitsee mahdollisesti maksaa paikallisesta lainsäädännöstä riippuen myytävän sähköenergian osalta. Myös siihen sovelletaan yhtälöä 18. Mikäli lämmöntuotantoon käytetään pysyvästi fossiilista polttoainetta, siitä pitää mahdollisesti maksaa polttoaineen valmisteveroa  $K_{Pa\_lä\_vero}$ . Tällöin valmistevero lasketaan fossiilisella polttoaineella tuotetun energian  $E_{Pa\_apu}$  osalta.

Kun laitoksen oma energiantuotanto ei ole käynnissä, tarvitsee sähköä ja kaukolämpöä mahdollisesti ostaa yleisistä verkoista esimerkiksi toimistorakennusta varten. Sähkön verkostaostokustannus  $K_{Sä\_osto}$  minimoituu, kun huoltoseisokit ovat lyhyitä ja tehokkaita, ja omaa sähköntuotantoa pidetään käytössä aina kun mahdollista. Periaatteessa sähkön ostohinta muodostuu sähkön siirtomaksusta (perusmaksu, tehomaksu, energiamaksu, sähkövero ja huoltovarmuusmaksu) sekä sähkön ostomaksusta (perusmaksu, tehomaksu ja energiamaksu). Jotta kaukolämpöä ei tarvitsisi ostaa verkosta eikä myöskään oman tuotannon katkosta aiheutuisi suurta tulonmenetystä, kannattaa seisokit pitää kesällä. Kustannusfunktiossa kaukolämmön verkostaostokustannusta merkitään  $K_{Lä\_osto}$ . Kummatkin kustannukset lasketaan yhtälöiden 18 ja 19 periaatteella.

## 6.2 Käytön optimointi sähkön ja lämmön myyntihinnan perusteella

Eri energiamuotojen myyntihinnat vaikuttavat siihen, onko taloudellisesti kannattavinta panna sähköä, lämmön vai höyryn tuotantoon, ja mikä on näiden välinen rakennusaste. Yksinkertaisuuden vuoksi tässä työssä puhutaan yleensä vain sähköstä ja lämmöstä, sillä ne ovat MW Powerin asiakkaiden yleisimmin tarvitsemat energiamuodot. Tuotannosta saatavan taloudellisen hyödyn maksimoinniksi voimalaitoksesta huolehtivien operaattorien on syytä

seurata energiasta saatavia hintoja ja suunnitella laitoksen tuotantoa taloudelliset näkökohdat huomioiden.

Sähkön pörssihintoja voi seurata vapaasti internetistä Nord Poolin sivuilta ([www.nordpoolspot.com](http://www.nordpoolspot.com)) ja kirjata hintoja manuaalisesti ylös (MW Powerin tapauksessa esimerkiksi DNA Entryyn), mutta käytettävyyden kannalta yksinkertaisinta on automatisoida sähkön hinnan hakeminen ja sen esittäminen näytöllä. Lähteen (Tulokas 2002, s.67) mukaan sähkön hinnan haku Nord Poolin sivuilta voidaan tehdä SQL-palvelimelle esimerkiksi maksullisena FTP-hakuna tai luomalla Exceliin ulkoinen tietolähde internet-sivun lukemiseen. Metsoilla on myös valmis työkalu internet-sovelluksiin: DNA Data –palvelu web service interface (WSI), jolla todennäköisesti voidaan toteuttaa sähkön nykyisen hinnan sekä hintaennusteiden haku. (Metso DNA Info 2011)

Energian hinnat esittävällä näytöllä voisi esimerkiksi olla kuvaaja, johon päivitetään hintakäyrää tai –pylväsdiagrammia tunneittain. Samoin kuvaajassa tai listana voidaan esittää ennusteet tuleville hinnoille sopivalla ajanjaksolla, kuten vuorokaudeksi ja viikoksi, tietojen saatavuuden mukaan. Diagrammi ja hintataulukko voisi näkyä esimerkiksi 30 tunnin liukuvana ajanjaksona, niin että siinä näkyy 6 tuntia taaksepäin ja 24 tuntia eteenpäin. Tuntiessaan energiasta saadun hinnan kehityksen operaattorit osaavat ajoittaa laitoksen toimintaa sopivasti. Korkeilla energian hinnoilla laitosta kannattaa ajaa suurella kuormalla, ja huoltoa varten tarvittavat käyttökatkot tehdään alhaisten hintojen aikaan.

Käytettävät hinnat ja päivitysvälit riippuvat sähkön ja lämmön myyntisopimusten tyypistä. Tuotantoa optimoidaan niin, että esimerkiksi mahdollinen lämmöntuotantovelvollisuus suoritetaan joka tapauksessa. Tällöin lämmöntuotannolle asetettaisiin minimiarvoksi tarvittava kaukolämpökuorma, ja muutoin sähköä ja lämpöä tuotetaan maksimoiden saatu voitto.

### **6.3 Herkkyystarkastelu 1: tekninen malli vs. talousmalli**

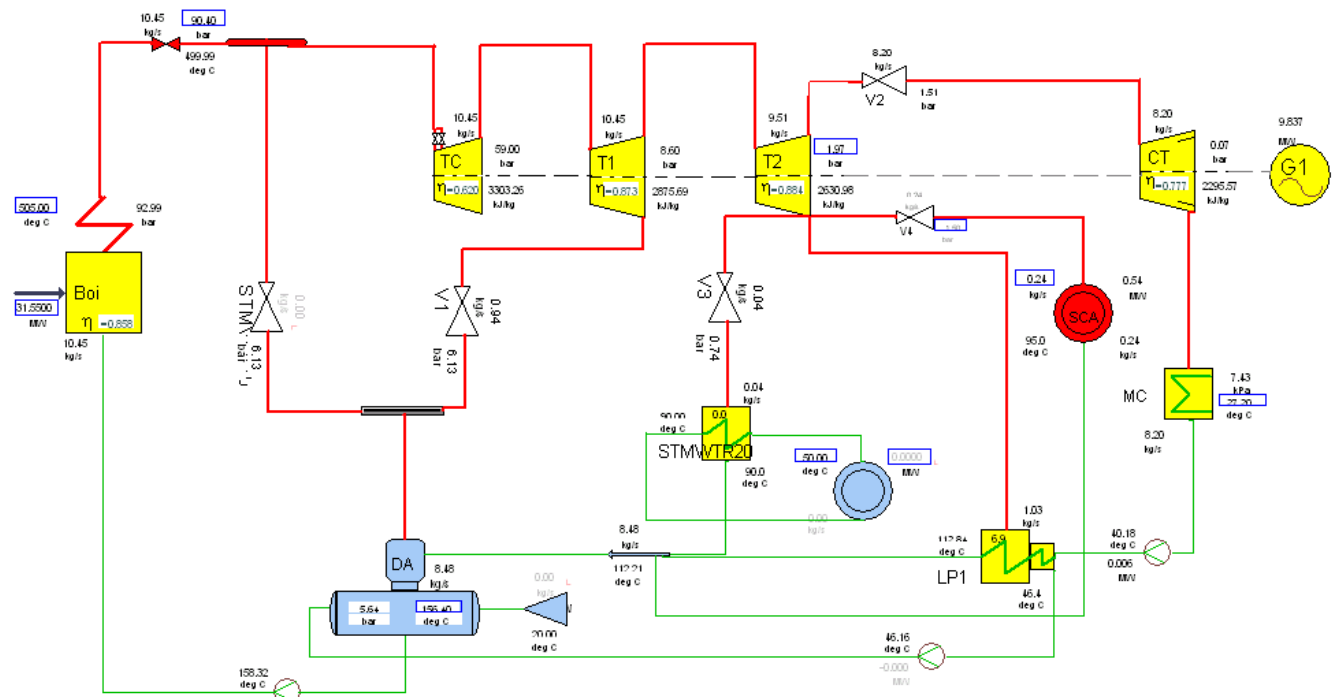
Tässä luvussa esitetään voimalaitosmallin ja tavoitefunktion testaustapa sekä herkkyysanalyysi teknisten ja taloudellisten tekijöiden suhteen. Herkkyystarkasteluja on tehty kaksi hie- man eri periaatteilla. Ensimmäisessä tarkastelussa seurataan Tursim- ja PBD-ohjelmilla simuloitujen prosessimuutosten vaikutusta katteen muutokseen. Toisessa tarkastelussa ver- taillaan Hamin referenssivoimalaitoksella tehtyjen verifiointimittausten tuloksia Tursim-mallin antamiin tuloksiin. Tämä jälkimmäinen tarkastelu esitetään luvussa 7.1. Tarkasteluihin valitut

säätöpiirit ovat samoja vain osittain, sillä kaikkia mallinnettuja muutoksia ei voitu testata käytännössä voimalaitoksella, eikä toisaalta kaikkia voimalaitoksella muutettavissa olevia tekijöitä voida järkevästi mallintaa käytettävissä olevilla ohjelmilla. Näissä analyyseissä tarkastellaan vain prosessin sisäisiä muutoksia, ei ulkoisten olosuhteiden, kuten sään tai hintojen muutoksia. Näitä tekijöitä voidaan tarkastella myöhemmin järjestelmän käytännöntoteutusvaiheessa.

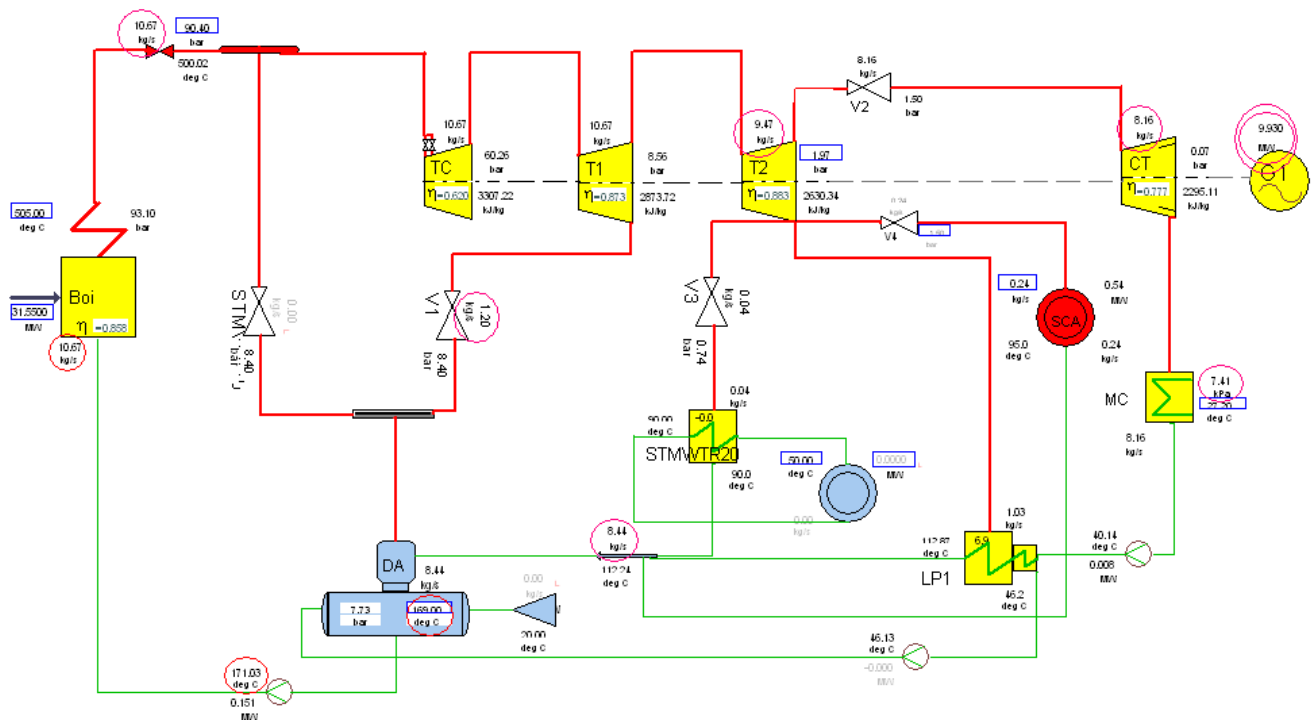
Tämän luvun herkkyystarkastelussa selvitetään kustannusfunktion herkkyys prosessin muutoksille. Tarkastelu tehdään muuttamalla laitosmallissa yhtä prosessiparametria kerrallaan ja simuloimalla prosessi tässä uudessa tilanteessa. Tarkastellut säätöpiirit ovat syöttövesisäiliön paine, turbiinin toisen välioton paine, pääjäähdytysveden lämpötila radiaattorien jälkeen, kaukolämpöteho kahdella eri väliottohöyryn paineella sekä palamisilman esilämmittimille menevä väliottohöyrymäärä. Kun yhtä näistä muutetaan, muut pidetään vakioina. Lisäksi kaikissa tarkasteluissa pidetään vakioina tuorehöyryn paine ja lämpötila sekä polttoaineteho. Vertailutila on lauhdeajotilanne, jossa kaukolämpöteho on nolla. Suurimmat muutokset eri tilanteiden mallinnuksessa tapahtuvat tuotetuissa sähkö- ja lämpötehoissa sekä prosessin sisäisissä virtauksissa, kuten eri väliottojen ja lauhteen virtausmäärissä.

Tarkastelu tehdään käyttäen Tursim- ja PBD-mallinnusohjelmia. Tursimissa ratkaistaan prosessin vesi-/höyrykierron tase polttoainetehon ollessa vakio. Mallin tuloksista viedään syöttöveden ja tuorehöyryn määrät ja termodynaamiset ominaisuudet PBD:hen, jossa ratkaistaan kattilan todella kuluttama polttoaineteho. Kuvissa 23 ja 24 on esitetty esimerkinomaisesti Tursim-mallin tasekuva kahdella eri syöttövesisäiliön lämpötilalla. Kuvista näkyy, mitkä kaikki prosessiarvot ovat muuttuneet eri lämpötilan vaikutuksesta.

Muutetut prosessitiedot siirretään talousmallin kustannusfunktioon, jossa lasketaan prosessimuutoksen vaikutus voimalaitoksen käyttökatteeseen. Esimerkiksi väliottohöyrymäärän lisääminen vähentää turbiinissa paisuvan höyryn määrää, jolloin sähkön tuotanto vähenee. Tällöin sähkön myyntitulot laskevat. Toisaalta, jos lisääntynyt höyrymäärä viedään kaukolämmönsiirtimelle, kaukolämmön myyntitulot kasvavat. Sähkön ja lämmön hinnoista riippuen lisääntynyt lämmön myynti voi täysin kompensoida vähentyneen sähkön myynnin ja kokonaiskate voi jopa parantua. Kaikkia vaikutuksia on vaikea päätellä suoraan, minkä vuoksi mallinnus on tarpeen. Esimerkiksi samasta väliotosta otettava höyry palamisilman esilämmittimille kyllä parantaa höyryvoimaproessin hyötysuhdetta, mutta ei ole itsestään selvää, parantuu voimalaitoksen käyttökate muuttuneen sähkön ja lämmön tuotannon tai vähentyneen polttoaineen kulutuksen myötä.



**Kuva 23.** Prosessin tilanne syöttövesisäiliön lämpötilalla 156,40 °C, joka on koko herkkyytarkastelun vertailutila. Esimerkkejä arvoista, jotka muuttuvat tarkastelussa: syöttöveden ja höyryn massavirta 10,45 kg/s, ensimmäisen välioton massavirta 0,94 kg/s ja tuotettu sähköteho 9,837 MW.



**Kuva 24.** Prosessin tilanne syöttövesisäiliön lämpötilalla 169 °C. Esimerkkejä muuttuneista arvoista: syöttöveden ja höyryn massavirta 10,67 kg/s, ensimmäisen välioton massavirta 1,20 kg/s ja tuotettu sähköteho 9,930 MW.

### **Syöttövesisäiliön lämpötila**

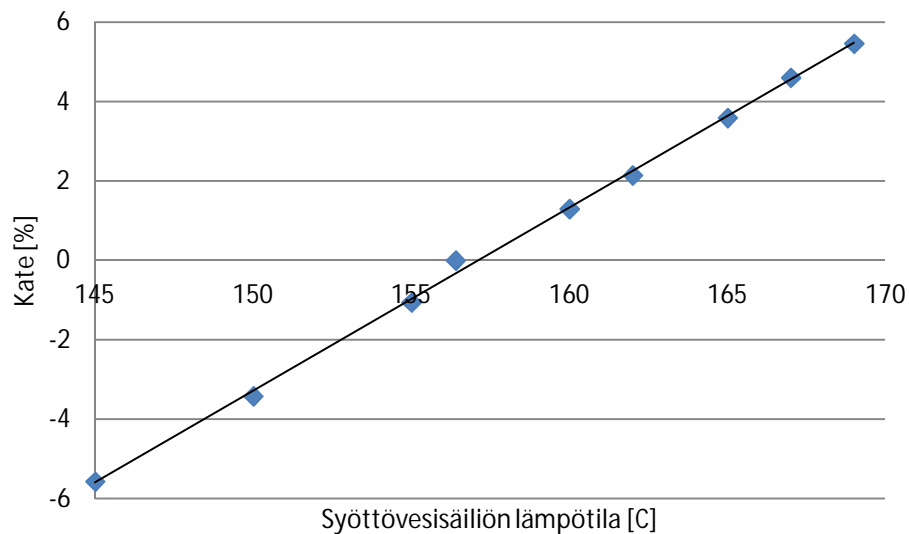
Syöttövesisäiliön lämpötila riippuu suoraan vallitsevasta paineesta, sillä säiliön sisältö on kylläisessä tilassa. Paineita säädetään säiliön höyryventtiilillä, joka päästää tarvittavan määrän turbiinin väliottohöyryä säiliöön. Kuvassa 23 tätä höyryventtiiliä vastaa venttiili V1, joka todellisuudessa sijaitsee lähempänä syöttövesisäiliötä, reduktiohaaran jälkeen. Oikea järjestely näkyy liitteestä I. Kun syöttöveden lämpötilaa kasvatetaan ja samaan aikaan polttoainetehto sekä tuorehöyryn paine ja lämpötila pidetään vakioina, lisääntyvät syöttövesi- ja tuorehöyryvirtaukset. Siksi tuotetun sähkön määrä lisääntyy, vaikka väliotosta lähteekin entistä enemmän höyryä.

Koska herkkyyksianalyysiä varten tehty Excel-taulukko hakee polttoainetehotiedon PBD-mallin tuloksista, simuloitiin myös kattilan toiminta syöttöveden eri lämpötiloissa. Vaikka Tursim-mallissa polttoainetehoa pidettiin vakiona, PBD:llä simuloitaessa teho muuttuu jonkin verran. Tästä johtuu polttoainekustannusten muutos tuloksissa. Polttoainekustannusten kasvessa myös petihiekka- ja tuhkan käsittelykustannukset kasvavat. Sähköntuotannon lisääntyessä lisääntyvät toisaalta myös sähkönsiirtokustannukset. Lämpötilan asetusarvoa kasvatettaessa kattilan hyötysuhde huononee, mutta prosessin hyötysuhde paranee.

