

Harri Haukipuro

**VOIMALAITOKSEN KOULUTUSSIMULAATTORIN ESISUUNNIT-  
TELU**

# **VOIMALAITOKSEN KOULUTUSSIMULAATTORIN ESISUUNNIT- TELU**

Harri Haukipuro  
Opinnäytetyö  
Kevät 2014  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma

---

Tekijä(t): Harri Haukipuro  
Opinnäytetyön nimi: Voimalaitoksen koulutussimulaattorin esisuunnittelu  
Työn ohjaaja(t): Heikki Kurki  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2014 Sivumäärä: 35 + 0 liitettä

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin Oulun ammattikorkeakoulun Automaatiotekniikan laboratorioon. Tämä opinnäytetyö on esisuunnittelua suurempaan projektiin, jonka tavoite on voimalaitossimulaattorin toteuttaminen koulutuskäyttöön. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on koota tietoa voimalaitosprosessista ja aloittaa suunnittelemaan vastapainevoimalaitoksen pääkomponenttien mallinnusta. Lisäksi tavoitteena on esisuunnitella vastapainevoimalaitoksen prosessiosien säädöt.

Tässä työssä keskitytään vastapainevoimalaitoksen pääkomponentteihin. Nämä tarkastelut auttavat ymmärtämään vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaatetta. Työssä esitellään ohjelmoitava logiikka Siemens S7-300, jolla voidaan toteuttaa voimalaitossimulaattori. Tässä työssä tarkastellaan Step 7 –kehitys ympäristöä, joka on Siemensin logiikkaohjainten ohjelmointiin tarkoitettu työkalu.

Tähän työhön kootut tiedot vastapainevoimalaitoksesta ja siihen liittyvistä prosesseista auttavat simulaattorin jatkosuunnittelussa ja sen toteuttamisessa. Kun simulaattori on valmis, voivat sen käyttäjät hyödyntää tähän työhön koottuja vastapainevoimalaitoksen prosessiosien säätöjen kuvauksia simulaattorin ohjaussovellusten tekemiseen.

---

Asiasanat: voimalaitokset, simulaattorit, koulutus

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
SANASTO	6
1 JOHDANTO	8
2 OHJELMOITAVA LOGIIKKA S7-300	9
3 STEP 7 -KEHITYSYMPÄRISTÖ	12
3.1 Ohjelmistoympäristön asennus	12
3.2 Uuden projektin aloitus	13
4 HÖYRYVOIMALAITOKSET	16
4.1 Vastapainevoimalaitos	16
4.2 Lauhdevoimalaitos	17
5 PROSESSIN PÄÄKOMPONENTIT	18
5.1 Kaukolämmönvaihdin	19
5.2 Syöttövesijärjestelmä	19
5.3 Kattila	20
5.4 Höyryturbiini	21
6 PROSESSIOSIEN MALLINNUS	23
6.1 Kaukolämmönvaihdin	23
6.2 Syöttövesisäiliö	23
6.3 Höyryn tarvitsema teho	24
6.4 Polttoaineesta saatavan tehon laskenta	24
6.5 Höyryturbiini	24
6.6 Kattilan paine	25
6.7 Savukaasusta saatava lämpöenergia	25
6.8 Kattilan savukaasujen lämpötilan muutosnopeus	26
7 KUVAUKSET OSAPROSESSIEN SÄÄDÖISTÄ	28
7.1 Syöttövesisäiliön pinnankorkeuden säätö	28
7.2 Lieriökattilan lieriön pinnankorkeuden säätö	29
7.3 Höyryn lämpötilan säätö	30

7.4 Höyryn paineen ja polttoaineiden säädöt	30
7.5 Palamisilman, savukaasujen ja tulipesän paineen säädöt	31
7.5.1 Palamisilman säätö	31
7.5.2 Savukaasujen ja tulipesän paineen säätö	32
7.6 Tehon säätö	32
8 LOPPUSANAT	34
LÄHTEET	35

## SANASTO

$A$	Kattilan seinien pinta-ala [ $m^2$ ]
CHP	Combined heat and power, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto
$c_{pa}$	Käytettävän polttoaineen lämpöarvo [MJ/kg]
CPU	Central Processing Unit, keskusyksikkö
FBD	Function block diagram, logiikkakaavio, logiikkaohjelman esitysmuoto
$h$	Savukaasun lämmönsiirtokerroin [ $W/(m^2K)$ ]
IM	Liitäntäyksikkö
LAD	Ladder diagram, tikapuukaavio, logiikkaohjelman esitysmuoto
$m$	Massavirta [kg/s]
$\rho$	Fluidin tiheys [ $kg/m^3$ ]
$P$	Teho [kW]
PI	Proportional-integral
PID	Proportional-integral-derivative
PS	Power supply, virtalähde
$\rho$	Dynaaminen paine [ $N/m^3$ ]
STL	Statement list, ohjelmointimuoto
SYVE	Syöttövesi

$v$  Fluidin nopeus [m/s]

$W$  Energia [J]