Tulostaulukossa 1 on esitetty syöttövesisäiliön lämpötilan asetusarvo vertailutilassa sekä sitä suuremmissa ja pienemmissä lämpötiloissa. Asetusarvon muutos –sarake kuvaa prosentuaalista muutosta verrattuna vertailutilaan. Excelissä on laskettu prosessitietojen ja euromäärien hintojen perusteella laitoksen käyttökate, joka on myös jaettu tuottoihin ja kustannuksiin. Tulostaulukossa on esitetty katteen, tuottojen ja kustannusten muutosprosentit verrattuna vertailutilan vastaaviin arvoihin. Lisäksi taulukossa on pienemmällä kirjainkoolla suurimpien yksittäisten muuttujien muutosprosentit, jotka tässä tapauksessa ovat tuottojen osalta sähkön myyntituotto ja kustannusten osalta polttoainekustannus. Nämä eivät välttämättä ole absoluuttisesti suurimpia tuotto- tai kustannuseriä (esimerkiksi investoinnin takaisinmaksukustannus on polttoainekustannusta suurempi), vaan eniten muuttuvia arvoja eri prosessitilanteiden välillä. Kuvassa 25 on lisäksi havainnollistettu syöttövesisäiliön lämpötilan ja laitoksen kokonaiskatteen välistä yhteyttä, joka on lineaarinen.

**Taulukko 1.** Syöttövesisäiliön lämpötilan vaikutus katteeseen sekä tärkeimpiin katteen osatekijöihin. Pääasialliset vaikuttavat tekijät katteen muutokseen ovat tuotetun sähkötehon kasvu ja polttoainekustannusten kasvu lämpötilan kasvaessa. \*) Vertailutila.

Asetusarvo [°C]	Asetusarvon muutos-%	Katteen muutos-%	Tuottojen muutos-%	Sähkön myyntituoton muutos-%	Kustannusten muutos-%	Pa-kustannuksen muutos-%
169,0	8,06	5,46	1,08	1,08	0,37	0,68
167,0	6,78	4,60	0,91	0,91	0,31	0,56
165,0	5,50	3,59	0,72	0,72	0,26	0,49
162,0	3,58	2,14	0,46	0,46	0,19	0,38
160,0	2,30	1,30	0,29	0,29	0,13	0,27
*156,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
155,0	-0,90	-1,05	-0,12	-0,12	0,02	0,13
150,0	-4,09	-3,42	-0,54	-0,54	-0,08	-0,02
145,0	-7,29	-5,57	-0,94	-0,94	-0,20	-0,19



**Kuva 25.** Syöttövesisäiliön lämpötilan vaikutus katteeseen.

### **Toisen välioton paine**

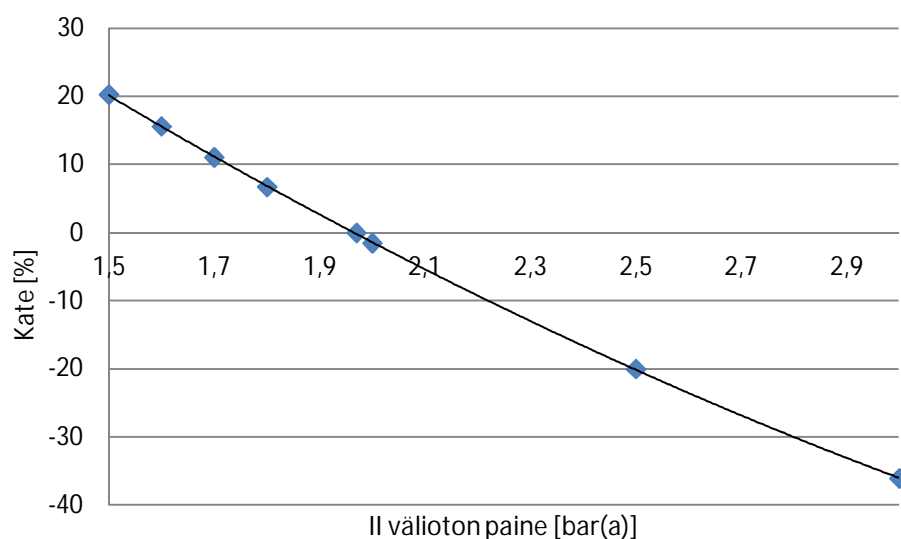
Toisen välioton painetta säädetään turbiinin venttiilillä, jota on kuvassa 23 merkitty tunnuksella V2. Paine vaikuttaa väliottohöyryn massavirtaan sekä tuotettuun sähkötehoon. Mitä suuremmassa paineessa höyry poistuu turbiinin väliotosta, sitä vähemmän tuotetaan sähköä



(taulukko 2). Sähkön tuotannon väheneminen on suurin syy katteen huononemiselle painetta kasvatettaessa. Kustannusten samanaikainen väheneminen liittyy lähinnä sähkön siirtokustannusten pienenemiseen. Paineen vaikutus katteeseen on muodoltaan hyvin loiva, laskeva paraabeli, ja se on esitetty kuvassa 26. Välioton paine ei vaikuta kattilan toimintaan tai hyötysuhteeseen vakio polttoainetehon, syöttövesisäiliön tasaannuttavan vaikutuksen sekä tuorehöyryn vakioasetusarvojen vuoksi, mutta koko prosessin hyötysuhde huononee paineen noustessa.

**Taulukko 2.** Säädetyin toisen välioton paineen vaikutus katteeseen sekä tärkeimpiin katteen osatekijöihin. Katteen muutokseen pääasiallisesti vaikuttava tekijä on tuotetun sähkötehon muutos. \*) Vertailutila.

Asetusarvo [bar(a)]	Asetusarvon muutos-%	Katteen muutos-%	Tuottojen muutos-%	Sähkön myyntituoton muutos-%	Kustannusten muutos-%
3,00	52,28	-36,07	-5,70	-5,70	-0,82
2,50	26,90	-20,01	-3,14	-3,14	-0,43
2,00	1,52	-1,52	-0,19	-0,19	0,02
*1,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,80	-8,63	6,73	1,12	1,12	0,22
1,70	-13,71	11,06	1,81	1,81	0,33
1,60	-18,78	15,61	2,54	2,54	0,44
1,50	-23,86	20,31	3,28	3,28	0,55



**Kuva 26.** Säädetyin toisen välioton paineen vaikutus katteeseen.

### **Pääjäähdytysveden lämpötila**

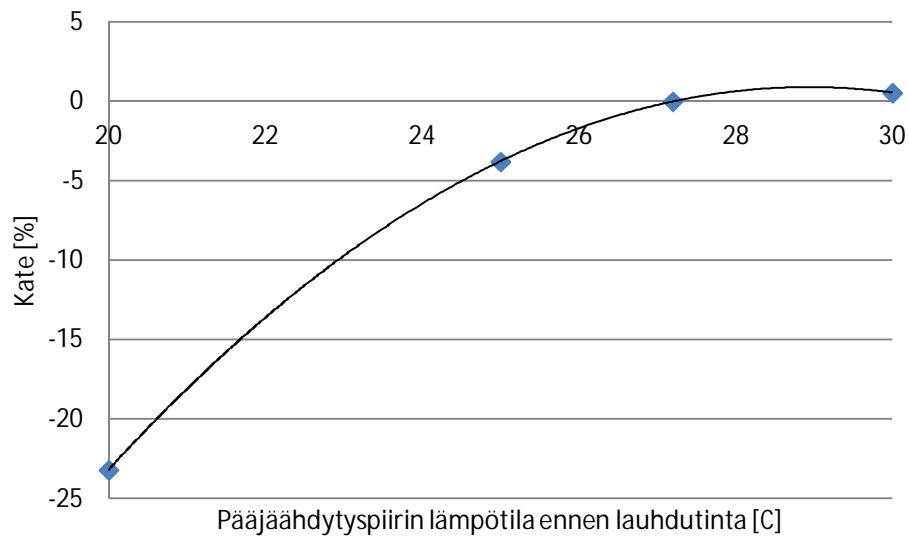
Pääjäähdytys- eli lauhdutinpiirin lämpötila mitataan sekä ennen radiaattorikenttää että sen jälkeen. Lauhduttimen jälkeen ennen radiaattoreja mitattu lämpötila säätää jäähdytyspiirin pumpun pyörimisnopeutta, joka siis vaikuttaa veden massavirtaan lauhduttimen putkistossa. Radiaattorien jälkeinen lämpötila puolestaan säätää radiaattorien eli jäähdytyspuhaltimien pyörimisnopeutta. Mitä kylmemmäksi jäähdytysvesi halutaan, sitä useampi radiaattori on käytössä tai sitä nopeammin ne pyörivät. Rajoitteena on kuitenkin aina ulkoilman lämpötila, joka määrää jäähdytysveden pienimmän mahdollisen lämpötilan.

Jäähdytysveden lämpötilaa nostettaessa pitäisi sähköntuottohyötysuhteen loogisesti pääteltynä laskea, varsinkin, kun Tursim-mallissa ei voida ottaa huomioon radiaattorien omakäytösähkötehon pienenemistä. Tuorehöyryn ja muiden vesi-/höyrypiirin massavirtojen kuuluisi kasvaa polttoainetehon ollessa vakio. Mallin päinvastainen käytös johtuu luultavasti mallissa olevasta puutteesta, turbiinin viimeisen vaiheen vääränlaisesta mallinnuksesta.

Taulukossa 3 on esitetty mallinnuksen mukaiset muutokset katteeseen, sen osatekijöihin eli kokonaistuottoihin ja –kustannuksiin, sekä lisäksi tärkeimpään muuttuvaan tekijään eli sähkön myyntituottoon. Kuvassa 27 on mallinnuksen tulos, jonka mukaan kate olisi sitä parempi, mitä suurempi on jäähdytysveden lämpötila. Tämä saattaa pitää paikkansa tietyissä rajoissa, jos huomioidaan radiaattorien kuluttama omakäyttöteho. Pyrittäessä maksimaaliseen jäähdytykseen myös radiaattorien kuluttama sähköteho kasvaa maksimiinsa, mikä ei välttämättä kokonaan palaudu katteeseen lisääntyneenä sähkön myyntinä. Tässä tarkastelussa ei kuitenkaan huomioida radiaattorien omakäytösähkötehoa.

**Taulukko 3.** Pääjäähdytysveden lämpötilan vaikutus katteeseen sekä tärkeimpiin katteen osatekijöihin. Tulosten suunta on ristiriidassa kokemuseräisen tiedon kanssa. \*) Vertailutila.

<b>Asetusarvo [°C]</b>	<b>Asetusarvon muutos-%</b>	<b>Katteen muutos- %</b>	<b>Tuottojen muutos- %</b>	<b>Sähkön myyntituoton muutos-%</b>	<b>Kustannusten muutos-%</b>
<b>30,0</b>	10,29	0,54	0,14	0,14	0,07
<b>*27,2</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>25,0</b>	-8,09	-3,80	-0,55	-0,55	-0,03
<b>20,0</b>	-26,47	-23,20	-3,65	-3,65	-0,51



**Kuva 27.** Pääjäähdytysveden lämpötilan vaikutus katteeseen.

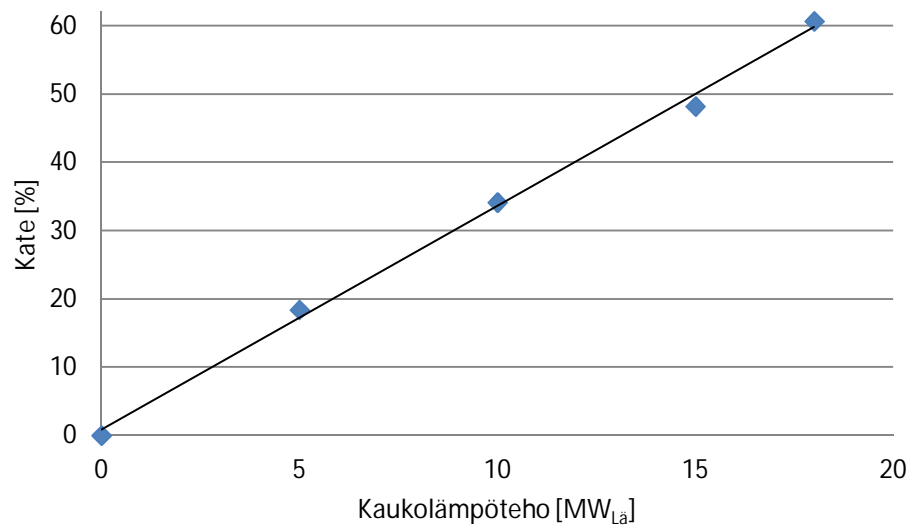
### ***Kaukolämpöteho***

Kaukolämmön tuotanto parantaa laitoksen katetta välittömästi ja huomattavasti. Vaikka sähkön tuotannon hyötysuhde huononeekin lisääntyneen väliottohöyryn vuoksi, tästä höyrystä saadaan vielä parempi tuotto, kun sen energia muunnetaan kaukolämmöksi. Kaukolämmönsiirtimeen hyötysuhde on nimittäin huomattavasti parempi kuin turbiinilla, joten kaukolämmön tuotantoon käytetty höyry on tavallaan arvokkaampaa kuin sähköntuotantoon käytetty höyry. Sähkön- ja lämmöntuotantojen välinen kannattavuus riippuu niiden yksikköhinnoista.

Tuotettua kaukolämpötehoa säädetään kuvassa 23 näkyvällä lämmönsiirtimeen höyryventtiilillä V3. Lämmönsiirtimele menevän höyrymäärän muutos aiheuttaa muutoksen myös turbiinin viimeiseen vaiheeseen menevässä höyrymäärässä sekä lauhteen määrässä. Taulukossa 4 kaukolämmön tuotannon muutosprosentteja ei voida esittää, koska vertailutilanteessa tuotantoa on 0 MW<sub>Lä</sub>. Kaukolämpötehoa lisättäessä prosessin kokonaishyötysuhde kasvaa niin, että se on minimissään noin 33 % ja maksimissaan noin 93 %. Samalla sähköntuottohyötysuhde huononee. Kustannusten muutos liittyy sähkönsiirtokustannusten pienenemiseen. Omakäytösähkön kustannus kuitenkin kasvaa taajuusmuuttajakäyttöisen kaukolämpöpumpun muuttuvan sähkönkulutuksen vuoksi. Lämmöntuotannon positiivinen vaikutus katteeseen on lineaarinen (kuva 28).

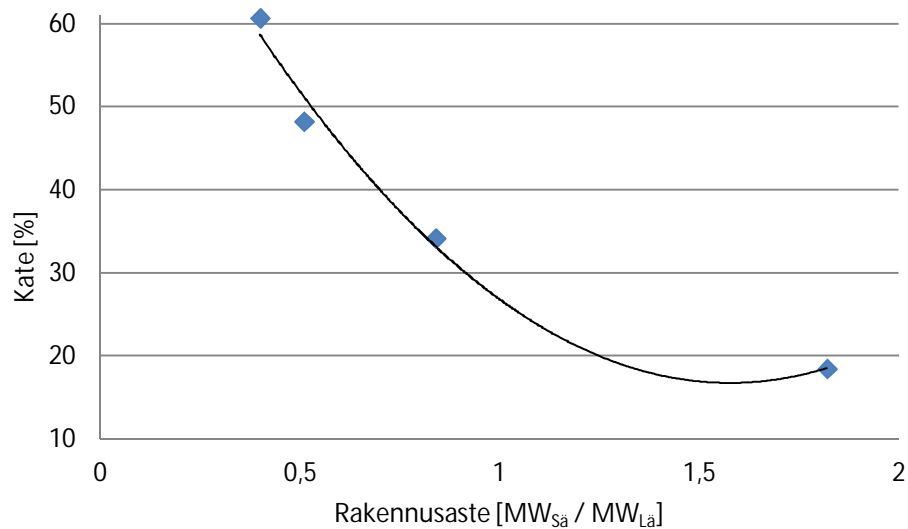
**Taulukko 4.** Kaukolämpötehon vaikutus katteeseen sekä tärkeimpiin katteen osatekijöihin. Pääasialliset vaikuttavat tekijät: kaukolämpötehon kasvaessa tuotettu sähköteho vähenee, mutta lämpöteho kasvaa. \*) Vertailutila.

Asetusarvo [MW_lä]	Asetusarvon muutos-%	Katteen muutos-%	Tuottojen muutos-%	Sähkön myyntituoton muutos-%	Lämmön myyntituoton muutos-%	Kustannusten muutos-%
18,0	+	60,70	4,77	-31,00	+	-4,21
15,0	+	48,23	3,61	-26,20	+	-3,56
10,0	+	34,14	2,75	-17,13	+	-2,30
5,0	+	18,43	1,61	-8,32	+	-1,09
*0,0		0,00	0,00	0,00		0,00



**Kuva 28.** Kaukolämpötehon vaikutus katteeseen.

Jakamalla sähkö- ja lämpötehot keskenään saadaan rakennusaste. Kuten kuvasta 29 näkyy, kannattaa rakennusasteen olla mahdollisimman alhainen, ainakin kyseisen vertailutilanteen energianhinnoilla. Tällöin siis lämmöntuotanto on maksimissaan.



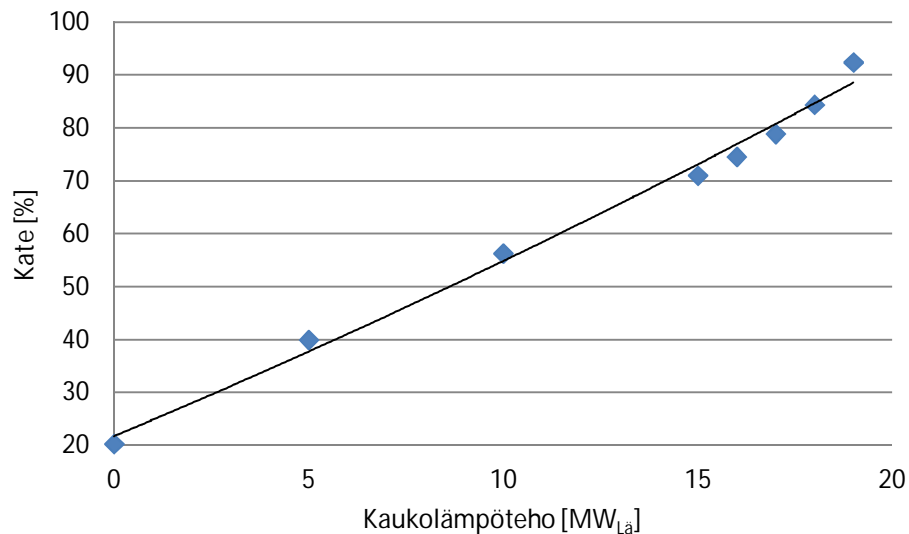
**Kuva 29.** Rakennusasteen vaikutus katteeseen. Pääasialliset vaikuttavat tekijät: kaukolämpötehon kasvaessa tuotettu sähköteho vähenee, mutta lämpöteho kasvaa. Alhaisin kate saadaan, kun kaukolämpöä ei tuoteta ollenkaan.

### ***Kaukolämpöteho, kun väliottohöyryn paine on 1,50 bar(a)***

Aiemmassa selvityksessä todettiin, että parhaan katteen tuottava väliottohöyryn paine on sen säätöalueen minimiraja 1,50 bar(a). Kun testataan kaukolämpötehon lisäämistä tällä optimaalisella paineella, saadaan vieläkin parempia tuloksia kuin edellisessä kohdassa. Optimoitijärjestelmän on tarkoitus toimia juuri niin, että kokonaisuutena eri säätimien säädön yhteisvaikutuksesta tulee paras mahdollinen. Verrattaessa taulukoita 4 ja 5 huomataan, että 1,50 bar(a):n paineen ja maksimaalisen kaukolämmöntuotannon yhdistelmällä saadaan paras kate. Katteen käyrä on kuvassa 30.

**Taulukko 5.** Kaukolämpötehon vaikutus katteeseen sekä tärkeimpiin katteen osatekijöihin, kun välioton paine on optimaalinen 1,50 bar(a). Vertailutilassa paine on 1,97 bar(a) ja kaukolämpöteho 0,0 MW<sub>Lä</sub>. Pääasialliset vaikuttavat tekijät: kaukolämpötehon kasvaessa tuotettu sähköteho vähenee, mutta lämpöteho kasvaa.

Asetusarvo [MW <sub>Lä</sub> ]	Asetusarvon muutos-%	Katteen muutos-%	Tuottojen muutos-%	Sähkön myyntituoton muutos-%	Lämmön myyntituoton muutos-%	Kustannusten muutos-%
19,0	+	92,45	9,55	-28,20	+	-3,76
18,0	+	84,44	8,55	-27,22	+	-3,64
17,0	+	78,93	7,94	-25,84	+	-3,45
16,0	+	74,57	7,53	-24,26	+	-3,23
15,0	+	71,05	7,24	-22,56	+	-3,00
10,0	+	56,32	6,28	-13,59	+	-1,76
5,0	+	39,97	5,04	-4,89	+	-0,57
0,0		20,31	3,28	3,28		0,55



**Kuva 30.** Kaukolämpötehon lähes lineaarinen vaikutus katteeseen, kun välioton paine on optimaalinen 1,50 bar(a).

### ***Palamisilman esilämmittimien höyrymäärä***

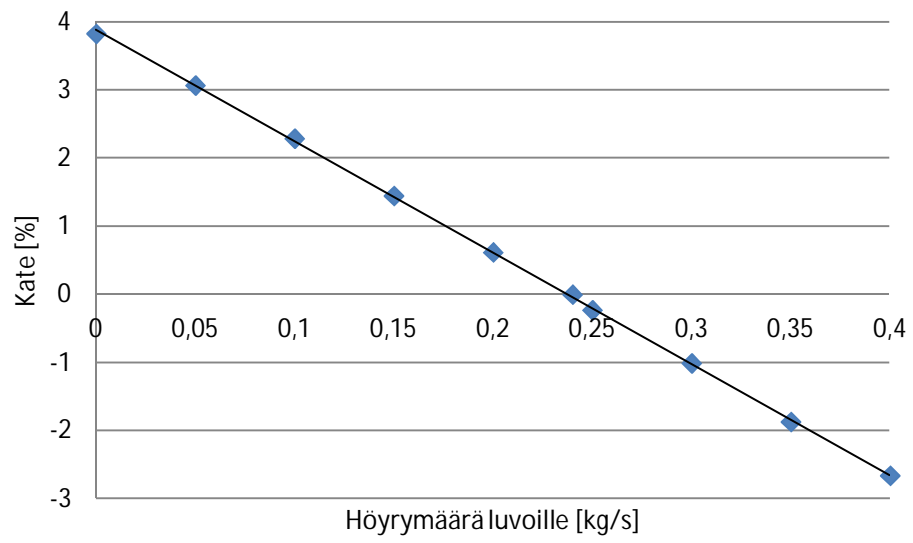
Palamisilman esilämmittäminen parantaa sekä kattilan että prosessin hyötysuhteita. Näin tapahtuu siitäkin huolimatta, että kate huononee esilämmityshöyrymäärän kasvaessa. Kun

tavoitteena on katteen optimointi, vähennettäisiin höyrymäärä noltaan parhaan katteen saavuttamiseksi. Tämä ei kuitenkaan ole järkevää, koska höyryesilämmittimillä on tärkeä tekninen merkitys prosessissa. Ne esilämmittävät palamisilman, joka jatkaa prosessissa savukaasuesilämmittimille. Näille lämmönsiirtimille ilma ei saa tulla liian kylmänä, sillä muutoin savukaasu jäähtyy liikaa ja sen sisältämä rikki saavuttaa happokastepisteensä. Kastepisteen saavuttaminen taas aiheuttaisi korroosiota lämmönsiirtimen putkissa sekä kanavissa. Mallinuksen mukaan rikkikastepisteen vaara on olemassa matalilla höyrymäärillä, 0 ... 0,25 kg/s.

Kuvassa 23 esilämmittimiä kuvataan höyryn kuluttajalla SCA, joka on mallinnettu tarkemmin PBD-ohjelmalla. Höyry esilämmittimille otetaan turbiinin väliotosta, joten sähkön myyntituotto laskee höyrymäärää lisättäessä (taulukko 6). Tällöin myös lauhduttimelta tulevan lauhteen määrä vähenee. Myös polttoainemäärä vähenee PBD-mallissa, koska tällöin palamisilmaa ei tarvitse lämmittää savukaasuilla yhtä suurella teholla kuin ilman höyryesilämmittimiä. Syöttöveden ja tuorehöyryn määriä ja termodynaamisia ominaisuuksia pidetään vakioina. Niiden sekä polttoaineen koostumuksen perusteella ratkaistaan polttoaineteho. Polttoainetehon laskeessa myös petihiekkakustannus ja tuhkan käsittelykustannus pienenevät. Kuvassa 31 on kuvattu höyrymäärän lineaarinen vaikutus katteeseen.

**Taulukko 6.** Ilman esilämmittimien höyrymäärän vaikutus katteeseen sekä tärkeimpiin katteen osatekijöihin. Pääasialliset vaikuttavat tekijät: sähkön myyntituotto ja polttoainekustannukset. \*) Vertailutila.

Asetusarvo [kg/s]	Asetusarvon muutos-%	Katteen muutos-%	Tuottojen muutos-%	Sähkön myyntituoton muutos-%	Kustannusten muutos-%	Pa-kustannuksen muutos-%
<b>0,40</b>	66,67	-2,66	-0,57	-0,57	-0,23	-0,45
<b>0,35</b>	45,83	-1,87	-0,40	-0,40	-0,16	-0,31
<b>0,30</b>	25,00	-1,01	-0,22	-0,22	-0,09	-0,17
<b>0,25</b>	4,17	-23,00	-0,05	-0,05	-0,02	-0,03
<b>*0,24</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>0,20</b>	-16,67	0,62	0,14	0,14	0,06	0,12
<b>0,15</b>	-37,50	1,45	0,32	0,32	0,14	0,27
<b>0,10</b>	-58,33	2,29	0,50	0,50	0,21	0,42
<b>0,05</b>	-79,17	3,07	0,67	0,67	0,29	0,56
<b>0,00</b>	-100,00	3,83	0,84	0,84	36,00	0,71



**Kuva 31.** Ilman esilämmittimien höyrymäärän vaikutus katteeseen.



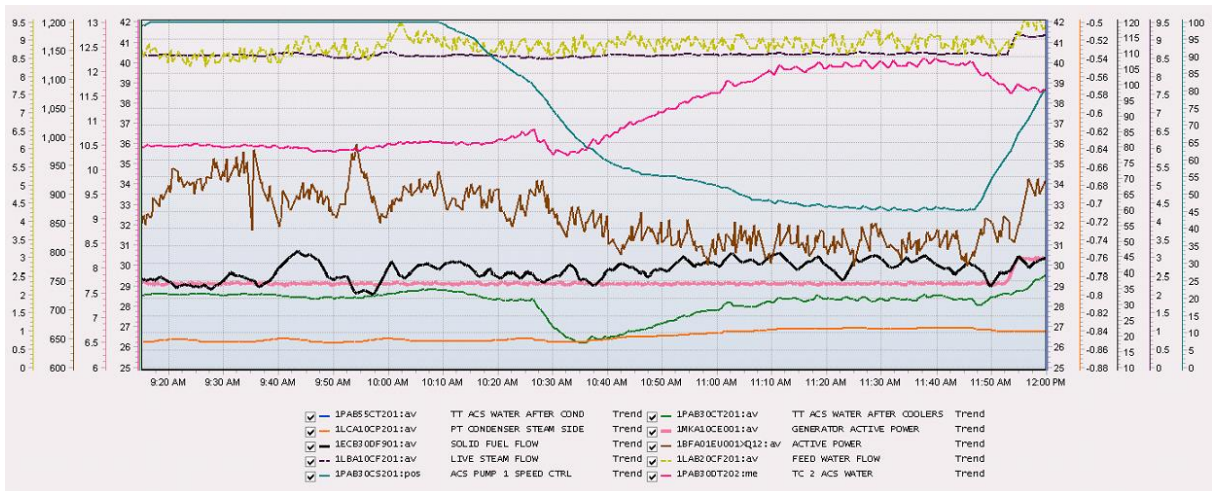
## 7 LAITOSMALLIN TODENTAMINEN

Laitosmallin toimivuutta testattiin MW Powerin referenssilaitoksella Hamissa Belgiassa. Testivoimalaitosta voi tavallaan pitää laitosmallin sovelluksena. Testauksella todennettiin (verifioitiin) ja kelpoistettiin (validoitiin) laitosmallilla saadut tulokset. Verifiointimittausten tulosten suuntia verrataan aiemmin esitetyn talousmallin herkkyystarkastelun tuloksiin ja päätellään, vastaavatko ne toisiaan.

### 7.1 Herkkyystarkastelu 2: tekninen malli vs. vertailumittaukset

Teknisellä ja taloudellisella laitosmallilla tehdyn herkkyystarkastelun tulosten verifiointi esitetään tässä luvussa. Laitosmallin testaus tehtiin Hamin voimalaitoksella muuttamalla operointinäytön kautta yksitellen eri prosessiarvoja ja seuraamalla prosessin ulostuloa eli muutosten vaikutusta muuhun prosessiin. Generaattorin tehoa pidettiin koko ajan tasaisena eli turbiini oli tehonsäädöllä ja kattila paineensäädöllä. Tämän vuoksi mittaustuloksissa ei nähdä muutosta lisääntyneenä sähkön myyntinä, vaan muutos näkyy kattilan tuottamassa tuorehöyryvirrassa ja sitä kautta muuttuneessa polttoainemäärässä. Kuvassa 32 on esitetty esimerkiksi verifiointimittauksista haettu käyrästä, joka kuvaa pääjäähdytyspiirin lämpötilan muutosta lauhduttimen jälkeen sekä muutoksen vaikutuksia muuhun prosessiin.

Testausta ei voitu tehdä toivotussa laajuudessa kaukolämpökuorman puutteen vuoksi. Hyödyllisintä taloudellisen optimoinnin kannalta olisi ollut juuri erisuuruisten rakennusasteiden testaaminen käytännössä, mutta nyt sitä ei voitu tehdä. Testatut säätöpiirit olivat syöttövesisäiliön paine, paine-ero syöttövesiventtiin yli, toisen välioton paine, pääjäähdytyspiirin lämpötila ennen kiertovesipumppua ja lauhduttimen jälkeinen pääjäähdytysveden lämpötila ennen radiaattoreja. Nämä säätöpiirit valittiin, koska niillä on laaja vaikutus prosessiin (lukuun ottamatta syöttövesiventtiin paine-eroa), ja koska niitä ei ollut lukittu turvallisuussyistä. Niiden vaikutus ei ole täysin itsestään selvä, kuten esimerkiksi tuorehöyryn lämpötilan tai massavirran vaikutus olisi. Tulokset on esitetty taulukoissa 7 – 11, minkä jälkeen tuloksia analysoidaan. Kyseisten piirien lisäksi olisi testattu matalapaine-esilämmittimen tehon säätöä sekä palamisilman ja kiertokaasun säätöjä, mutta niiden säädöt oli lukittu muista syistä, eikä niitä siksi voitu muuttaa.



**Kuva 32.** Lauhduksen jälkeisen pääjäähdytyspiirin lämpötilan vaikutus prosessiin Hamina mittauksissa. Vertailuajankohdaksi 9:30 – 10:20 lauhtimen jälkeinen lämpötila oli 36 °C, ja tarkasteluajankohdaksi 11:15 – 11:45 lämpötila oli 40 °C.

### Syöttövesisäiliön paine

Syöttövesisäiliön painetta säädetään turbiinin ensimmäisen välioton höyrylinjan venttiilillä. Koska turbiinin tuottamaa tehoa pidetään nyt vakiona, muutos näkyy tuorehöyryn määrässä (taulukko 7). Kun syöttövesisäiliön painetta (ja samalla lämpötilaa) nostetaan, päästetään säiliöön enemmän väliottohöyryä. Tällöin myös tuorehöyryvirta kasvaa. Polttoaineen kulutus kuitenkin pienenee höyrymäärän kasvusta huolimatta, koska syöttövettä ei tarvitse lämmittää ekonomaisemmin yhtä paljon kuin vertailutilanteessa. Kattilan hyötysuhteeseen syöttöveden paineella ei ole suurtakaan vaikutusta. Sen sijaan sähköntuottohyötysuhde paranee suuremmalla syöttövesisäiliön paineella, mikä johtuu lähinnä vähentyneestä polttoaineen kulu- tuksesta. Hyötysuhteen paranemista selvästi rajoittava tekijä on väliottohöyryn määrän kas- vu, jonka vuoksi turbiinia pyörittävä höyrymäärä pienenee. Syöttövesisäiliön asetusarvoa laskettaessa saadaan vastakkaisia tuloksia, eli polttoainemäärä kasvaa ja sähköhyötysuhde pienenee.

Verifiointimittausten ja Tursim-ohjelman mallinnuksen tulosten välillä on joitakin ristiriitai- suuksia. Asetusarvoa nostettaessa mitattu päälauhdevirta kasvoi samoin kuin varsinkin polt- toaineenkulutus. Polttoainemäärien suuri vaihtelu voi johtua ennen vertailuajanjaksoa tapah- tuneesta kattilan käyttöhäiriöstä, joka on sekoittanut polttoaineen syöttöä. Myös lauhdevirran

poikkeavansuuntainen muutos johtunee siitä, ettei prosessi vertailutilanteessa ehtinyt kunnolla tasaantua häiriön jälkeen. Määrällisesti kyseessä oli kuitenkin pieni, 0,06 kg/s suuruinen muutos. Virtausmittarin epätarkkuus on noin 1 % luettaessa  $\pm 0,01$  kg/s. Ulkoilman lämpötila vaihteli eri mittausajankohtina, millä on vaikutusta lauhduttimen toimintaan sekä tuloilman lämpötilaan. Asetusarvoa nostettaessa ulkolämpötila oli suurempi kuin vertailutilassa, minkä vuoksi pääjäähdytys- eli radiaattoriin lämpötila ja vastaavasti lauhduttimen paine olivat myös vertailutilannetta suurempia. Tämän vuoksi sähkön tuottamiseen tarvittiin suuremmat vesi-/höyry-piirin massavirrat kuin muutoin olisi tarvittu. Muissa mittauksissa ulkolämpötilat olivat lähellä vertailuhetkiensä lämpötiloja.

Kun säätimen asetusarvon muutoksen vaikutus prosessiin viedään kustannusmalliin, saadaan selville säätimien herkkyys katteeseen. Katteeseen vaikuttavat erityisesti pienentyneet sähkön myyntitulot, lisääntyneet polttoainekulut ja lisääntynyt sähkön omakäyttö, joka johtuu syöttövesipumpun lisääntyneestä sähkönkulutuksesta. Vaikka kyseessä onkin euromääräisesti pieni katteen muutos, on se prosenteiksi muutettuna suuri.

**Taulukko 7.** Syöttövesisäiliön paineen vaikutus prosessiin: verifointimittausten tulokset ja Tursimmallin vastaavat tulokset. Muutettava asetusarvo on syöttövesisäiliön paine, ja sen ohjausarvo vaikuttaa syöttövesisäiliön höyryventiliin. Mittausten aikana lämpötila vaihteli merkittävästi, niin että se oli vertailutilassa 11 °C, asetusarvon nostossa 17 °C ja asetusarvon laskussa 10 °C. Punaisella on merkitty ristiriitaisen suuntaiset tulokset.

Prosessimuuttuja	Vaikutus, kun asetusarvoa nostettiin		Vaikutus, kun asetusarvoa laskettiin	
	Ham	Tursim-malli	Ham	Tursim-malli
Asetusarvo	+6,9% →	+6,9% →	-6,9% →	-6,9% →
Ohjausarvo	-100,0%	-	+51,9%	-
Höyryvirta	+0,47%	+0,24%	-0,81%	-0,24%
Päälauhdevirta	+3,3%	-0,31%	+0,95%	+0,31%
Syöttövesivirta	+2,8%	+0,24%	+1,1%	-0,24%
Polttoaineen kulutus	+0,88%	-0,18%	+0,02%	+0,28%
Kattilahyötysuhde	-1,5%	+0%	-0,95%	+0,01%
Sähköntuotto-hyötysuhde	-0,87%	+0,18%	-0,02%	-0,19%
Kate	-577,1%	-	+60,7%	-

### ***Paine-ero syöttövesiventtiin yli***

Syöttövesiventtiin paine-ero ohjaa pumpun pyörimisnopeutta niin, että lieriössä pidetään yllä riittävää painetta. Paine-eroa nostettaessa syöttövesipumpun pyörimisnopeus kasvaa, koska sen on voitettava suurempi painehäviö ja silti pidettävä lieriön painetta asetusarvossaan. Tällöin pumpun sähkönkulutus ja samalla laitoksen omakäyttö kasvavat (taulukko 8). Polttoaineen kulutus ja hyötysuhteet pysyvät laskennallisesti suunnilleen ennallaan.