# 1 JOHDANTO

Simulaattoreita käytetään hyödyksi prosessien toiminnasta vastaavien henkilöiden ja alan opiskelijoiden koulutuksessa. Simulointia käytetään erilaisissa prosessi- ja automaatio suunnittelun eri vaiheissa. Tekniikan mentyä eteenpäin on saatu toteutettua eri käyttötarkoituksiin soveltuvia simulaattorimalleja. Näitä ovat esimerkiksi seurantaan ja ennustavaan prosessien hallintaan tarkoitettut simulointimallit. Simulaattoreiden etuina on, että niillä voidaan tehdä erilaisia kokeita. Kokeita ei voitaisi tehdä oikeassa laitospäristössä esimerkiksi kustannus- ja turvallisuussyistä. Simulaattoreilla voidaan tehdä kokeita jo ennen kuin koeajot ovat mahdollisia. Hyödyntämällä simulointia vähennetään käyttöönoton yhteydessä tehtävää työtä ja sitä voidaan enemmän tehdä etukäteen toimistossa. (Joronen – Kovács – Majanne 2007, 211.)

Tämä opinnäytetyö tehtiin Oulun ammattikorkeakoulun Automaatiotekniikan laboratorioon. Opinnäytetyössä tehtiin esisuunnittelua koulutussimulaattorin vastapainevoimalaitoksen höyryprosessiin. Voimalaitossimulaattori voidaan tehdä useille eri logikoille, mutta tämän työn alkutietoihin kuului suunnitella voimalaitossimulaattori Siemensin Simatic S7-300 -logiikalle. Step 7 -kehitysympäristö on Siemensin ohjelmointiin tarkoitettu työkalu. Voimalaitossimulaattorin ohjattavia pääkomponentteja ovat syöttövesisäiliön, lieriön pinnan, höyryn lämpötilan, höyryn paineen ja tehon, palamisilman, savukaasujen ja tulipesän paineen sekä polttoaineiden säädöt. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan juuri näitä edellä mainittuja asioita ja niiden matemaattista mallinnusta. Suunnittelua ja ohjelmointia jatkava henkilö voi käyttää tätä opinnäytetyötä lähtöaineistona.



## 2 OHJELMOITAVA LOGIIKKA S7-300

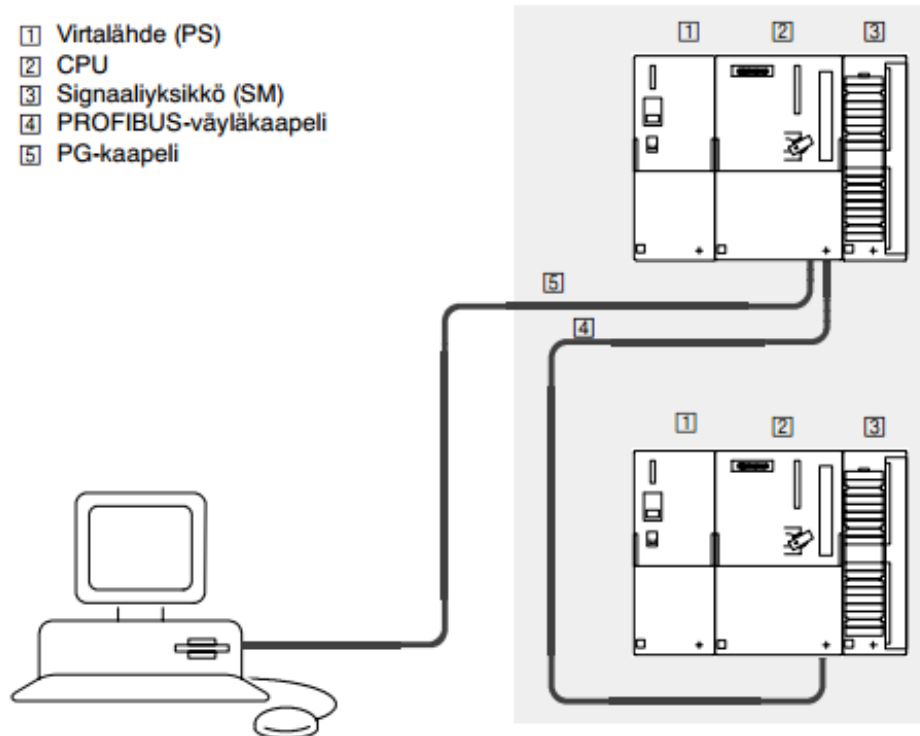
Ohjelmoitava logiikkaohjainta Siemens Simatic S7-300 (kuva 1) käytetään lukuisissa erilaisissa prosessi- ja kappaletavarateollisuuden prosessiohjauksissa. Simatic S7-300 -sarjan logiikan modulaarisuus tekee siitä muunneltavuudellaan helpon ja moneen kohteeseen sopivan tuotteen. Huoltotöiden kannalta modulaarisuuden etuna on, että laitevikaatilanteessa vain viallinen osa joudutaan vaihtamaan. (Siemens 2014.)