**Taulukko 8.** Syöttövesiventtiin paine-eron vaikutus prosessiin: verifiointimittausten tulokset ja Tursim-mallin vastaavat tulokset. Muutettava asetusarvo on paine-ero syöttövesiventtiin yli, ja sen ohjausarvo vaikuttaa syöttöveden paineeseen ja syöttövesipumpun kierrosnopeuteen. Hamin mittauksissa oli lyhyt tarkastelu-aika, ja samalla generaattorin teho laski 0,1 MW. Ulkolämpötila oli vertailutilassa 19 °C ja tarkastelupisteessä 20 °C.

Prosessimuuttuja	Vaikutus, kun asetusarvoa nostettiin		Vaikutus, kun asetusarvoa laskettiin	
	Ham	Tursim-malli	Ham	Tursim-malli
Asetusarvo	Ei testattu.	+25% →	-25% →	-25% →
Pumpun omakäyttöteho	-	+1,8%	Pieneni.	-0,90%
Kokonais-omakäyttöteho	-	-	-4,3%	-
Höyryvirta	-	+0%	-1,3%	+0%
Syöttövesivirta	-	+0%	-1,2%	+0%
Polttoaineen kulutus	-	-0,01%	-1,4%	+0,01%
Kattilahyötysuhde	-	+0%	+0,06%	-0,01%
Sähköntuotto-hyötysuhde	-	+0,01%	+0,02%	-0,01%
Kate	-	-	+5,8%	-

### ***Toisen välioton paine***

Toisesta turbiinin väliotosta otetaan höyry matalapaine-esilämmittimelle, höyry-ilmaesilämmittimelle ja kaukolämmönsiirtimelle. Tässä tarkastelussa kaukolämpökuormaa ei ole ja luvon höyrymäärää pidetään vakiona. Siksi otetaan huomioon vain matalapaine-esilämmittimelle menevä höyrymäärä, joka kasvaa paineen kasvaessa. Ensimmäisen vä-

lioton höyrymäärä pienenee samalla, koska syöttövesisäiliötä ei tarvitse lämmittää yhtä paljon kuin aiemmin (taulukko 9). Tämä johtuu siitä, että sisään tuleva päälauhde on jo lämpimämpää matalapaine-esilämmittimen kohonneen höyrymäärän ansiosta. Syöttövesi-, tuorehöyry- ja lauhdevirtaukset kasvavat, minkä vuoksi myös polttoaineen kulutus kasvaa. Siksi sähköntuottohyötysuhde heikkenee. Välioton paineen kannattaa olla suunnittelualueellaan mahdollisimman pieni, koska tällöin turbiinissa sitä edeltävä höyry on ehtinyt paisua mahdollisimman pitkälle sähköä tuottaen.

Mittauksissa matalapaine-esilämmittimen höyryventtiili oli kummassakin mittauspisteessä täysin auki. Tulokset olivat samansuuntaisia kuin mallinnuksessa muilta osin kuin syöttöveden virtausmäärän osalta. Tämä ero johtuu hyvin lyhyestä tarkasteluajasta, jolloin syöttövesisäiliön suuri vesivarasto on puskuroinut virtausmäärien vaihtelua.

**Taulukko 9.** Toisen välioton paineen vaikutus prosessiin: verifiointimittausten tulokset ja Tursim-mallin vastaavat tulokset. Muutettava asetusarvo on toisen välioton paine, ja sen ohjausarvo vaikuttaa turbiinin väliottoventtiiliin. Hamin mittauksissa oli lyhyt tarkastelu-aika. Ulkolämpötila oli sekä vertailu- että tarkastelupisteessä 14 °C. \*) Turvalukitus esti asetusarvon laskemisen. \*\*) Kummassakin tapauksessa höyryventtiilin asento oli täysin auki

Prosessimuuttuja	Vaikutus, kun asetusarvoa nostettiin		Vaikutus, kun asetusarvoa laskettiin	
	Ham	Tursim-malli	Ham	Tursim-malli
Asetusarvo	+5% →	+5% →	Ei testattu.*	-5% →
Tuorehöyryvirta	+0,38%	+0,51%	-	-0,53%
1. välioton höyryvirta	-	-2,1%	-	+1,1%
Höyryvirta MP-esilämmittimelle	**	+2,0%	-	-2,9%
Lauhdevirta	+3,85%	+0,62%	-	-0,50%
Syöttövesivirta	-0,09%	+0,51%	-	-0,53%
Polttoaineen kulutus	-0,09%	+0,49%	-	-0,51%
Sähköntuotto-hyötysuhde	-0,08%	-0,49%	-	+0,51%
Kate	-1,6%	-	-	-

### ***Pääjäähdytyspiirin lämpötila radiaattorikentän jälkeen***

Pääjäähdytyspiirin lämpötila riippuu ulkoilman lämpötilasta ja radiaattorien pyörimisnopeudesta. Alhaisin mahdollinen lämpötila saavutetaan, kun ulkoilman lämpötila on alhainen ja kaikki radiaattorit pyörivät maksimikierronnopeudella. Radiaattorit kuitenkin kuluttavat omaa käyttösähköä sitä enemmän, mitä nopeammin ne pyörivät ja mitä useampi niistä on käytössä. Siksi laitoksen kokonaistalouden kannalta ei välttämättä ole tarkoituksenmukaista pyrkiä mahdollisimman alhaiseen lämpötilaan. Jäähdytysvesi aiheuttaa lauhduttimen alipaineen, joka vaikuttaa siihen, miten pitkälle höyry pääsee paisumaan turbiinissa. Kun sähkötehoa pidetään vakiona, lauhduttimen paineen noustessa lämpimämmän jäähdytysveden seurauksena tuorehöyryvirtaus turbiinille kasvaa (taulukko 10). Samalla myös muut vesi-/höyrypiirin virtaukset kasvavat ja polttoaineteho kasvaa. Siksi myös sähköntuottohyötysuhde laskee.

Tursim-mallissa on sama epälooginen ominaisuus kuin talousmallin herkkyytstarkastelussa, eli jäähdytysveden lämpötilan laskiessa tuorehöyryn määrä kasvaa ja hyötysuhde huononee, vaikka sen höyryvirran kuuluisi pienetä ja hyötysuhteen parantua. Lauhduttimen paine kuitenkin laskee jäähdytysveden kylmetessä, kuten pitääkin.

**Taulukko 10.** Pääjäähdytyspiirin radiaattorikentän jälkeisen lämpötilan vaikutus prosessiin: verifiointimittausten tulokset ja Tursim-mallin vastaavat tulokset. Muutettava asetusarvo on pääjäähdytys- eli lauhdutinpiirin lämpötila radiaattorien jälkeen, ja sen ohjausarvo vaikuttaa radiaattorien kierrosnopeuteen. Hamin mittauksissa ulkolämpötila oli vertailumittauksessa 13 °C ja asetusarvoa nostettaessa 14 °C. \*) Ei voitu muuttaa alaspäin, koska radiaattorit kävivät jo normaalitilanteessa 100 %:n teholla. \*\*) Radiaattorien kierrosnopeudet pienenevät.

Prosessimuuttaja	Vaikutus, kun asetusarvoa nostettiin		Vaikutus, kun asetusarvoa laskettiin	
	Ham	Tursim-malli	Ham	Tursim-malli
Asetusarvo	+28,6% →	+28,6% →	Ei testattu.*	-28,6% →
Kokonaisomakäyttöteho	-5,3%**	-	-	-
Höyryvirta MP-esilämmittimelle	-	-5,9%	-	+8,2%
Tuorehöyryvirta	+1,9%	+1,7%	-	+1,8%
Lauhdevirta	+3,2%	+3,2%	-	+0,76%
Syöttövesivirta	+3,8%	+1,7%	-	+1,8%
Lauhduttimen abs. paine	-0,03%	+53,5%	-	-33,2%
Polttoaineen kulutus	+2,4%	+1,6%	-	+1,8%
Sähköntuottohyötysuhde	-2,3%	-1,6%	-	-1,7%
Kate	+21,9%	-	-	-

### ***Pääjäähdytyspiirin lämpötila lauhduttimen jälkeen***

Lauhduttimen jälkeinen lämpötila säätää jäähdytysvesipumpun pyörimisnopeutta, joka vaikuttaa jäähdytysveden massavirtaan. Koska Tursim-mallissa ei voida muuttaa lauhduttimen jälkeistä lämpötilaa, muutetaan sen sijaan suoraan massavirtaa (taulukko 11). Eron vuoksi tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoiset muutoin kuin muutossuunnan osalta. Asetusarvoa nostettaessa lauhduttimen paine kasvaa, mutta vaikutus ei ole läheskään yhtä suuri kuin edellä tarkastellun radiaattorien jälkeisen lämpötilan noston seurauksena. Mittauksissa lauhduttimen jälkeisen lämpötilan noston vaikutus omakäyttötehoon on suurempi kuin radiaattorien jälkeisen lämpötilan noston vastaava vaikutus.

Asetusarvon noston seurauksena vesi-/höyrypiirin ja polttoaineen massavirrat kasvavat ja sähköhyötysuhde pienenee, ja vastaavasti asetusarvon laskun seurauksena massavirrat laskevat ja sähköhyötysuhde kasvaa.

**Taulukko 11.** Pääjäähdytyspiirin lauhduttimen jälkeisen lämpötilan vaikutus prosessiin: verifiointimitausten tulokset ja Tursim-mallin vastaavat tulokset. Muutettava asetusarvo on lauhduttimen jälkeinen pääjäähdytysveden lämpötila, ja sen ohjausarvo vaikuttaa kiertopumpun kierrosnopeuteen. Hamin mittauksissa ulkolämpötila oli vertailumittauksessa ja asetusarvoa nostettaessa 11 °C. \*) Lämpötilaa ei voi muuttaa mallissa. \*\*) Ei voitu muuttaa, koska tämänkin lämpötilan alaraja riippuu radiaattorien tehosta. \*\*\*) Pumpun kierrosnopeus pieneni.

Prosessimuuttuja	Vaikutus, kun asetusarvoa nostettiin		Vaikutus, kun asetusarvoa laskettiin	
	Ham	Tursim-malli	Ham	Tursim-malli
Asetusarvo	Lämpötila +11,1% →	Jäähdytysveden massavirta* - 11,1% →	Ei testattu.**	Jäähdytysveden massavirta +11,1% →
Kokonais- omakäyttöteho	-9,0%***	-	-	-
Tuorehöyryvirta	+0,58%	+0,09%	-	-0,02%
Lauhdevirta	+1,6%	+0,31%	-	-0,15%
Lauhduttimen abs. paine	+8,4%	+6,5%	-	-5,0%
Laskettu polttoai- neen kulutus	+0,75%	+0,09%	-	-0,03%
Sähköntuotto- hyötysuhde	-0,75%	-0,09%	-	+0,03%
Kate	+253,5%	-	-	-



### ***Tulosten vertailu***

Kun kahden eri herkkyytarkastelun tuloksia verrataan keskenään, huomataan että tuloksissa on jonkin verran ristiriitaisuuksia.

Syöttövesisäiliön paineen ja lämpötilan kasvattaminen:

- Mallinnuksen perusteella kate paranee (tuotot kasvavat, kustannukset kasvavat)
- Mittausten perusteella kate huononee (tuotot pienenevät, kustannukset kasvavat)
- Eron syy: omakäyttötehon vaihtelu mittauksissa. Vaikka bruttoteho pysyi vakiona, syöttövesipumpun aiheuttama omakäyttötehon lisääntyminen vähensi sähkön myyntiä.

Paine-eron pienentäminen syöttövesiventtiin yli:

- Ei mallinnettu.
- Mittausten perusteella kate paranee (tuotot pienenevät, kustannukset pienenevät)

Toisen välioton paineen kasvattaminen:

- Mallinnuksen perusteella kate huononee (tuotot pienenevät, kustannukset pienenevät)
- Mittausten perusteella kate huononee (tuotot pienenevät, kustannukset kasvavat)
- Kustannusten eron syy: mallinnuksessa sähkönsiirtokustannukset pienenevät. Mittauksissa omakäytösähköteho ja polttoaineteho kasvavat.

#### Pääjäähdytyspiirin lämpötilan kasvattaminen radiaattorien jälkeen

- Mallinnuksen perusteella kate paranee (tuotot kasvavat, kustannukset kasvavat)
- Mittausten perusteella kate paranee (tuotot kasvavat, kustannukset kasvavat)
- Sekä mallin että mittausten tulosten yhtäläisyys on yllättävä, koska odotettu tulos oli päinvastainen. Suuri syy on sähkön omakäyttötehon väheneminen lämpötilaa nostettaessa.

#### Pääjäähdytyspiirin lämpötilan kasvattaminen lauhduttimen jälkeen

- Ei mallinnettu.
- Mittausten perusteella kate paranee (tuotot kasvavat, kustannukset pienenevät)
- Jäähdytyspiirin optimointi on tärkeä prosessin hyötysuhteeseen ja käyttökattteen vaikuttava asia. Jatkossa radiaattorien säätöä tullaan kehittämään paremmin ulkoisten olosuhteiden vaihteluun reagoivaksi.

#### Kaukolämpötehon kasvattaminen

- Mallinnuksen perusteella kate paranee (tuotot kasvavat, kustannukset pienenevät)
- Ei mitattu.

#### Ilman esilämmittimille menevän höyrymäärän kasvattaminen

- Mallinnuksen perusteella kate huononee (tuotot pienenevät, kustannukset pienenevät)
- Ei mitattu.

## 8 KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS

Käytönaikainen optimointijärjestelmä tullaan toteuttamaan todennäköisesti seuraavalle sopivalle MW Powerin toimittamalle voimalaitokselle. Järjestelmän käytännön toteutusta eli implementointia varten tässä luvussa käydään läpi optimointia varten tarvittavia tietoja.

Käytönaikaisen optimoinnin perusideana on, että kullekin asetusarvolle etsitään kokonaistalouden kannalta optimiarvo, jota kohden aletaan pyrkiä ohjauksella. Käytännössä prosessi elää koko ajan, ja ulkoiset olosuhteet muuttuvat muodostaen lukemattomia erilaisia kombinaatioita. Jatkuvan muutoksen vuoksi absoluuttiseen prosessin optimiin tuskin päästään, mutta tärkeintä onkin jatkuvasti pyrkiä sitä kohti niin, että kukin säätöhetki on edellistä parempi.

Jonkin olosuhteen äkillisen muutoksen vuoksi säätimet voivat joutua hetkeksi kauas optimiarvoista, ja siksi asetusarvot on tarkoituksenmukaista saada mahdollisimman nopeasti takaisin hyvän käyttökattteen alueelle. Ensimmäinen vaihe optimoinnissa onkin senhetkisten ulkoisten olosuhteiden (hinnat, polttoaine, tehontarve, säätötila) tunteminen. Optimin hakemiseen on kolme erilaista keinoa, joiden antamia katteita verrataan keskenään, ja parhaan kattteen antava säätövaihtoehto otetaan käyttöön seuraavan minuutin ajaksi. Vaihtoehdot ovat:

1. Optimi lasketaan kustannusfunktion perusteella (luku 6). Edellisen minuutin mittausdatasta lasketaan voimalaitoksen massa- ja energiataseet. Tulokset viedään kustannusfunktion, jossa lasketaan tasetietoihin perustuva kate. Tehtyjen herkkyyssanalyysien perusteella tiedetään, mihin suuntaan säätimien asetusarvoja on muutettava, jotta kate paranisi entisestään. Laitoksen käyttöönoton yhteydessä tehdään säätimien viritys, joka määrittelee kunkin säätimen muutosnopeuden sekä mahdollisen muutosuuruuden asetusarvolle. Kustannusfunktion optimoinnista saadaan säätimille suunnat seuraavan minuutin ajalle. Mikäli herkkyyssanalyysin perusteella annetut asetusarvot kuitenkin johtavat oletusten vastaisesti huonompaan katteeseen, täytyy säätöä korjata. Tällöin sille etsitään uutta suuntaa optimointialgoritmilla (kuten Hooke-Jeeves) samoin kuin kohdassa 3 kuvataan. Tätä optimointitapaa käytetään varsinkin prosessin käydessä suurin piirtein stationääritilassa eli ympäristöolosuhteiden pysyessä vakioina.

2. Optimi haetaan tilastollisella haulilla historiadatasta (luku 4.4). Tätä optimointitapaa käytetään erityisesti olosuhteiden muuttuessa nopeasti. Esimerkiksi sähkön hinnan muuttuessa ohjelma etsii historiadatasta tilannetta, jossa sähkön hinta ja muut ulkoiset olosuhteet ovat määritellyissä rajoissa samat kuin nykyhetkenä. Ehdot täyttäviä ajanhetkiä saattaa löytyä useita. Tällöin käyttöön otetaan sen historian hetken säätimien asetusarvot, jolla on saavutettu paras kate.
3. Jos käytössä on dynaaminen tai online-simulaattori (luku 9.3), voidaan säätimien asetusarvoja iteroida optimointialgoritmin (esimerkiksi Hooke-Jeeves, luku 4.4) avulla paremmiksi. Algoritmi tutkii nykyisen asetusarvon ympäristön laskien samalla, paraneeko kate johonkin uuteen suuntaan mentäessä. Jos jokin suunta tuottaa nykyistä paremman katteen, mennään tähän suuntaan seuraavan minuutin ajan. Jos laskenta osoittautuu nopeaksi, voidaan yhden laskentaminuutin sisällä laskea useampikin optimointialgoritmin askel kerrallaan ennen uuden asetusarvon antamista kullekin säätimelle. Tämä tapa on muutoin verrattavissa kohtaan 1, mutta sen tapauksessa ei ole simulaattoria, vaan simulaattorina toimii koko prosessi, jota muutetaan minuutin välein. Ilman simulaattoria algoritmi voi ottaa vain yhden askeleen minuutissa, jolloin se voi hetkellisesti aiheuttaa katetta huonontavankin arvon. Tällöin algoritmi yrittää hakea parempia asetusarvoja eri suunnasta seuraavana minuuttina.

Olkoon optimointitapa jollakin tietyllä minuutilla mikä tahansa yllä esitetystä vaihtoehdoista, se on aina määräävä tekijä säädön suhteen. Säättöjärjestelmä saa optimoinnista uudet asetusarvot, joita kohti se alkaa prosessia ajaa. Laitoksen toiminnan perustana on siis yhdistetty optimointi-tiedonhaku-säättöjärjestelmä.

## 8.1 Optimointia varten tarvittavat tiedot

Voimalaitoksen käytönaikaista optimointia varten tarvitaan erilaisia lähtötietoja optimoinnin eri vaiheisiin. Tässä luvussa kerrotaan, mistä tarvittavat tiedot hankitaan ja mihin malleihin niitä sovelletaan. Tietoina tarvitaan ensinnäkin ympäristön olosuhteet, sitten laitospmallin tase-tiedot, kustannusfunktioon liittyvät hinnat ja optimoinnin raja-arvot.