*KUVA 1. Simatic S7-300 kompakti CPU (Siemens 2014)*

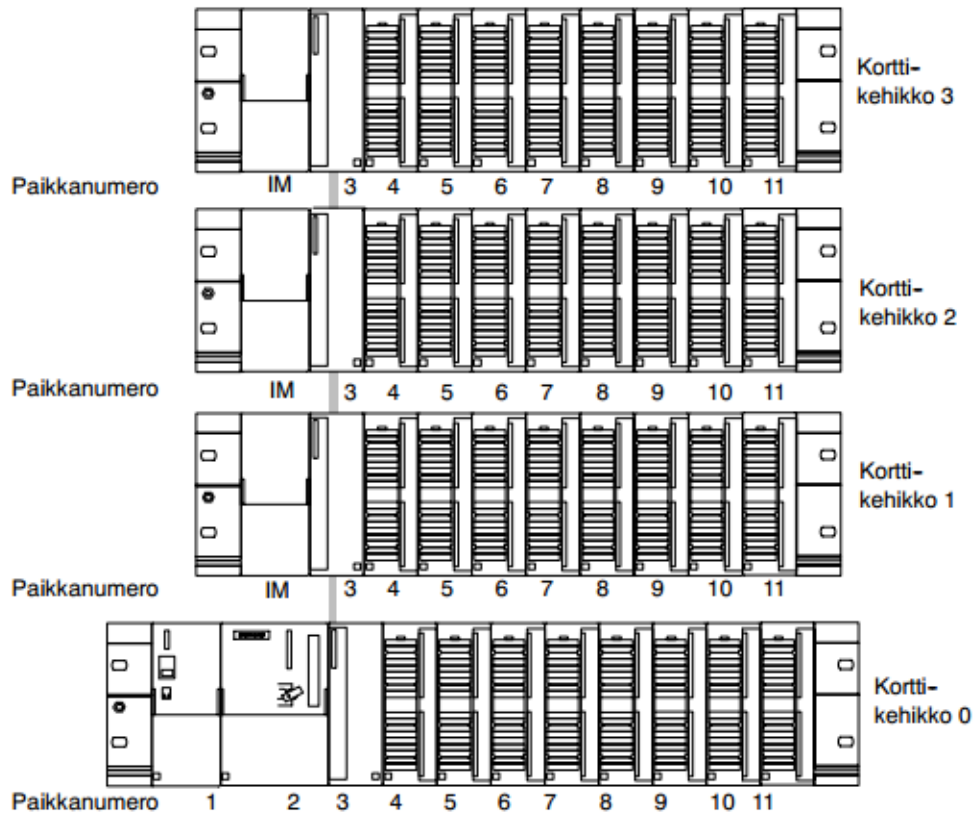
Siemens Simatic S7-300:n modulaariseen rakenteeseen (kuva 2) kuuluvat profiilikiskot eli kehikot, johon järjestelmän komponentit asennetaan. Virtalähde (PS) muuntaa verkkojännitteen käyttö- ja kuormajännitteeksi. Keskusyksikkö (CPU) suorittaa käyttöohjelmaa. Signaaliyksiköt soveltavat erilaiset prosessisignaalisot Siemens S7-300:aan sopiviksi. Signaaliyksiköt ovat joko digitaalisia tai analogisia. Toimintayksiköt on tarkoitettu nopeisiin ja muistia säästäviin prosessisignaali-toimintoihin. Toimintayksikkö suorittaa toiminnot itsenäisesti. Kommunikaatioprosessori vähentää prosessorin kommunikaatiotehtäviä. Sie-

mens S7-300 -laitteet kommunikoivat keskenään Profibus- sekä Profinet-väyläkaapeliin välityksellä. Ohjelman lataus prosessoriin tapahtuu PG-kaapelin välityksellä. (Siemens 2014.)



KUVA 2. S7-300:n yksiköt (Siemens 2014)

Keskitetyn Siemens S7-300 -logiikkaohjaimen yhteen kehikkoon voidaan liittää enintään kahdeksan tulo- ja lähtösignaaliyksikköä ja lisäksi voi olla enintään kolme laajennuskiskoa (kuva 3). Laajennuskiskot yhdistetään toisiinsa liitäntäyksiköiden (IM) avulla. CPU:t voidaan asentaa vain ensimmäiseen korttikehikkoon eli kehikkoon 0. Hajautetun logiikkaohjaimen tulo- ja lähtöpiirit voivat sijaita käytännössä missä vain, esimerkiksi toisella paikkakunnalla. Tulo- ja lähtömoduuleja on saatavana digitaalisena 8-64 -kanavaisena ja analogisena 2- 8 -kanavaisena. (Siemens 2014.)



*KUVA 3. Liitäntäpaikat (Siemens 2014)*

Automaatiolaboratorion Siemens S7-300 -logiikassa on 48 digitaalista tuloa ja 24 digitaalista lähtöä. Logiikassa on 12 analogista tuloa ja 18 analogista lähtöä. Logiikan koko mahdollistaa suunnitelmissa olevaan voimalaitossimulaattoriin kuusi osaprosessia ja näin saadaan jokaiseen kuuteen osaprosessiin 8 digitaalista tuloa, 8 digitaalista lähtöä, 2 analogista tuloa ja 3 analogista lähtöä.