### ***Ympäristön olosuhteet***

Ympäristön olosuhteet ovat ne reunaehdot, joiden puitteissa optimointi suoritetaan. Näiden olosuhteiden perusteella lasketaan prosessin optimitila ja  $-kate$ , johon verrataan edellisminuutin tasetietojen perusteella laskettua katetta. Ulkoisten olosuhteiden muutoksen vaikutus kuhunkin yksittäiseen säätimeen kannattaa selvittää jatkotutkimuksena erillisellä herkkyystarkastelulla. Esimerkiksi ulkoilman lämpötilan muuttuessa mutta asiakkaiden tehontarpeen pysyessä ennallaan joidenkin säätöjen (kuten radiaattoriin säätöjen) järkevät suunnat voivat muuttua. Tällaisille säätimille on tarpeellista määrittää erilaiset säätöalueet eri tilanteita varten, aina kokonaistaloudellinen optimointi mielessä pitäen. Tarkastelua helpottaisi, jos sitä ennen otetaan käyttöön prosessin dynaaminen simulaattori (luku 9.3). Kun näistä olosuhteista saadaan tulevaisuudelle ennusteet (esimerkiksi SQL-palvelimen kautta), voidaan myös tulevaisuuden säätöjä ennustaa. Vähintään reaaliaikaiset, mutta mielellään myös ennustetut tiedot tarvitaan seuraavista tekijöistä:

- Sähkön hinta
- Sähkötehon kysyntä
- Lämmön hinta
- Lämpötehon kysyntä
- Polttoaineen hinta
- Polttoaineen lämpöarvo
- Ulkoilman lämpötila
- Jäähdytysveden lämpötila, jollei se riipu suoraan ilman lämpötilasta

### ***Kustannusfunktioita varten tarvittavat tiedot***

Optimoinnin päätarkoitus on saavuttaa mahdollisimman hyvä taloudellinen hyöty. Tätä tarkoitusta varten tarvitaan hintatiedot katteen osatekijöistä. Voimalaitoksen katteeseen vaikuttavat seuraavat hinnat:  $k_{Sä\_myynti\_net}$ ,  $k_{Lä\_myynti}$ ,  $k_{Hö\_myynti}$ ,  $k_{Tuki}$ ,  $k_{Pääst\_myynti}$ ,  $k_{Inv}$ ,  $k_{Kikut}$ ,  $k_{Huolto}$ ,  $k_{Pa\_pää}$ ,  $k_{Pa\_apu}$ ,  $k_{Live}$ ,  $k_{Hiekka}$ ,  $k_{Kemik}$ ,  $k_{Pääst\_osto}$ ,  $k_{Tuhka}$ ,  $k_{Jäve}$ ,  $k_{Muut\ mukut}$ ,  $k_{OK}$ ,  $k_{Sä\_siirto\_net}$ ,  $k_{Sä\_vero\_net}$ ,  $k_{Sä\_osto}$  ja

$k_{Pa\_jä\_vero}$ . Hintojen ja varsinkin niihin liittyvien kustannusten selitykset on listattu kustannusfunktioluvussa 6.

Prosessimallissa lasketut tasetiedot tuodaan kustannusfunktiolle. Erityisesti tarvitaan tuottoja tai kustannuksia aiheuttavien tehojen ja massavirtojen tiedot. Nämä tiedot liittyvät edellä lueteltuihin hintoihin, ja nekin on selvitetty luvussa 6. Lisäksi kustannusfunktioon tarvitaan tiedot siitä, mitkä kaikki luetelluista kustannusfunktion tekijöistä otetaan käytännössä huomioon ja mitkä voidaan asettaa suoraan nolliksi. Esimerkiksi päästökauppaan liittyviä termejä ei tarvitse huomioida pienillä laitoksilla. Käytönaikaisessa laskennassa myös joidenkin tehojen ja virtausten ”käyntitiedot” vaihtelevat ollen välillä nolliä, välillä siitä poikkeavia. Tällaisia tietoja ovat esimerkiksi apupolttoaineen teho ja myytävä lämpöteho

### ***Historiadataan hakua varten tarvittavat tiedot***

Historiatietokannasta datan haku tehdään prosessin ulkoisten olosuhteiden perusteella, eli hakua varten tarvittavat tiedot ovat samoja kuin kohdassa ”Ympäristön olosuhteet” luetellut tiedot. Jokaiselle tekijälle pitää määrittää hakukriteeralueet eli raja-arvot, joiden perusteella tietoa haetaan. Esimerkiksi ulkoilman lämpötilalle hakukriteerinä voisi olla  $\pm 0,5$  °C tai jollekin hinnalle  $\pm 0,50$  Eur/MWh tämänhetkiseen verrattuna. Historiasta haetut pääsäätimien asetusarvot otetaan uudestaan käyttöön nykyhetkenä.

Haun tuloksena saadaan asetusarvot pääsäätimille, jotka on lueteltu jäljempänä kohdassa ”Optimointiin osallistuvat säätöpiirit”. Listatut pääsäätimet ovat keskeisimmin suorituskykyyn ja toiminta-arvoihin vaikuttavia tekijöitä. Muut säätimet reagoivat näiden pääsäätimien muutoksiin, eikä niitä erikseen optimoida.

Tietokannassa oleva data sisältää prosessin luontaista kohinaa. Sitä voidaan vaimentaa esimerkiksi ottamalla datasta aina kymmenen minuutin liukuva keskiarvo (Tulokas 2002, s. 43), mutta tällöin voi tulla hankaluuksia nopeisiin muutostilanteisiin liittyvän datan haussa.

### ***Optimointialgoritmia varten tarvittavat tiedot***

Optimointialgoritmistä kerrotaan luvussa 4.4. Optimointialgoritmia sovelletaan silloin, kun historiadatasta ei enää löydy nykyhetkeä parempaa katetta antavaa tilannetta eikä myöskään kustannusfunktioon ja herkkyytarkasteluun perustuva säätö anna paranevaa tulosta. Algoritmi tarvitsee sisääntuloarvoina edellisen laskentaminuutin mittaustulokset, jotka ovat kunkin säätimen optimoinnin lähtökohta. Lähtötietojen perusteella selvitetään iteratiivisella optimin haulla kerran minuutissa, miten nämä arvot muuttuvat tarkastelupisteen ympäristössä.

Dynaamisen tai online-simuloinnin tapauksessa optimointialgoritmin on voitava kommunikoida prosessin simulointimallin ja talousfunktion kanssa. Funktion tuloksesta nähdään, paraneeko kate, jos säätimen asetusarvoa muutetaan johonkin tiettyyn suuntaan. Muutoksia voidaan tehdä useita saman minuutin aikana. Kun sopiva suunta ja askeleen suuruus on löytynyt, algoritmistä saadaan ulostuloina säätimien asetusarvot.

### ***Optimointiin osallistuvat säätöpiirit***

Taulukossa 12 on listattu 12 eniten laitoksen kustannuksiin vaikuttavaa säätöpiiriä. Nämä säätimet ovat muita tärkeämpiä, kun kaikki laitoksen säätimet asetetaan hierarkiseen järjestykseen. Näille pääsäätimille lasketaan optimoinnissa uudet asetusarvot, joihin kukin yrittää prosessia omalta osaltaan ajaa. Joissakin tapauksissa kahdella eri säätimellä voi olla vastakkaiset vaikutukset samaan prosessisuureeseen. Säätimien merkittävyydestä riippuu, kumman vaikutus on lopulta suurempi. Säätimien reagoitiherkkyksien ja muutosnopeuksien määrittäminen tehdään niiden virityksessä. Esiviritys tapahtuu tehdastestauksena ennen järjestelmän asentamista laitokselle, ja lopullinen viritys laitoksen käyttöönotossa. Logiikassa on lisäksi huomioitava kunkin säätimen rajoitteet ja riippuvuudet toisistaan. Esimerkiksi tuorehöyryn teho on suoraan riippuvainen generaattorin tuottamasta sähkötehosta.

**Taulukko 12.** Prosessin pääsäätöpiirit, jotka huomioidaan optimoinnissa.

<b>Säädin</b>	<b>Säädön kohde</b>
Syöttövesisäiliön paine	Syöttövesisäiliön höyryventtiili
Kattilan teho	Lieriön pinta, primääri-ilmamäärä, polttoaineen syöttö
Tulistetun höyryn lämpötila	Kattilan ulostulo
Tuorehöyryn paine	Kattilan teho
Generaattorin teho	
2. välioton paine	Turbiinin vaiheiden välinen venttiili
Kaukolämpöveden lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen	Sekoitusventtiili
Jäähdytysveden lämpötila radiaattorien jälkeen ennen pumppua	Radiaattorien pyörimisnopeudet
Jäähdytysveden lämpötila lauhduttimen jälkeen ennen radiaattoreita	Jäähdytysvesipumpun kierrosnopeus
Matalapaine-esilämmittimen jälkeinen päälauhteen lämpötila	Matalapaine-esilämmittimen höyryventtiili
Primääri-ilman lämpötila höyryluvon jälkeen	Primääriluvon säätöventtiili
Sekundääri-ilman lämpötila höyryluvon jälkeen	Sekundääriluvon säätöventtiili



## 9 JATKOKEHITYS

MultiPower CHP –projektia jatketaan tästä diplomityöstä eteenpäin aiemmin määritellyn Infotaselaskennan sekä tässä työssä määritellyn käytönaikaisen optimointimenetelmän käytännön toteutuksella. Toteutusta varten joidenkin tämän työn aikana esiin nousseiden asioiden tarkastelua tarvitsee vielä syventää.

- Optimointialgoritmin lopullinen valinta. Luvussa 4.4 esiteltiin Hooke-Jeeves-algoritmi, mutta sen sijasta voidaan myös käyttää jotakin tilanteeseen sopivampaa ja tehokkaampaa algoritmia, mahdollisesti esimerkiksi polytooppihakua. Valinnassa huomioitavia seikkoja ovat kohdefunktioon liittyvä kohina ja monirajoitteisuus. Useita muuttujia sisältävällä funktiolla voi olla monia lokaaleja ratkaisuja, joista olisi voitava valita globaali optimi. Lisäksi laskennan on tapahduttava nopeasti, jotta prosessin optimointi olisi tehokasta. Rajoitteet on määritettävä tarkasti ja selvitettävä laskentaan kuluva aika.
- Herkkyysanalyysiä kannattaa jatkaa tarkastelemalla erityisesti ulkoisten olosuhteiden (luku 8.1) vaikutusta voimalaitoksen katteeseen. Juuri ulkoiset tekijät ovat muun muassa historiadatan hakuehtona ja niiden asettamisessa rajoissa prosessia optimoidaan.
- Voimalaitoksen osaprosesseja kannattaa tarkastella yksitellen optimoinnin näkökulmasta. Varsinkin pääjäähdytyspiirin optimoinnissa ja säädössä on paljon kehityspotentiaalia.

Muita prosessin ja automaation jatkuvaan kehittämiseen liittyviä asioita ovat:

- Omakäyttö sähkötehon ja vedenkulutuksen vähentäminen prosessiteknisin ratkaisuin sekä säätöjärjestelmän parantamisen ja optimoinnin tuloksena.
- Erilaisten hukkalämpöjen (esimerkiksi ulospuhallusveden ja pohjatuhkan jäähdytysveden lämmön) talteenotto prosessiteknisin ratkaisuin.
- Huollon optimointi ja laitoksen käytettävyys. Laitos on jo nyt suunniteltu miehittämättömäksi ajaa varten, mutta siihen liittyviä toimintoja kehitetään edelleen. Eri laitteiden huollontarve ja –ajankohdat kannattaa ottaa tarkasteluun.

- Nuohouksen optimointi. Nyt nuohous perustuu pienissä voimalaitoksissa savukaasun lämpötilan muutokseen. Se on kuitenkin hyvin epätarkka keino määrittää nuohouksen tarvetta, ja korkeapaineista höyryä käyttävää nuohousta saatetaan tehdä turhan usein.
- Automaattisen raportoinnin määrittely ja toteutus ovat työn alla.
- Ennustavan säädön käyttöönotto jossakin muodossa. Toteutustavan määrittely vaatii vielä lisäselvityksiä, mutta osittain toteutuksessa voitane hyödyntää jo valmiiksi ohjelmoituja laskentakomponentteja. Tästä aiheesta kerrotaan seuraavaksi lisää.

Tähän asti työssä määritelty optimointilaskenta on ollut lähinnä stationääritilan laskentaa. Jatkokehityksenä MultiPower CHP- prosessin tuotannon optimointiratkaisun rinnalle voidaan ottaa käyttöön monimuuttujainen mallipohjainen ennustava säätötapa, jonka teoriaa käytiin läpi luvussa 3. Ennustavan säädön ansiosta laskennasta tulee dynaamista ja tulevaisuuden tapahtumat ennakoivaa. Ennustavan säädön käytännön implementoinnin MW Powerin voimalaitoskonseptiin tulee tekemään Metso Automaatio, jolla on jo käytössään laskentaan tarvittavat työkalut. Niistä käytetään tuotenimeä Metso DNA Energy Management. Tuoteperheeseen kuuluvat höyryverkon hallintasovellus (Steam Network Manager) ja palamisen optimoija (Combustion Manager), jotka esitellään seuraavissa luvuissa, sekä lisäksi myös turbiinin säätäjä (Steam Turbine Controller). Sovellusten testaukseen voidaan käyttää dynaamista simulointia. Nyt kehitettävä järjestelmä tulee poikkeamaan tästä olemassa olevasta järjestelmästä monilta osin, mutta MW Powerin uuden tuotannon optimointijärjestelmän ohjelmointivaiheessa voidaan varmasti osittain hyödyntää näitä valmiita työkaluja.

## 9.1 Ennustavan säädön toteuttaminen

Tässä diplomityössä optimoinnin voimalaitosmalli luotiin käyttämällä kahta eri mallinnusohjelmaa, PBD:tä ja Tursimia, joista simulointidata siirrettiin Exceliin. Kun optimointijärjestelmä toteutetaan todellisessa voimalaitosympäristössä, tämä väliaikainen stationääritilan laitosmalli korvataan käytönaikaisella, minuutin välein päivittyvällä optimointi- ja säätöjärjestelmällä, johon voidaan liittää tuotannon ennustavuus ulkoisten olosuhteiden perusteella. Järjestelmää olisi mahdollista soveltuvien osin täydentää Metson höyryverkon hallintasovelluksella

Metso DNA Steam Network Managerilla. Ohjelman tarkoitus on tasaannuttaa ja optimoida höyryn tuotantoa, parantaa höyryn laatua ja käytettävyyttä sekä minimoida häviöitä, kuten ilmaushäviöitä. Järjestelmään kuuluvalla höyryverkoston ennustavalla monimuuttujasäädöllä vakautetaan sekä höyrytasetta että verkon paineita. (Pyykkö 2011, s. 2-3)

Perinteinen höyryntuotantolaitos kärsii helposti monista energiatehokkuutta heikentävistä ongelmista, kuten liiallisesta tuotannosta, jolloin höyryä on ajettava ilmakehään, tai liian vähäisestä tuotannosta, jolloin höyryn kuluttaja-asiakas kärsii häviöitä. Mikäli verkossa on useita höyryntuottajia, sovellus määrittelee niiden tuotantojärjestyksen ja -osuudet niin, että polttoainekustannukset minimoituvat ja höyryn tuotanto maksimoituu halutuissa rajoissa. (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 3 - 4)

Höyryakku asennettuna höyryverkkoon tasoittaa verkon paineen ja höyrymäärän vaihteluita. Akku voidaan ladata korkeapaineisella ylimäärähöyryllä ja vastaavasti se voidaan purkaa piikkikuormatilanteessa tai muutoin, kun prosessiin tarvitaan lisää höyryä. Akun varauskapasiteettia säädetään höyryverkon kannalta tehokkaasti.

Myös muita höyryn tasauslaitteita, kuten reduktioventtiileitä, syöttövesisäiliötä, lauhdutinta, turbiinia tai kattilaa voidaan käyttää höyryn varastoimiseen ja kulutuksen vaihtelun kompensoimiseen sekä höyryn toimituksen varmistamiseen häiriötilanteissa. Tällöin kattilan tehonvaihtelun nopeus hidastuu, käytettävyys paranee ja laitteiston vahingoittumisriski pienenee. Mikäli kattilaan tulee häiriö, höyryvarastoja voidaan käyttää, kunnes kattila saadaan jälleen ajettua ylös. (Farrand ja Jalkanen 2007. s. 24)

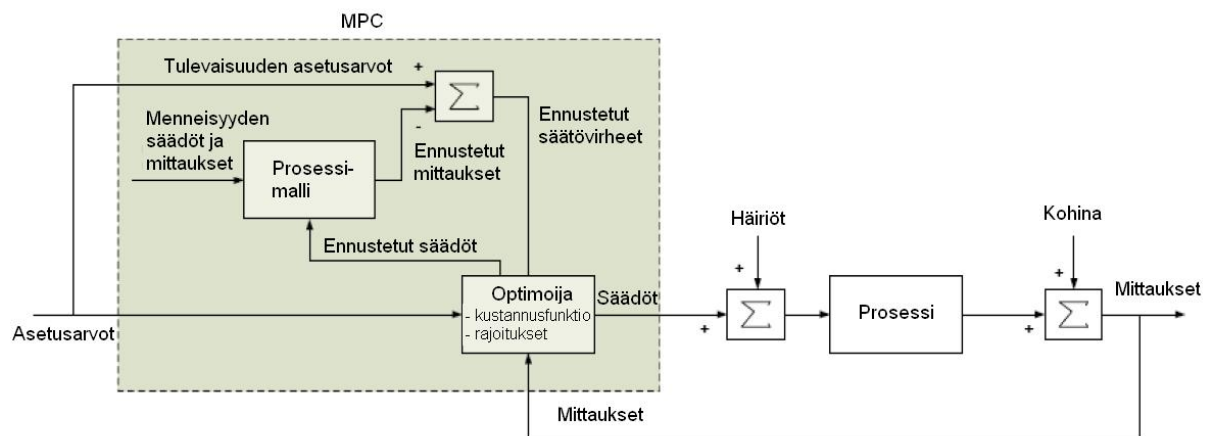
Syöttövesisäiliön höyryn kulutus riippuu osaksi kylmän lisäveden määrästä. Jos höyryn kulu- tusta on tarpeellista muuttaa, voidaan lisäveden syöttöä säiliöön muuttaa sallien pinnan vaihtelu tietyissä rajoissa. Laitoksen normaalin ajon aikana reduktio-, startti- ja osittain myös ulospuhallusventtiileitä käytetään kompensoimaan höyryverkon epätasapainotilanteita. Höyryverkon hallintasovellusta käytettäessä näiden venttiilien käyttö vähenee huomattavasti, ja höyryä ajetaan ilmakehään vasta, jos häiriö on niin voimakas, ettei sitä ehditä käsittelemään energiataloudellisemmin keinoin. (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 4)

### 9.1.1 Höyryverkon hallintasovelluksen säätötapa

Optimoitu höyryn tuotanto toteutetaan seuraavaksi kuvatulla tavalla. Järjestelmä sisältää monimuuttujasäätimen (Steam Network Managerin), joka koordinoi monia prosessiparametreja, mittauksia ja häiriöitä. MPC-säätimen periaatekaavio on esitetty kuvassa 33. Säädin on samalla reaaliaikainen ja ennustava, joten se ottaa huomioon tarvittavat säätötoimenpiteet sekä nykyhetkellä että mallinnetussa tulevaisuudessa. Säädin käsittelee muuttujia optimaalisesti niin, että laitoksen toiminnan kustannukset minimoituvat. Prosessia rajoittavat tekijät otetaan huomioon tarpeen mukaan määräaikaaisesti tai pysyvästi. Järjestelmä vähentää ja korjaa mallinnuksessa ja mittauksissa esiintyviä virheitä. Prosessi tasaantuu, jolloin säätötoimenpiteet sekä toimilaitteiden käyttö vähenee. Asetusarvot voidaan määrätä muuttumaan annetuilla ajanhetkillä määrätyn verran, eli niilläkin voi olla omat liikeratansa. (Leppäkoski 2006)

Mallipohjaisen ennustavan säädön peruspilarina on prosessin eksplisiittinen malli. Tämänhetkisen prosessin tilan perusteella ennustetaan säädettävien suureiden käyttäytyminen tulevaisuudessa. Säätö sisältää myös optimointimenetelmän parhaiden ohjausten ratkaisemiseksi. Tämä säätömenetelmä soveltuu hyvin koko voimalaitosprosessin ohjaukseen, sillä sillä hallitaan pitkät viiveet, ohjausten ja ulostulojen rajoitteet sekä muuttujien väliset ristikkäisvaikutukset. (Koukkunen ja muut 2005, s. 3)

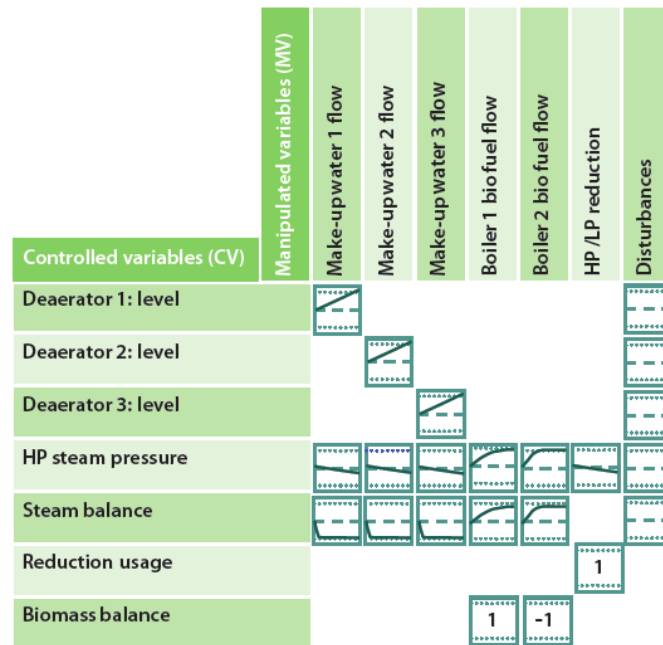
Suurin ero MPC:n ja tässä diplomityössä kehitetyn optimointimenetelmän (kuva 22) välillä on optimoijan ja säätimien suhde toisiinsa. Metson MPC:ssä ne on integroitu yhtenäiseksi kokonaisuudeksi, joka kommunikoi prosessin kanssa asetuservojen ja mittaustulosten muodossa. MW Powerin tarpeiden mukaista on pitää optimointi ja säätöjärjestelmä erillään toisistaan rakenteen yksinkertaistamiseksi ja selkeyttämiseksi. Jatkokehityksenä on tarkoitus selvittää, voidaanko MW Powerin järjestelmään hyödyntää MPC-säätimestä esimerkiksi joitakin laskeutakomponentteja tai ulkoa tulevien ennusteiden hakutapoja.



**Kuva 33.** Metso DNA Steam Network Managerin MPC-säätimen laatikkodiagrammi (kuvaa muokattu). (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 6)

Jokaisella määrättyllä säätöhetkellä MPC ratkaisee reaaliaikaisesti etukäteen määritellyn skalaariarvoisen optimointifunktion. Funktio on useiden muuttujien funktio ja sillä on rajoitteita. Tuloksena on optimaalinen säätöratkaisu. Vain ensimmäinen laskennan tulos otetaan käyttöön. Jokaisella säätöhetkellä toistetaan sama proseduri päivitetyn mittaustuloksen. (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 4 - 5)

Höyryverkon hallintasovelluksen rakennetta varten pitää määritellä toimuureet (manipulated variables MV), ohjatut muuttujat (controlled variables CV) ja häiriömuuttujat (disturbance variables DV). Toimuureita muokataan MPC-säätäjällä niin, että ohjatut muuttujat lähestyvät asetusarvojaan. Esimerkkejä toimuureista ovat erilaisten virtausten, paineiden ja lämpötilojen poikkeamat, ja ohjatuista muuttujista itse paineet ja lämpötilat. Laskennan tavoitteena voi olla esimerkiksi hyötysuhteen parantaminen. Häiriömuuttujat ovat puolestaan mitattavia säätöä häiritseviä tekijöitä. Kuvassa 34 on esimerkki MPC:n säätömatriisista. Perustuen MPC:hen sovellus laskee optimaaliset toimuureet, joilla säätövirhe poistetaan tehokkaasti asetusarvon ja ohjattujen muuttujien väliltä. Lisäksi se myös ennustaa ohjattujen muuttujien tulevaa käyttäytymistä minimoiden näin ennustetun säätövirheen. (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 6)



Kuva 34. Säätomatriisiesimerkki. (Airikka 2009, s. 3)

Höyryverkon hallintasovelluksen kohdefunktio on optimoinnin määrittelyn perusta ja se on seuraavanlainen:

$$J = \sum_{i=s}^k [\mathbf{y}_r(t+i) - \hat{\mathbf{y}}(t+i)]^T \mathbf{Q}_i [\mathbf{y}_r(t+i) - \hat{\mathbf{y}}(t+i)] + \sum_{i=0}^{l-1} \Delta \mathbf{u}^T(t+i) \mathbf{R}_i \Delta \mathbf{u}(t+i), \quad (22)$$

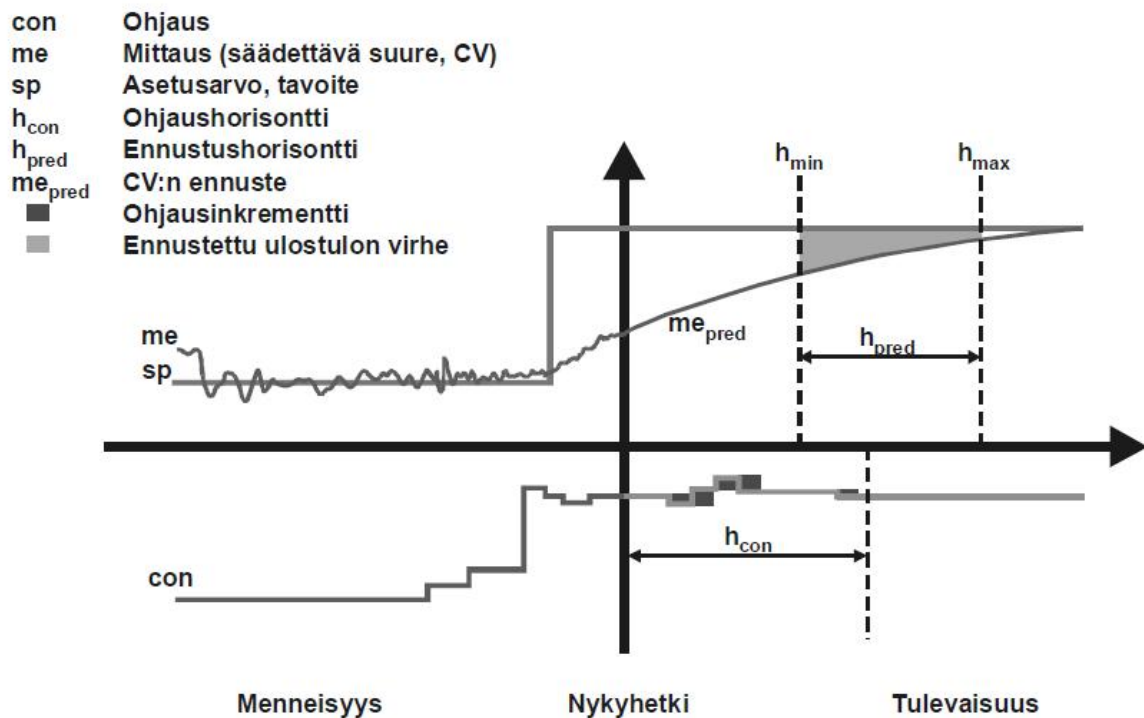
- missä
- $J$  kustannusfunktion skalaariarvo
  - $\mathbf{y}_r$  asetusravomuuttuja
  - $\mathbf{y}$  ohjattujen muuttujien CV vektori
  - $\Delta \mathbf{u}$  toimituureiden MV muutoksen vektori
  - $\mathbf{Q}$  ohjattujen muuttujien viritysmatriisi (painokerroinmatriisi  $\mathbf{y}$ :lle)
  - $\mathbf{R}$  toimituureiden viritysmatriisi (painokerroinmatriisi  $\Delta \mathbf{u}$ :lle)
  - $t$  nykyhetken aikaindeksi tai kokonaisluku, joka merkitsee aikaindeksiä
  - $i$  kokonaisluku eli integer

$s$	ohjattujen muuttujien ennustusindeksi (kuvassa 35 ennustusaikavälin alaraja $h_{\min}$ )
$k$	ohjattujen muuttujien ennustusindeksi (kuvassa 35 ennustusaikavälin yläraja $h_{\max}$ )
$l$	toimisuureiden ennustusindeksi (kuvassa 35 ennustusaikaväli $h_{\text{con}}$ )

Kohdefunktion skalaariarvo  $J$  minimoidaan joka hetki. Toimisuureiden muutokset edelliseen ajanhetkeen verrattuna  $\Delta \mathbf{u}$  ratkaistaan jokaisella säätöhetkellä. Toimisuureille voidaan asettaa minimi- ja maksimiarvorajoitteita, jotka huomioidaan funktiota ratkaistaessa. Sovellus kykenee ennustamaan ohjattujen muuttujien tulevaa muutosta. Ohjelma minimoi ennustetun säätövirheen kustannusfunktion rajoissa. Yleensä säätimet minimoivat vain kyseisen hetken säätövirheen, mutta ennustavuus on hyödyllinen ominaisuus. (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 5)

Ennustavassa säädössä oleellista on liikkuvan horisontin periaate (kuva 35). Ennustehorisontti sisältää askeljoukon  $h_{\min} \dots h_{\max}$ . Järjestelmän ulostuloa ennustetaan siis  $h_{\max}$  askelta tulevaisuuteen. Ohjauksen oletetaan säilyvän nykyisellään. Malli laskee sellaisen ohjausmuutosten eli –korjausten sarjan, jolla korjattuna ennustettu ulostulo lähenee tavoitetilaa ennustehorisontin sisällä. Tämän sarjan pituus  $h_{\text{con}}$  on ohjaushorisontti. (Koukkunen ja muut 2005, s. 3)

Ohjattujen muuttujien mittaustuloksia merkitään  $me_{\text{pred}}$ . Näiden mitattujen ohjattujen muuttujien dynaaminen käytös ennustetaan prosessimallilla. Ennustettu ohjausvirhe lasketaan ennustamalla ohjatut muuttujat ennustusaikavälille asti ja vertaamalla näitä arvoja tulevaisuuden asetusarvoihin. Ennustettu ohjausvirhe syötetään optimoijaan. Optimoija palauttaa sellaiset toimisuuret, jotka minimoivat kustannusfunktion. (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 5 - 6) Luvussa 6 esitetty optimoinnin kohdefunktio on siis rakenteeltaan hieman erilainen, sillä siinä oli pääasiallisena tarkoituksena maksimoida katetta. MPC:n ratkaisualgoritmi laskee optimaaliset ohjaukset koko ohjaushorisontille, mutta vain ensimmäinen niistä viedään prosessiin asti. Samat toimenpiteet toistetaan taas seuraavalla askeleella, ja ennustehorisontti siirtyy yhden askeleen eteenpäin säilyen samanpituisena. Tätä tarkoittaa liikkuvan horisontin periaate. (Koukkunen ja muut 2005, s. 3)



**Kuva 35.** Mallipohjaisen ennustamisen periaate. Ennustava tulevaisuuden säätövirhe ja säätösignaali. (Koukkunen ja muut 2005, s. 3)

Kun höyryverkon hallintasoftwarella implementoidaan käytännössä voimalaitokselle, se integroidaan asiakkaalla käytössä olevaan automaatiojärjestelmään. Ohjelma sijaitsee omalla ACN-tyyppisellä prosessinsäätöasemallaan. Sen tietokonenäytöt ovat samankaltaisia muiden automaationäyttöjen kanssa. Yleensä hallintasoftwarella on yksi päänäyttö, jossa näkyy koko höyryverkko kattiloineen, kuluttajineen ja varusteineen. Näytöllä näkyvät oleelliset höyryn paineet, virtaukset sekä säätimet, joita operaattorit voivat käyttää. Höyryn tuotto- ja kulutustase on myös nähtävillä. Lisänäyttöjä on trendien piirtämiseen ja sovelluksen hienosäätöön. (Airikka ja Mäkilä 2010, s. 6)

### 9.1.2 Ennusteiden teko

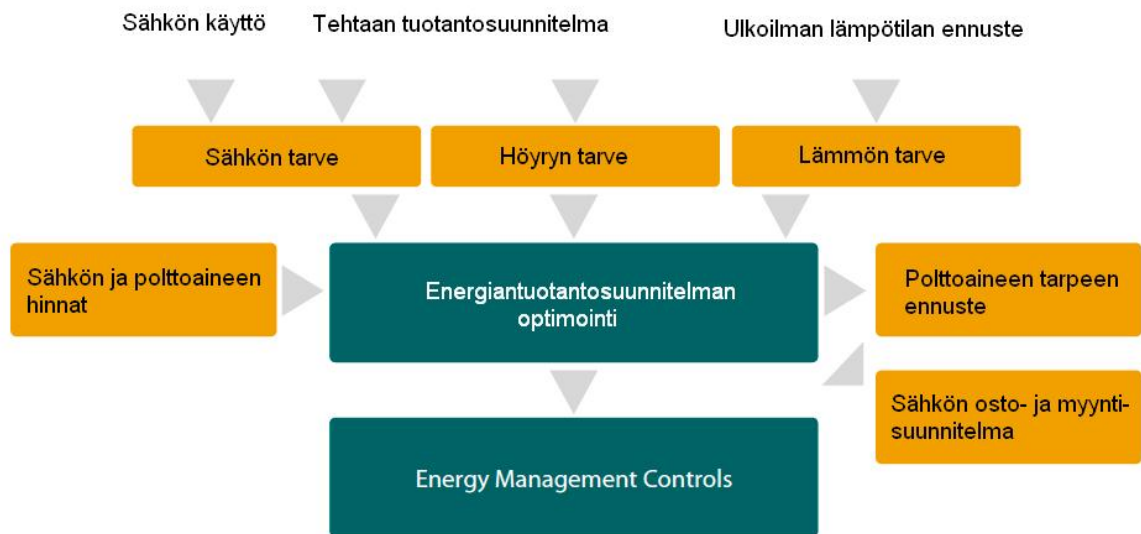
Ennustava säätömenetelmä tuottaa ennusteita voimalaitoksen käytölle ulkopuolelta haetun tiedon perusteella ja säätää prosessia ennusteiden mukaisesti. Metso DNA Energy Management on energiantuottajille tarkoitettu modulaarinen energianhallintajärjestelmä, eli energioita tasoittavia ja taloudellisia päätöksiä tekevä pitkän ja lyhyen aikavälin optimoinnin



hallitseva kokonaisuus. Ohjelmiston päämäärä on tuotannon optimointi, energian tuotantokulujen minimointi ja tuotannon kokonaistaloudellisuuden parantaminen. (Airikka ja Mäkilä 2009, s. 2) Energianhallintajärjestelmä tuottaa pitkän aikavälin ennustuksia tyypillisesti kolmesta seitsemälle päivälle. Ennusteiden ansiosta prosessi tasaantuu kuormanmuutoksissa taloudellisesti, ja piikkikuormatilanteetkin onnistuvat niin, että sähköntuottotavoite saavutetaan. Ostetun sähkön ja polttoaineen kustannusten hallinta helpottuu samoin kuin sähkön tuotanto verkkoon ja siitä saatavien tulojen optimointi. (Farrand ja Jalkanen 2007. s. 25)

Eniten hyötyä ennustavuudesta saadaan, kun lyhyen aikavälin mallipohjainen ennustava säädin yhdistetään pitkän aikavälin höyryn- ja sähkön kysyntäennustuksiin. Ennusteet helpottavat talouspäätösten tekoa ja vähentävät riskejä. Höyryverkon säätäjät toimivat energianhallintajärjestelmän laskemien optimaalisten kattilan asetusarvojen mukaan. Esimerkiksi tehtaan yhteydessä olevan, prosessihöyryä tuottavan CHP-laitoksen on kyettävä reagoimaan höyryn kysynnän muutoksiin melko nopeasti, niin että oikeanpaineista höyryä on aina tarpeeksi saatavilla. Energianhallintajärjestelmä osaa ennustaa tulevan höyryntarpeen muutoksen esimerkiksi tietyn tehtaalla olevan koneen käynnistyksestä. Myös nopeisiin tuotantotaukoihin tai vaikkapa turbiinin käyttöhäiriöön on kyettävä reagoimaan ilman suuria häviöitä. (Farrand ja Jalkanen 2007. s. 24 - 25)

Kuvassa 36 on optimointijärjestelmän lähtötieto- ja tuloskaavio. Lähtötietoina optimointiin tarvitaan sähkön ja prosessihöyryn kulutustarve-ennusteet asiakkailta, lämmöntarve ulkoilman lämpötilan perusteella sekä sähkön ja polttoaineen hintaennusteet. Näistä tiedoista lasketaan sähkön osto- ja myyntisuunnitelma spot-kauppaa varten sekä polttoaineen tarpeen ennuste. Polttoaineiden hankinta optimoidaan ja kunakin hetkenä käytetään halvimpia mahdollisia polttoaineita. Tuotannon suunnittelua ja optimointia tehdään pitkällä ja lyhyellä aikavälillä. Tuloksia käytetään prosessin säätöjärjestelmään.