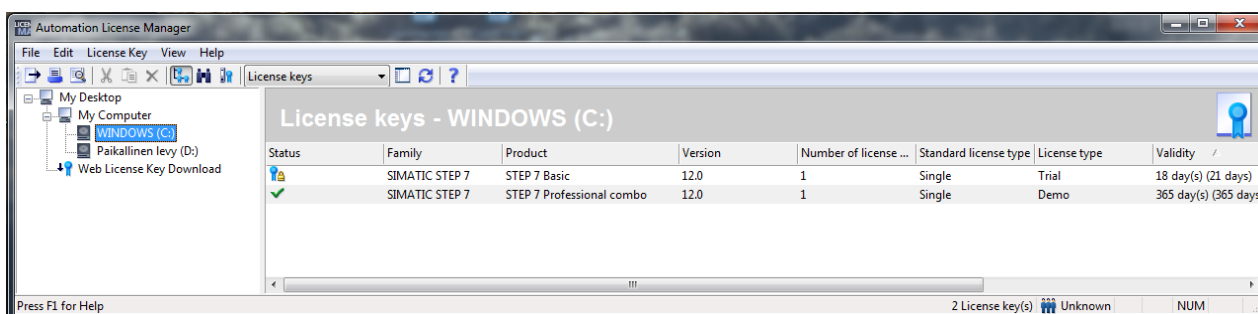
### 3 STEP 7 -KEHITYSYMPÄRISTÖ

Siemens Step 7 -kehitysympäristö on tarkoitettu kaikenkokoisten logiikkaohjainten ohjelmointiin. Kehitysympäristöön kuuluvat Simatic Step 7 Basic, Simatic Step 7 Professional ja Sinamics Startdrive. Simatic Step 7 Basic on tarkoitettu S7-1200-logiikoiden ohjelmointiin. Simatic Step 7 Professional on tarkoitettu S7-300/400/1200/1500- ja WinAC-logiikoiden ohjelmointiin. Sinamics Startdrive -ohjelmalla liitetään Sinamics taajuusmuuttajat automaatioympäristöön. (Siemens 2014.) Simatic Step 7 Professional -kehitysympäristöllä voidaan ohjelmoida suunniteltavissa oleva voimalaitossimulaattori.

#### 3.1 Ohjelmistoympäristön asennus

Simatic Step 7 Professional 2010 SR3 -ohjelmistoympäristöä käytetään Siemensin S7-300:n ohjelmointiin. Ohjelma asennetaan DVD-levykkeeltä. Asennus alkaa automaattisesti, kun laittaa DVD:n levykeasemaan. Asennusohjelma ehdottaa automaattisesti ohjelman tiedoston paikan, joten riittää, kun valitsee Seuraava-painikkeen. Ohjelman asentamisen aloitus saattaa vaatia aluksi tietokoneen uudelleen käynnistämisen. Asentaminen voi kestää useita minuutteja.

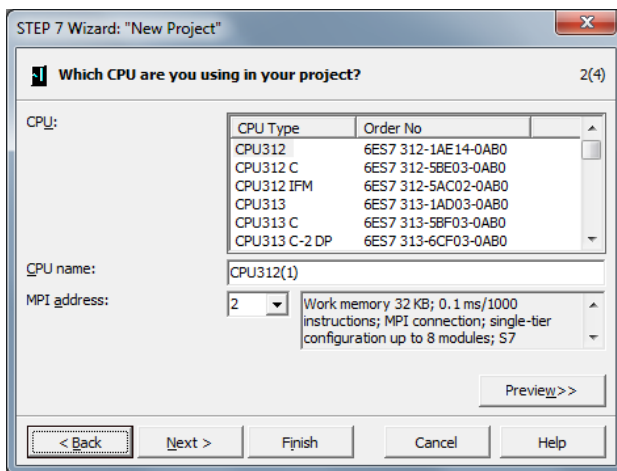
Lisenssiavain pitää siirtää Automation License Manager -ohjelmalla (kuva 4) tietokoneelle, josta ohjelma sen löytää. Lisenssiavaimen siirto muistitikulta tapahtuu yksinkertaisesti siirtämällä se hiirellä esimerkiksi C-asetalle. Onnistuneesti aktivoituneen lisenssiavaimen tilalle tulee vihreä oikeinmerkki.



KUVA 4. Lisenssiavaimen siirto

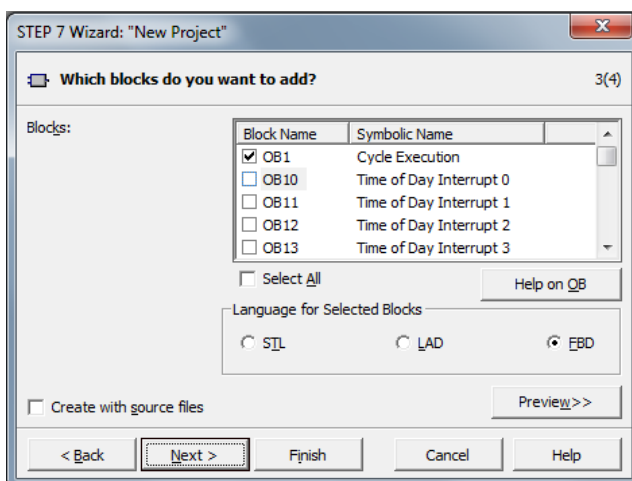
### 3.2 Uuden projektin aloitus

Simatic Manager -ohjelma käynnistetään tietokoneen työpöydän pikakuvakeesta tai Käynnistä-valikosta. Uuden projektin luominen aloitetaan seuraamalla ohjelman ohjeita. Aluksi valitaan CPU:n tyyppi (kuva 5), johon ohjelma on tarkoitettu ladata.



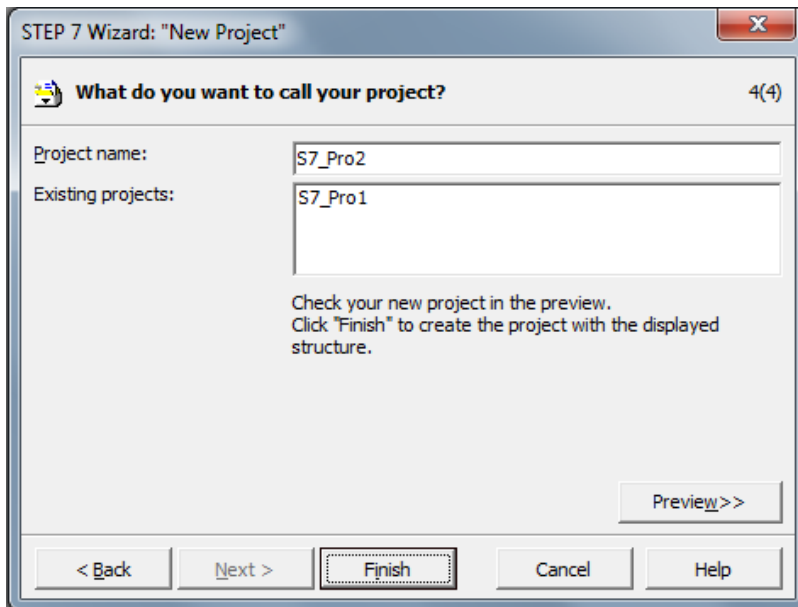
KUVA 5. CPU:n valitseminen

Seuraavassa kohdassa valitaan lohkot ja ohjelmointimuoto (kuva 6). Valittavissa on kolme ohjelmointimuotoa, jotka ovat *STL* (Statement List), *LAD* (Ladder Diagram) ja *FBD* (Function Block Diagram). Kielen valintaan vaikuttaa haluttu ohjelmointinäköymä.



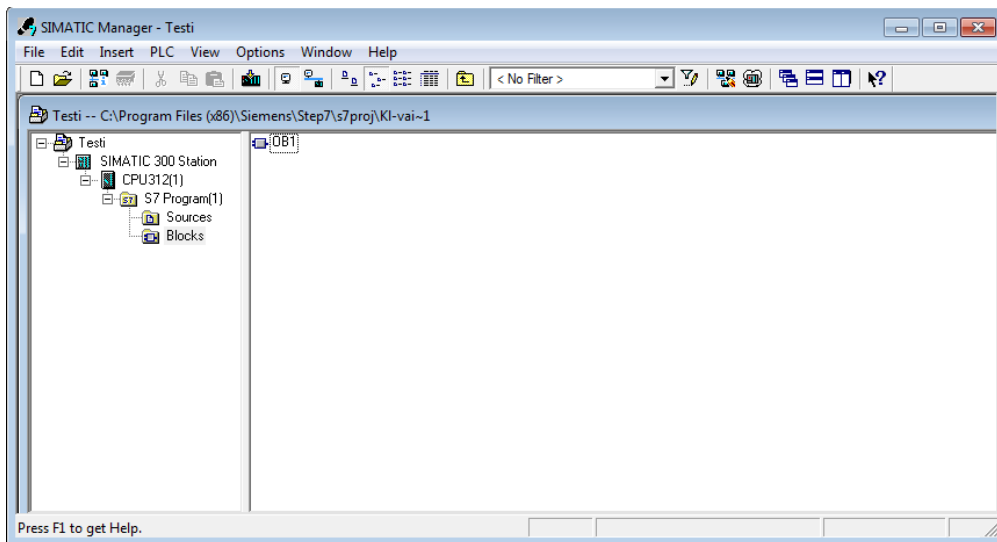
KUVA 6. Lohkojen ja ohjelmointikielen valinta

Seuraavassa (kuva 7) kohdassa annetaan projektille nimi, jonka jälkeen valitaan Finish ja ohjelma luo projektin.