**Kuva 36.** Metso DNA:n tuotannon optimointijärjestelmän lähtötieto- ja tuloskaavio (kuva muokattu). (Farrand ja Jalkanen 2007. s. 24)

### **Ennusteet**

Sään ennustaminen tapahtuu yhdistämällä palveluntarjoajan ennuste säätilan mittauksiin, joista yhdessä saadaan laitoksen ympäristöön sopiva korjattu online-sääennuste. Tuotetun lämpökuorman suuruus perustuu tähän korjattuun ennusteeseen. Laitokselta 1 – 2 edellisvuoden aikana kerättyä historiatietoa käytetään korjausfunktion muodostamiseen, jolloin saadaan hyvin tarkkoja ennusteita. (Metso 2011b)

Energianhallintajärjestelmän sähkökauppa-moduuli soveltuu voimalaitoksille, jotka ostavat ja myyvät pörssisähköä. Moduulin työkalut laskevat sähkön pörssihintaennusteen adaptiivisesti. Sen avulla ennustetaan tasesähkön hintaa eli eroa sähkösuunnitelmaan sekä optimoidaan päivittäiset tuotantosuunnitelmat. Sovellus on yhteydessä sähköpörssiin, josta luetaan sähkökuormatiedot, sähköpörssin hintatiedot sekä sääennusteet. Osto- ja myyntitarjoukset sähköpörssiin voidaan automatisoida, samoin kuin taseraportointi. (Metso 2011b) Paikallisverkon sähkökuorma voidaan ennustaa erilaisissa tilanteissa, ja joko jatkuvasti mitattavien tai tariffiasiakkaiden sähkönkulutukset lasketaan. (Metso 2010)

Energianhallintajärjestelmä sisältää moduulin kaukolämpökuorman ennustamiseen. Ennuste voidaan laskea joko moduulissa itsessään tai se voidaan tuoda käsin tai toisesta

järjestelmästä. Ennustetta voidaan verrata moduulin sisällä sääennusteeseen, säätilan mittauksiin ja kuormamittauksiin. (Metso 2010) Prosessihöyryn kulutusennustemoduuli laskee ennusteen höyryn kulutukselle esimerkiksi minuutin välein. Perustana ovat laskentamenetelmät, jotka huomioivat kulutusprosessin tuotantosuunnitelman, joka sisältää tuotantomäärän ja lajitiedot sekä mahdollisesti ulkolämpötilan. Laitoksen historiatietoa käytetään funktion muodostamiseen. (Metso 2011b)

Tuotantosuunnitelmien optimointisovellus laskee automaattisesti voimalaitoksen tuotantosuunnitelman ennalta määrätyille tai käyttäjän valitsemille aikaväleille, kuten vuorokaudeksi ja viikoksi eteenpäin. Sovelluksen laskenta perustuu sekalukuoptimointiin (mixed integer linear programming), jolla voimalaitosmalli yhdistetään ennusteisiin ja joka huomioi niin käynti- kuin käynnistys- ja pysäytyskustannuksetkin. Kokonaisoptimi sisältää sekä sähkön- että lämmöntuotannon. Asetukset ovat joustavat niin, että optimoinnista voidaan määrääjäksi tai pysyvästi poistaa ne tuotantoyksiköt tai prosessikomponentit, jotka eivät ole käytössä. Topologiaeditori-mallinnustyökalulla voidaan myös lisätä uusi osajärjestelmä, joka heti alkaa vaikuttaa laitoksen teknillis-taloudellisiin parametreihin. Moduuli laskee prosessille taloudellisuusindeksiin, jolla toteutunutta tuotantoa verrataan laskettuun optimiin. Näin erot kuormaan, tuottoon ja taloudellisuuteen huomataan helposti ja käyttötaloutta voidaan parantaa. (Metso 2010)

Pitkän aikavälin eli kuukausi- ja vuositason tuotantosuunnitelmien optimointi perustuu sekalukumenetelmään, jolla voidaan käsitellä suuria muuttujamääriä. Sovellus tuottaa erilaisia skenaarioita, jotka pohjautuvat vuosittaisiin lämpötilaprofiileihin. Pitkän aikavälin optimointia voidaan käyttää esimerkiksi polttoaineiden hankinnan ja seisokkien ajankohdan suunnitteluun. Mikäli ollaan päästökaupan piirissä, sen avulla voidaan myös ennustaa tulevia CO<sub>2</sub>-päästöjä, jotka vaikuttavat päästöoikeuksien ostamiseen ja myymiseen. Sovelluksella voidaan lisäksi optimoida polttoaine- ja sähkösopimusten tarjoamat resurssit, sillä nämä sopimukset sisältävät yleensä hinnan ohella myös sopimuskauden energiamäärän sekä huippu- ja minimitehot. Tämä ominaisuus on myös hyödyllinen apuväline uusien sopimuksien suunniteltaessa. (Metso 2010)

Mittaustenhallintamoduuli kerää mittaustiedot automaatiojärjestelmästä ja tallentaa ne muiden energianhallintamoduulien käyttöön. Paitsi oikeita mittauksia, voidaan moduulilla luoda myös virtuaalimittauksia todellisten mittapisteiden perusteella, milloin se helpottaa ennusteiden laatimisessa. (Metso 2010) Mittaussignaaleja tarvitaan noin 50 – 100 kuorman ennustamiseen ja tuotannon optimointiin. Mittausten arvot luetaan historiakannasta. (Metso 2011b)

## 9.2 Palamisen hallinta

Kuten Steam Network Managerilla hallitaan vesi-/höyryprosessia, Metso DNA FBB Combustion Managerilla hallitaan kattilan sisäistä palamista. Combustion Manager on kerrosleijukattilan sumea poltonhallintaohjelma eli toisin sanoen monimuuttujaiseen sumeaan logiikkaan ja säätöön perustuva palamisen säätäjä ja optimoija. (Airikka ja Nieminen 2010, s. 8) Tätäkään ohjelmaa ei vielä ole sovellettu MW Powerin pienille biovoimalaitoksille, mutta sen käyttöönotto toisi lisäarvoa laitoksille.

Palamisen optimoinnilla hallitaan palamisprosessi huolimatta kattilan kuorman, tuotannon, polttoainemäärän, -laadun tai palamisolosuhteiden muutoksista. Palaminen vakautuu, kattilan hyötysuhde paranee ja savukaasun happi-, häkä- ja typenoksidipitoisuudet pienenevät. Tyypillisesti polttoainemäärä lasketaan pelkästään kuljettimien nopeuden perusteella. Polttoainetehon kompensattorisovelluksella palaminen ja höyryntuotanto pidetään tasaisina. Polttoainetehon arviointi ja sen muutoksen kompensointi perustuvat kattilan tehotaseeseen ja hapen kulutukseen. (Pyykkö 2011, s. 2)

Yleensä leijupetikattilaa säädetään DCS-järjestelmällä, jossa on useita on/off- ja PID-säätimiä palamisen hallitsemiseksi. Nämä säätimet eivät kuitenkaan yksinään saavuta optimaalista tulosta, vaan palamisprosessia on pidettävä monimuuttujaprozessina, jonka lähtöarvot ja tulokset (reaaliaikaiset mittaukset tai ohjatut muuttujat) riippuvat voimakkaasti toisistaan. Palamisen optimointi perustuu aina jonkinlaiseen malliin. Combustion Manager ei perustu perinteiseen deterministiseen malliin vaan sumeaan logiikkaan, josta on kerrottu luvussa 2.3.3. Käyttämällä sumean logiikan periaatteita ja sen reaaliaikamittausten tulkintatapoja DCS:n monimuuttujainen sumea säädin ohjaa palamista ja optimoi kattilan hyötysuhdetta. Sekä kerrosleijue että kiertoleijukattilaa voidaan säätää tällä menetelmällä. (Airikka ja Nieminen 2010, s. 1 ja 5)

Palamisen optimoija sijaitsee yleensä ACN-tyyppisellä prosessinsäätimellä. Monimuuttujasäätimen ohjaamista monista palamismuuttujista merkittävimpiä muuttujia ovat pedin lämpötila, tulipesän lämpötilaprofiili, savukaasun happipitoisuus sekä häkä-typenoksiditasapaino. Prosessimuuttujien säätämiseksi palamisen optimoija ohjaa kokonaispalamisilmamäärää sekä ilman jakoa eri tasoille. Ohjaus tapahtuu sumeaa logiikkaa käyttäen laske-malla joko asetusravot tai korjaavat arvot seuraaville palamisilman jakosuhteen säätimille:

leijutusilmamäärä, kierto- ja leijutuskaasujen suhde, sekundääri- ja tertiääri-ilmojen suhde sekä ilmajaon symmetria. (Airikka ja Nieminen 2010, s. 4 - 5)

Palamisen optimoija tarjoaa monia toiminnallisia, taloudellisia ja ympäristöhyötyjä. Savukaasujen häkä- ja typenoksidipäästöt vähenevät tasapainoisen palamisen myötä. Ohjelman käyttö on yksinkertaista sen automaattisuuden vuoksi, eli useimmilla kattilan kuormilla normaalissa käytössä sitä ei tarvitse ohjata käsin. Samalla kattilan operointialue laajenee optimoinnin käyttöönoton myötä, ja kattilan hyötysuhde paranee. (Airikka ja Nieminen 2010, s. 5)

Palamisen optimoijan lisäksi Metsolla on kiinteän polttoaineen hallintasoftware, joka yhdistää DCS:n prosessidatan, polttoaineen punnituksesta saatavan kuormatiedon sekä polttoaineen laboratorioanalyysin tulokset. (Pyykkö 2011, s. 1) Polttoaineen kompensointiohjelma sisältää kaksi erillistä ja itsenäistä laskentamenetelmää: kattilan taseen laskennan, jota käytetään stabiileissa olosuhteissa ja hapen kulutuksen laskennan, jota käytetään dynaamisissa muutostilanteissa. Sovellus tasaannuttaa polttoaineen syötön ja parantaa palamisilman säätöä. Savukaasun happipitoisuus pienenee ja polttoaine-ilma-suhde optimoidaan. (Metso 2010)

### 9.3 Dynaaminen simulointi

Kun optimointijärjestelmä on ohjelmoitu Metso DNA:n työkaluilla, voidaan sitä myös simuloida dynaamisesti samoilla työkaluilla. Tämän diplomityön tarkastelussahan simulointi tehtiin erillisillä mallinnusohjelmilla staattisille tiloille. Dynaaminen simulointi tarkoittaa muutostilassa olevan prosessin käyttäytymisen jäljittelyä. Muutoksia prosessiin aiheuttavat höyrykuorman muutokset kuluttajan tai turbiinin tarpeen muuttuessa, käsin operointi, asetusarvojen muuttaminen sekä säädön tai laitteiden vikaantuminen. Muutos voi johtua myös esimerkiksi reductioventtiilin aukeamisesta, mahdollisen höyryakun lataamisesta tai polttoainetehon muutoksesta. Simuloinnissa huomioidaan prosessisuureista lähinnä paineet, lämpötilat, virtaukset ja pinnankorkeudet. Tarkoituksena on myös testata ohjelmoitu ja todellisuudessa voimallaitoksella käyttöönotettava sovellus, johon on asetettu raja-arvot, lukitukset ja logiikka. (Airikka ja muut 2010, s. 1 - 2)

Dynaamisella simuloinnilla voidaan koestaa säätöratkaisu ennen sen käyttöönottoa oikealla laitoksella. Tällä tehdastestauksella varmistetaan uuden säätötavan tai erilaisten ajotapojen käytettävyys ja luotettavuus prosessin muutostilanteessa, sillä sen avulla nähdään proses-

sisuureiden keskinäinen vuorovaikutus sekä syy- ja seuraussuhteet. Sekä säädettävä prosessi että säätävä sovellus simuloidaan. Simuloitaessa prosessin nopeutta voidaan kasvattaa tilanteiden läpikäymiseksi. (Airikka ja muut 2010, s. 1 - 2)

Simulointimallilta vaadittava tärkein ominaisuus on se, että se jäljittelee olennaisia prosessisuureita mahdollisimman tarkasti. Kukin laite mallinnetaan dynaamisella elementillä, joka normaalilla säätöalueella liikuttaessa voi yleensä olla lineaarinen. Lineaarisiin dynaamisiin elementteihin liitetään lisäksi epälineaarinen viive-elementti. (Airikka ja muut 2010, s. 1)

Simulaattorilla voidaan testata mallipohjaista ennustavaa säätötapaa (MPC), josta kerrotaan luvussa 9.1. Se asennetaan automaatiojärjestelmään sen omilla työkaluilla niin, että simulaattoriin tulee suoraan halutun voimalaitoksen oma automaatiojärjestelmä. Jo tehdastestauksessa säätösovelluksia esiviritetään simuloinnin prosessimallien mukaisesti, jolloin laitoksen käyttöönotossa tapahtuva hienoviritys helpottuu. Mikäli käytössä on lisäksi palamisenhallintasovellus, sillekin tehdään ennen käyttöönottoa tehdastestaus dynaamisella simulaattorilla. (Airikka ja muut 2010, s. 3)

Simulaattorilla voitaisiin helposti tehdä tämän diplomityön herkkyystarkasteluja laajempia tarkasteluja, ja sitä voitaisiin soveltaa jopa käytönaikaiseen optimointiin. Optimointialgoritmita voitaisiin tuoda ehdotetut säätimien uudet asetusarvot simulaattorille, joka laskee niiden perusteella laitoksen taseen. Tasetiedot viedään kustannusfunktiolle, ja katteen muutosta verrataan alkuperäiseen katteeseen. Muutossuunnan perusteella iteroidaan muutama kierros lisää ja päästään optimoinnissa pitemmälle, ennen kuin oikeille säätimille annetaan asetusarvot seuraavan minuutin ajalle. Näin iterointi kohti optimipistettä nopeutuu verrattuna siihen, että iterointikierros tehtäisiin vain kerran minuutissa. MW Powerin tarpeiden kannalta ei kuitenkaan ole välttämätöntä, että simulointi tapahtuu täysin dynaamisesti.

## 10 YHTEENVETO

Tämän työn lähtökohtana oli tarve kehittää MultiPower CHP –voimalaitoskonseptin yhteyteen älykäs prosessinhallintaratkaisu, jonka perustana on laitoksen kokonaistalouden käytönaikea optimointi. Erilaisia optimointitapoja vertailtiin ja niiden joukosta valittiin tähän tarpeeseen parhaiten sopivat teoriat. Optimointia voidaan tehdä vaihtoehtoisilla tavoilla joko deterministisesti iteroimalla tai tilastollisella hakumenetelmällä, ja näistä kahdesta valitaan kulloissakin prosessitilanteessa parhaan katteen antava tapa.

Optimoinnin lähtökohtana ovat nykyhetken ulkoiset olosuhteet ja tehontuottotarve, joka voi olla asiakkaan määrittämä. Ulkoisia olosuhteita ovat ulkoilman lämpötila, polttoaineen lämpöarvo sekä sähkön, lämmön ja polttoaineen hinnat. Näitä olosuhteita verrataan laitoksen historiadataan, jota on kertynyt edellisten kuukausien tai vuosien aikana. Datasta haetaan ulkoisilta olosuhteiltaan nykyhetkeä parhaiten vastaava tilanne, ja kyseisen parhaan hetken pääsäätimien arvot luetaan datasta. Säätimien asetusarvot otetaan käyttöön nykyhetkenä, jolloin vältetään turhan pitkällistä iterointia kohti optimia.

Koska jokainen prosessin tilanne on kuitenkin käytännössä ainutlaatuinen, täytyy historiadatasta haettua tietoa vielä jatkojalostaa eli optimoida edelleen. Tämän diplomityön aikana tehtyjen herkkyyksianalyysien tulosten perusteella tiedetään joidenkin tärkeimpien säätöjen suunnat erilaisten prosessimuutosten seurauksena. Lisäksi selvitettiin, miten kukin suunta vaikuttaa kokonaiskatteeseen. Vastaavissa käytönaikeisissa tilanteissa prosessia kannattaa ajaa kokonaiskatteen kannalta positiiviseen suuntaan.

Jokaiselta laskentaminuutilta saatua katetta verrataan edellisen minuutin katteeseen ja katsotaan, paraneeko se. Ulkoisten olosuhteiden muutoksen seurauksena kate saattaa hetkellisesti huonontua, mutta tasaisessa ajossa optimoinnin pitäisi aina johtaa edellisminuuttia parempaan katteeseen. Mikäli kate kuitenkin huononee, tarkoittaa se sitä, etteivät herkkyyksianalyysien tulokset täysin päde kyseisessä tilanteessa. Tällöin sovelletaan käyttöön matemaattista optimointia. Optimointialgoritmina esiteltiin alustavasti suoraa hakua käyttävä iteratiivinen Hooke-Jeeves-algoritmi. Muitakin sopivia algoritmeja – sekä suoria että derivaattapohjaisia – on vielä tarkoitus käydä läpi ennen lopullista valintaa ja toteutusvaihetta.

Algoritmi huomioi yhtä aikaa jokaisen optimointiin valitun pääsäätimen ja etsii sellaisen suunnan, että näiden säätöjen yhteisvaikutus aiheuttaa paranevan kokonaiskäyttökateen. Samalla joka minuutti saatua katetta verrataan parhaaseen mahdolliseen historiadatasta

löytyvään samoissa olosuhteissa saavutettuun katteeseen, ja paremman tuloksen antanutta menetelmää hyödynnetään säädössä. Optimoinnin tuloksena saadut asetusarvot viedään säätimille, jotka ohjaavat prosessia. Prosessin mittaustulosten perusteella lasketaan massa- ja energiataseet, joista tarvittavia tietoja käytetään jälleen seuraavan minuutin käyttökateen optimoinnissa.

Valittu optimointialgoritmi on siis suora deterministinen menetelmä, mutta sitä varten tehtävä datan haku historiatietokannasta tehdään tilastollisella menetelmällä. Tämän diplomityön tarkasteluissa prosessin optimointia on tehty lähinnä staattisessa tilassa olevalle prosessille, mutta sovellettaessa järjestelmää oikealle voimalaitokselle voidaan malliin liittää käytönaikaisuus ja ennustavuus. Nyt staattisen tilan mallinnus tehtiin PBD- ja Tursim –ohjelmilla, joista prosessin tasetiedot vietiin Excel-työkalulaskentaohjelmaan. Muuttamalla yhtä prosessiparametria kerrallaan seurattiin katteen muutosta, ja näin selvitettiin kullekin parametrille optimaalinen asetusarvo kyseisissä olosuhteissa.

Mallinnuksen tuloksia vertailtiin todellisella voimalaitoksella tehtyihin mittauksiin, joissa tarkoituksena oli myös muuttaa vain yhtä prosessiparametria kerrallaan. Ajatuksena oli tehdä muutoksia samoille säätimille kuin ensimmäisessä, mallinnetussa tarkastelussa, mutta kaikilta osilta tämä ei ollut mahdollista joidenkin prosessin lukitusten sekä mallinnusohjelmien puutteen vuoksi. Vertailutaulukossa 13 on esitetty herkkyystarkastelujen tärkeimmät tulokset.

**Taulukko 13.** Herkkyystarkastelujen tuloksina saadut katteen ja sen osakomponenttien muutossuunnat.

Tarkasteltava säätöpiiri	Muutos-suunta	Herkkyystarkastelu 1: Laitosmalli (PBD ja Tursim) sekä talousmalli (kustannusfunktio)			Herkkyystarkastelu 2: Hamin voimalaitoksen mittaukset		
		Kate	Tuotot	Kustannukset	Kate	Tuotot	Kustannukset
Syve-säiliön paine	Nosto	Paranee	Kasvavat	Kasvavat	Huononee	Pienenevät	Kasvavat
Syve-venttiilin paine-ero	Lasku	-	-	-	Paranee	Pienenevät	Pienenevät
II välioton paine	Nosto	Huononee	Pienenevät	Pienenevät	Huononee	Pienenevät	Kasvavat
Radiaattorien jälkeinen lämpötila	Nosto	Paranee	Kasvavat	Kasvavat	Paranee	Kasvavat	Kasvavat
Lauhduttimen jälkeinen lämpötila	Nosto	-	-	-	Paranee	Kasvavat	Pienenevät
Kaukolämpöteho	Nosto	Paranee	Kasvavat	Pienenevät	-	-	-
Höyry luvoille	Nosto	Huononee	Pienenevät	Pienenevät	-	-	-



Herkkyysanalyysien tulosten perusteella voidaan tehdä tiettyjä johtopäätöksiä. Syöttövesisäiliön lämpötila vaikuttaa periaatteessa katetta parantavasti, mutta lisääntyneen omakäyttökulutuksen, ulkolämpötilan kasvun ja prosessin hitaan tasaantumisen vuoksi vertailumittauksissa kate huononi. Syöttövesiventtiiliin paine-eron lasku parantaa katetta lähinnä pumpun pyörimisnopeuden hidastumisen ja omakäyttötehon vähenemisen myötä.

Toisen välioton paine vaikutti mittauksissa lähinnä matalapaine-esilämmittimille menevään höyrymäärään. Välioton paineen lisäys vähentää turbiinissa paisuvaa höyrymäärää, minkä vuoksi sähköteho alenee.

Radiaattorien jälkeinen lämpötilan nosto parantaa katetta, mikä johtunee pääasiassa radiaattorien omakäyttötehon vähenemisestä. Lauhduttimen jälkeinen lämpötila antaa samansuuntaisen tuloksen, vaikka periaatteessa voitaisiin olettaa, että lauhduttimen paineen ja lämpötilan kannattaisi olla mahdollisimman alhaiset.

Kaukolämpötehon lisäämisen vaikutus katteeseen on selvä: kate paranee selvästi alhaisellaakin kaukolämpökuormalla. Palamisilman esilämmittimille tulevan höyryn määrä vaikuttaa kasvaessaan positiivisesti kattilan ja prosessin hyötysuhteisiin, mutta negatiivisesti katteeseen. Muutos katteessa johtuu lähinnä sähkönn myynnin vähenemisestä väliottohöyrymäärän noustessa.

Joissakin mittauksista havainnointiaika oli selvästi liian lyhyt, jotta koko prosessi syöttövesisäiliötä myöten olisi ehtinyt reagoida muutoksiin. Turbiini kuitenkin reagoi melko nopeasti väliottohöyryissä tapahtuneisiin muutoksiin. Mallinnukseen liittyviä puutteita ovat kokonaisomakäyttötehon huomioimattomuus sekä turbiinin viimeisen vaiheen mahdollisesti virheellinen mallinnus, joka aiheuttaa katteen paranemisen lämpimällä jäähdytysvedellä.

Herkkyysanalyysien tuloksia tullaan käyttämään apuna seuraavan voimalaitosprojektin säätimien virikyksessä. Prosessin toteutusvaiheessa herkkyytstarkastelua kannattaa laajentaa muillekin kuin tämän työn puitteissa tarkastelluille säätimille. Valitun optimointimenetelmän kannalta olisi tärkeintä tuntea ulkoisten olosuhteiden muutoksien vaikutus prosessiin ja sen optimointiin. Esimerkiksi sähkönn ja lämmön hintojen suhde vaikuttaa suoraan rakennusasteeseen, jolla laitosta kannattaa ajaa. Ulkoisten olosuhteiden herkkyytstarkastelu voidaan tehdä PBD-, Tursim- ja Excel-ohjelmilla kuten muutkin herkkyytstarkastelut tähän asti, tai mahdollisesti Metso DNA:n dynaamisella simulaattorilla. Tässä tarkastelussa on erittäin tärkeää, että prosessimuutokset voidaan viedä kustannusfunktiolle ja toisin päin, sillä ulkoisissa tekijöissä on sekä teknisiä että taloudellisia muuttujia.

Jatkokehityksenä MultiPower CHP –voimalaitosprosessiin on tarkoitus lisätä ennustava säätö, jota tässä työssä on jo kuvattu. Lisäksi osaprosessien, kuten lauhdutinpiirin ja lämmönsiirtimien, suhdetta kokonaisoptimointiin tullaan tarkastelemaan yksityiskohtaisesti. Koko optimointijärjestelmä otetaan käyttöön seuraavassa MW Powerin tähän tarkoitukseen sopivassa voimalaitosprojektissa, jolloin menetelmä ohjelmoidaan DCS- ja Info-järjestelmiin. Uusien optimointi- ja säätöjärjestelmien toteutusvaiheessa tulee todennäköisesti ilmenemään myös muita, uusia tapoja, joiden avulla prosessia ja Info-palvelimella tapahtuvaa laskentaa voidaan edelleen kehittää. Johtotähtenä kehityksessä tulee edelleen olemaan prosessidatan mahdollisimman tehokas hyödyntäminen sekä käyttökatteen optimointi.

## LÄHDELUETTELO

Airikka, Pasi. 2009. Energy efficiency through stabilized steam networks. 4 s. Artikkelit toimitettu Metso Oyj:ltä.

Airikka, Pasi ja Mäkilä, Jussi. 2009. Energy management system for CHP plants. Julkaistu: IFAC Conference on Control and Methodologies and Technologies for Energy Efficiency. 5 s.

Airikka, Pasi ja Mäkilä, Jussi. 2010. Energy management solution by optimizing steam network. Julkaistu: Power-Gen Europe 8.-10.6.2010. Amsterdam, Alankomaat. 11 s.

Airikka, Pasi ja Nieminen, Vesa. 2010. Optimized combustion through collaboration of boiler and automation supplier. Julkaistu: Power-Gen Europe 8.-10.6.2010. Amsterdam, Alankomaat. 9 s.

Belegundu, Ashok D. ja Chandrupatla, Tirupathi R. 1999. Optimization concepts and applications in engineering. 432 s. USA: Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-031279-7

Belmadani, A.; Benasla, L. ja Rahli, M. 2009. Etude d'un dispatching économique-environnemental par la method Harmony Search. Julkaistu: Acta Electrotehnica. 50. vuosikerta. Numero 1. s. 44 – 48. [Viitattu 10.2.2012] Saatavissa:

[http://ie.utcluj.ro/Contents\\_Acta\\_ET/2009/Number1/Paper07\\_Belmadani.pdf](http://ie.utcluj.ro/Contents_Acta_ET/2009/Number1/Paper07_Belmadani.pdf)

Bhimani, Alnoor; Datar, Srikant M.; Foster, George ja Horngren, Charles T. 2008. Management and cost accounting. 4. painos. 959 s. Italy: Rotolito Lombarda. ISBN 978-0-273-71149-0

Blum, Christian ja Roli, Andrea. 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. Julkaistu: ACM Computing Surveys. 35. vuosikerta. Numero 3.

42 s. [Viitattu 4.4.2012] Saatavissa: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=937505> ja

[http://www.lia.deis.unibo.it/~aro/pubs/blum\\_rol\\_i\\_metaheuristics-preprint.pdf](http://www.lia.deis.unibo.it/~aro/pubs/blum_rol_i_metaheuristics-preprint.pdf)

De Keyser, R. M. C.; Van de Velde, G. A. ja Dumortier, F. A. G. 1988. A comparative study of self-adaptive long-range predictive control methods. Julkaistu: Automation (1988) Vol 24. No. 2. s. 149-163. Great Britain.

Del Castillo, Enrique. Process optimization – A statistical approach. 2007. 460 s. Saatavissa: [www.springer.com](http://www.springer.com). ISBN 978-0-387-71434-9 (kirja), ISBN 978-0-387-71435-6 (e-kirja).

Eskelinen, Jami ja Tuovinen, Markku. 1999. Power plant short-term operation economy optimization by linear models. Julkaistu: International Conference on Process Integration. Vol. 2. s. 72-74. Kööpenhamina.

Farrand, Nigel ja Jalkanen, Juha-Pekka. 2007. Balancing supply and demand in combined heat and power. Julkaistu: Automation. No 2. s. 24 – 25.

FERC (Federal Energy Regulatory Commission). 2005. Economic dispatch: Concepts, practices and issues. Presentation to the Joint Board for the study of economic dispatch. California, USA. 7 s. [Viitattu 10.2.2012] <http://www.ferc.gov/eventcalendar/Files/20051110172953-FERC%20Staff%20Presentation.pdf>

Haataja, Juha. Optimointitehtävien ratkaiseminen. 2004. Tieteen tietotekniikan keskus CSC – Tieteellinen laskenta Oy. 3. painos. Helsinki: Picaset Oy. 245 s. [Viitattu 30.1.2012] Saatavissa: [www.csc.fi/oppaat/optimointi/](http://www.csc.fi/oppaat/optimointi/). ISBN 952-9821-95-6

Hashemi, Reza. 2009. A developed offline model for optimal operation of combined heating and cooling and power systems. Artikkelijulkaisussa IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 24. No. 1. USA: IEEE. ISSN: 0885-8969

Jyväskylän yliopisto. Kuva saatavissa: <http://users.jyu.fi/~jhaka/opt/luento1.pdf>

Keel, Matti; Tammoja, Heiki ja Valdma, Mati. 2009. Optimization of thermal power plants operation. Tallinn University of Technology. 181 s. ISBN 978-9985-59-824-5

Koukkunen, Toni; Mäkilä, Jussi ja Nykänen, Pasi. 2005. Malliprediktiivinen höyryverkon tausus- ja paineensäätö. Julkaistu: Automaatio05 seminaaripäivät. 6 s.

Lampinen, Jouni A.; Price, Kenneth V. ja Storn, Rainer M. 2005. Differential evolution: A practical approach to global optimization. Springer Berlin Heidelberg New York. 514 s. Saatavissa: [www.springer.com](http://www.springer.com). ISBN-10 3-540-20950-6.

Lazzaretto, A. ja Toffolo, A. 2002. Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design. Julkaistu: Energy 29 (2004) s. 1139–1157. United Kingdom. Saatavissa: [www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy). ISSN: 0360-5442

Leppäkoski, Jari. 2006. Performance services for energy customers. Presentation for Polish customer seminar. Kalvosarja toimitettu Metsolta.

Maciejowski, Jan Marian. 2002. Predictive control with constraints. Pearson Education Limited. Great Britain: Biddles Ltd., Guildford and King's Lynn. 331 s. ISBN 0 201 39823 0

Majanne, Yrjö. 2005. Model predictive pressure control of steam networks. Julkaistu: Control Engineering Practice 13 (2005) s. 1499-1505. Tampere: Tampere University of Technology. [Viitattu 25.2.2012] Saatavissa: [www.elsevier.com/locate/conengprac](http://www.elsevier.com/locate/conengprac)

Markkanen, Sami. 2004. Voimalaitoksen optimointijärjestelmän suunnittelu. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 106 s.

Metso 2010. Materiaali toimitettu Metso Oy:ltä.

Metso. 2011a. Raporttiesimerkki toimitettu Metso Oy:ltä.

Metso 2011b. Materiaali toimitettu Metso Oy:ltä.

Metso DNA. 2011. Metso DNA peruskurssi –koulutuksen materiaali ”01\_2\_metsoDNA\_Rakenne”.

Metso DNA Energy Management. 2010. Ohjelmiston esite toimitettu Metso Automationilta. 2 s.

Metso DNA Info. 2011. metsoDNA CR Info Peruskurssi –koulutuksen materiaali ”2-DNAhistorian\_Overview”.

MW Power 2011a. BioPower 8 – Automation specification. MW Powerin toimittama dokumentti.

MW Power 2011b. BP8 operointinäytöt. Kuvasarja toimitettu MW Power Oy:ltä.

MW Power 2011c. MW Powerin yleisesittely ”Paikallisia energiaratkaisuja”. Kalvosarja toimitettu MW Power Oy:ltä.

MW Power 2012a. Yrityksen verkkosivut. [Viitattu 11.4.2012] Saatavissa: [http://www.mwpower.fi/mwpower/mwpower\\_pages.nsf/WebWID/WTB-090424-22575-B6A41?OpenDocument](http://www.mwpower.fi/mwpower/mwpower_pages.nsf/WebWID/WTB-090424-22575-B6A41?OpenDocument)

MW Power 2012b. BP8-laitoksen säätökuva toimitettu MW Power Oy:ltä.

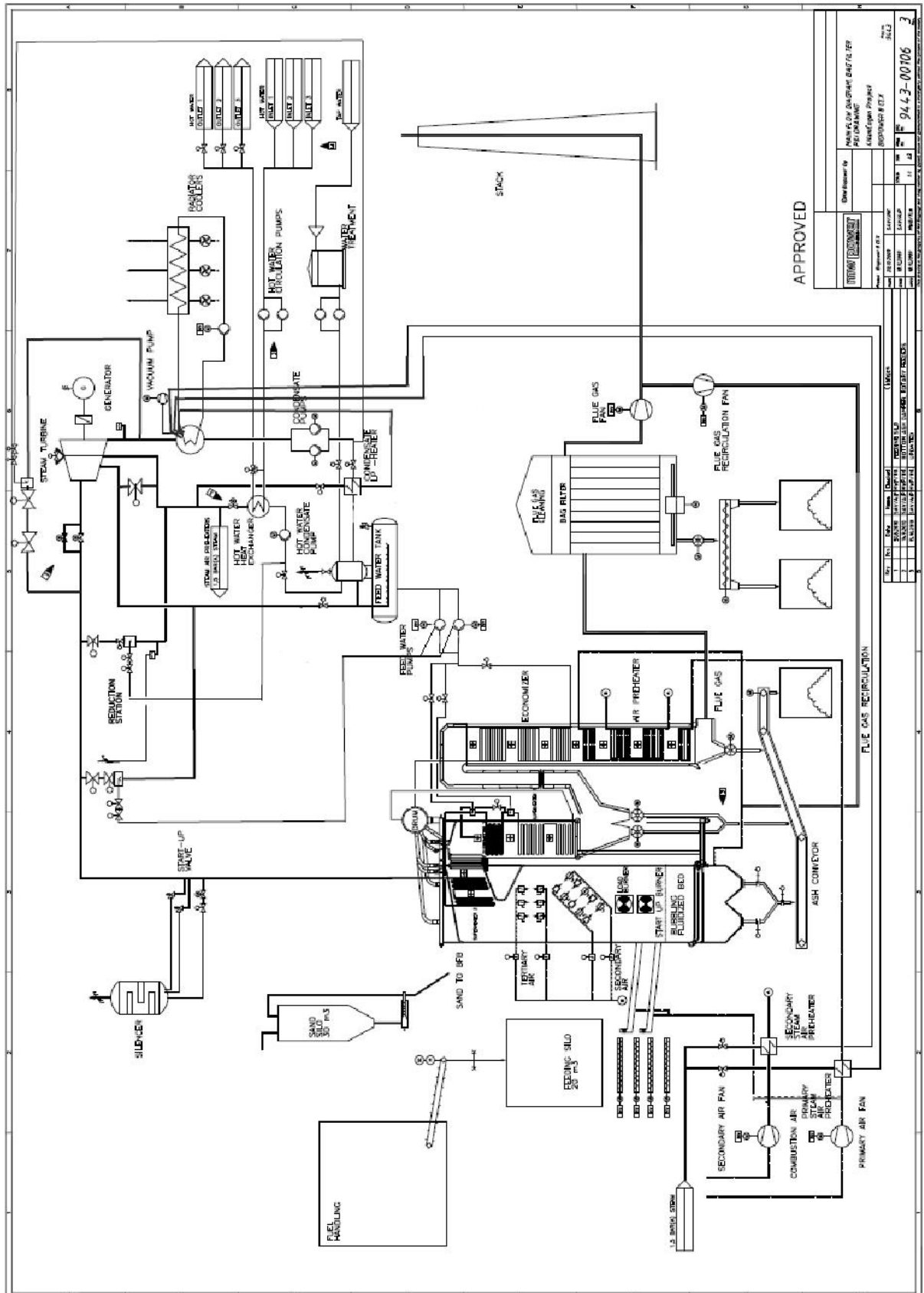
Pyykkö, Jukka. 2011. Advanced automation for CHP plants adds to performance. 2011. 6 s. Artikkele toimitettu Metsolta. Artikkele julkaistu myös internet-sivustolla [www.powergenworldwide.com](http://www.powergenworldwide.com).

Tulokas, Tero. Optimointijärjestelmän kehittäminen sähköä ja lämpöä tuottavaan voimalaitokseen. 2002. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta.

Tzafestas, Spyros G. 1982. Optimisation and control of dynamic operational research models. Alankomaat: North-Holland Publishing Company. 437 s. ISBN: 044486380x

Weber, C. ja Woll, O. 2006. Valuation of CHP power plant portfolios using recursive stochastic optimization. Julkaistu: 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. USA: IEEE, Piscataway, NJ. ISBN: 978-91-7178-585-5

Wärtsilä. 2010. Plant operator program manual. Toimitettu Wärtsilä Oy:ltä 7.2.2012. 7 s.



APPROVED

		Prepared by Checked by Drawn by In Charge Date
Approved by Date		Project Name 94.4.3-00106 Rev. 1 Rev. 2 Rev. 3 Rev. 4 Rev. 5 Rev. 6 Rev. 7 Rev. 8 Rev. 9 Rev. 10

No. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Date 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94	Description 1. INITIAL DESIGN 2. REVISED DESIGN 3. REVISED DESIGN 4. REVISED DESIGN 5. REVISED DESIGN 6. REVISED DESIGN 7. REVISED DESIGN 8. REVISED DESIGN 9. REVISED DESIGN 10. REVISED DESIGN
--	--	--

No. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Date 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94 10/10/94	Description 1. INITIAL DESIGN 2. REVISED DESIGN 3. REVISED DESIGN 4. REVISED DESIGN 5. REVISED DESIGN 6. REVISED DESIGN 7. REVISED DESIGN 8. REVISED DESIGN 9. REVISED DESIGN 10. REVISED DESIGN
--	--	--