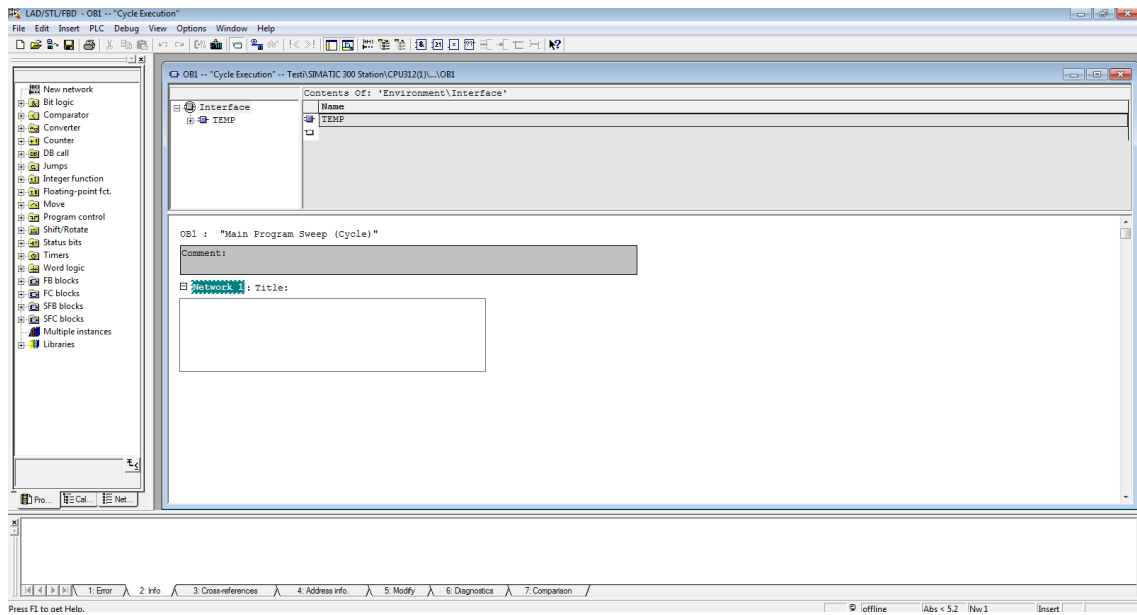


*KUVA 7. Projektin nimeäminen*

Ohjelmointi aloitetaan valitsemalla Block ja OB1 (kuva 8), jolloin avautuu uusi ohjelmointi-ikkuna, johon itse ohjelma tehdään (kuva 9).



*KUVA 8. Ohjelmoinnin aloitus*



*KUVA 9. Ohjelmointi-ikkuna*

## 4 HÖYRYVOIMALAITOKSET

Voimalaitokset voidaan jakaa turbiinista ulostulevan höyrynpaineen perusteella vastapaine- ja lauhdevoimalaitoksiin. Vastapainevoimalaitoksessa on turbiinista ulostulevan höyryn paine ja lämpötila korkeampi kuin lauhdevoimalaitoksessa. Vastapainevoimalaitoksen turbiinista ulostulevan höyryn lämpötila on niin korkea, että sitä voidaan käyttää lämmönvaihtimen välityksellä esimerkiksi kaukolämmön tuottamiseen. Lauhdevoimalaitoksen turbiinista tulevan höyryn lämpötila on niin alhainen, että sitä ei kannata enää hyödyntää, joten lauhdevoimalaitokset tuottavat pelkästään sähköä. (Huhtinen – Korhonen – Pimiä – Urpalainen 2008, 12.)

### 4.1 Vastapainevoimalaitos

Vastapainevoimalaitoksen prosessissa tuotetaan sähköä ja lämpöä. Lämpö menee lauhdevoimalaitoksessa lauhteen mukana hukkaan. Oikean höyryn lämpötilan saavuttamiseksi on vastapainevoimalaitoksessa tingittävä tuotettavan sähkön määrästä. Hyötysuhde sähköntuotannolle on vastapainevoimalaitoksessa noin 30 %. Sähkön tuotannossa tapahtuva häviö voidaan kuitenkin hyödyntää lämmöntuotannossa, joka on suuruudeltaan noin 60 % polttoainetehosta. Sähkö on arvokkaampaa tuotteena kuin lämpö ja sen takia vastapainevoimalaitoksilla pyritään pitämään mahdollisimman suurta rakennussuhdetta sähköntuotannolla. (Joronen ym. 2007, 33–34.)

Vastapainevoimalaitoksessa on turbiinista tuleva paine korkeampi kuin lauhdevoimalaitoksessa. Vastapaine on tuotetun lämmön lämpötilan mukaan noin 100–1600 kPa. Tuotettu lämpö viedään käyttökohteeseen höyrynä tai lämmönvaihtimen kautta veteen sidottuna. Teollisuus käyttää yleensä höyryä ja talojen ja muiden rakennuksien lämmittämiseen hyödynnetään kaukolämpöä. (Joronen ym. 2007, 34.)



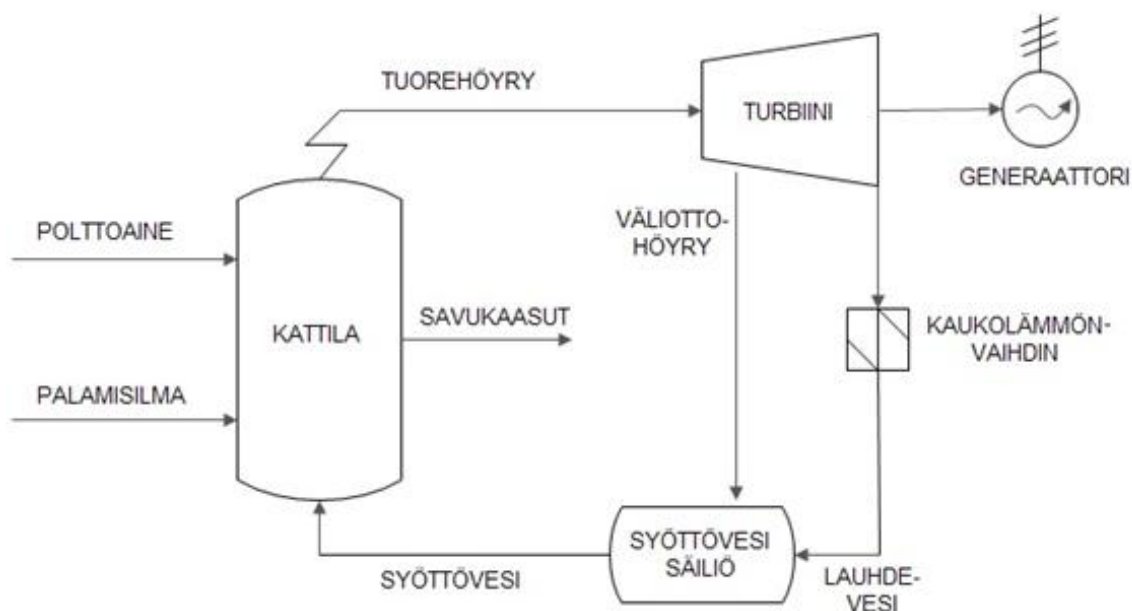
## 4.2 Lauhdevoimalaitos

Lauhdevoimalaitoksen prosessissa tuotetaan pelkästään sähköä ja polttoaineena käytetään yleensä fossiilisia polttoaineita. Lauhdevoimalaitos toimii siten, että höyry johdetaan turbiinista mahdollisimman matalassa paineessa lauhduttimeen. Näin siitä saadaan paras hyötysuhde. Hyötysuhteeseen vaikuttavat myös muun muassa monivaiheinen syöttöveden esilämmitys ja höyryn välitulistus. Sähköntuotannon hyötysuhde on noin 42 %. Suomessa lauhdutusvoimalaitoksia on vain muutamia. (Huhtinen ym. 2008, 89–90.)

## 5 PROSESSIN PÄÄKOMPONENTIT

Tässä luvussa on esitelty höyryvoimalaitoksen pääkomponentteja (kuva 10), jotka mallintamalla voimalaitossimulaattori voidaan toteuttaa. Luvussa 6 mallinetaan niitä matemaattisesti.

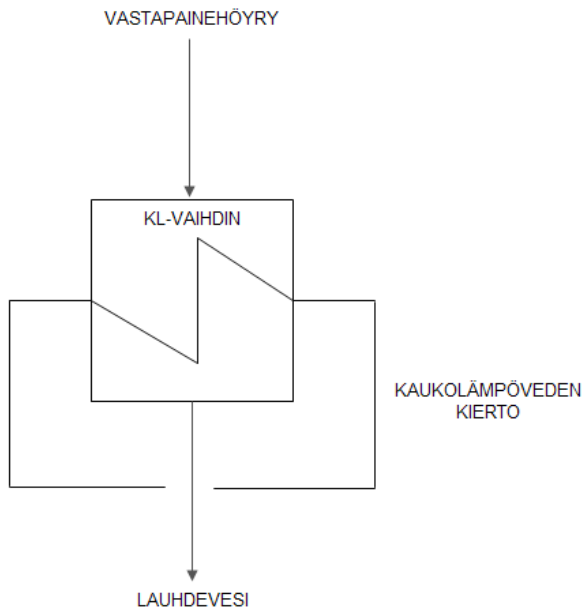
Voimalaitoksen prosessissa polttoaineen kemiallinen energia muutetaan sähköksi ja kaukolämpövärtä lämmittäväksi energiaksi. Kun polttoaine palaa, siihen sitoutunut kemiallinen lämpöenergia muuttuu savukaasuksi, joka sisältää lämpöenergiaa. Kattilassa olevilla lämmönsiirtimillä pyritään savukaasujen lämpöenergia ottamaan talteen ja siirtämään veden lämmitykseen, höyrystykseen ja tulistukseen. Kattilasta ulostulevan tulistetun höyryn paine ja lämpö muutetaan turbiinissa pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi. Turbiinista saatava pyörivä mekaaninen energia käyttää generaattoria, jossa pyörivä energia saadaan muutettua sähköenergiaksi. Kaukolämmönvaihtimessa turbiinista tulevalla höyryllä lämmitetään kaukolämpövärtä. Kaukolämmönvaihtimessa höyry lauhtuu takaisin vedeksi. (Huhtinen ym. 2008, 21.)



KUVA 10. Höyryvoimalaitoksen peruskytkentä (Huhtinen ym. 2008, 21)

## 5.1 Kaukolämmönvaihdin

Turbiinista tuleva vastapainehöyry lämmittää kaukolämpöveden (kuva 11). Kaukolämpöveden kierrossa on joko asuntoja tai muita lämmitystä tarvitsevia kohteita. Vastapainehöyry lauhtuu kaukolämpövaihtimessa lauhdevedeksi. (Huhtinen ym. 2008. 22.)

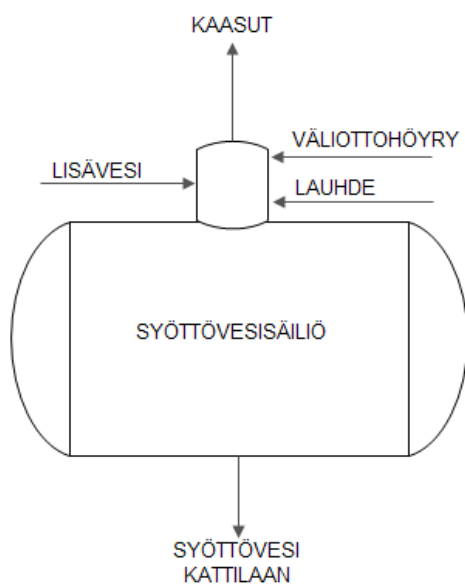


KUVA 11. Kaukolämmönvaihtimen toimintakaavio (Huhtinen ym. 2008, 21)

## 5.2 Syöttövesijärjestelmä

Syöttövesisäiliö on osa syöttövesijärjestelmää, johon kuuluu syöttövesisäiliö, syöttövesipumppu ja putkistot (kuva 12). Syöttövesisäiliö toimii höyryprosessin syöttövesivarastona, johon on tarkoitus varastoida riittävä määrä vettä pienten syöttövesikatkosten varalle. Syöttövesisäiliössä oleva kaasunpoistokupu poistaa lisävedestä ja lauhteesta kaasut. Syöttövesisäiliöön palautuu kierrossa oleva vesi lauhteena ja lisävesivirtauksella säiliön pinta pidetään halutulla korkeudella. Säiliössä oleva vesi lämmitetään höyryllä kylläiseen tilaan ja samalla höyry poistaa lauhteesta ja lisävedestä korroosiota aiheuttavan hapen. (Joronen ym. 2007, 41.)

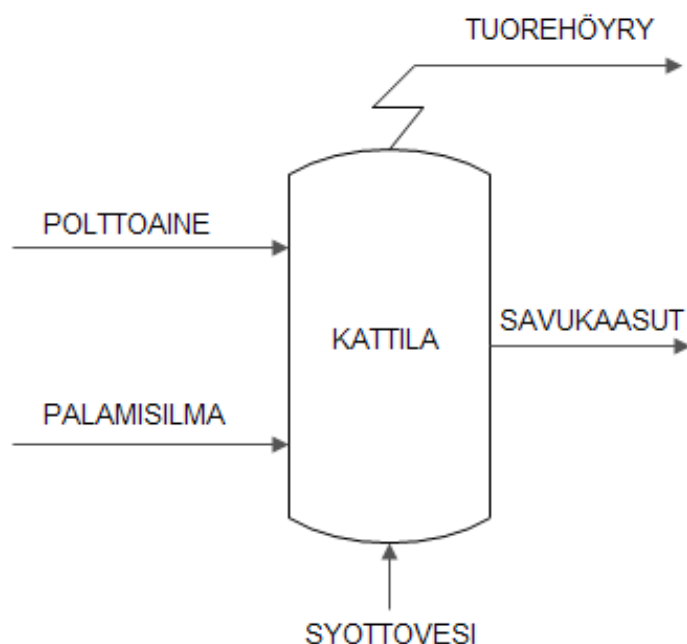
Syöttövesipumppu nostaa veden paineen kattilan paineen tasolle. Vaarana pumppuille on kavitaatio, joka saattaa tapahtua silloin, kun pumpattava vesi on lähellä kylläistä tilaa. Pumpun imupuolella paineen lasku voi aiheuttaa höyrykuplia pumpun siivistön pinnalle, jolloin veden mennessä eteenpäin paineen nousu lauhduttaa höyrykuplat ja aiheutuu äkillinen paineisku. Paineisku voi rikkoa pumpun. Kavitointivaaraa voidaan välttää sijoittamalla syöttövesisäiliö mahdollisimman korkealle kattilaan nähden. Pumput taas sijoitetaan pohjatasolle ja korkeusero syöttövesisäiliön ja pumppujen välillä vähentää vaaraa kavitaatioon. (Joronen ym. 2007, 41.)



*KUVA 12. Syöttövesijärjestelmän toimintakaavio (Huhtinen ym. 2008, 23)*

### 5.3 Kattila

Lämmityskattilatyyppejä ovat lieriökattila ja läpivirtauskattila (Joronen ym. 2004, 36–37). Tässä työssä kattilatyypinä on lieriökattila. Syöttövesi lämmitetään kattilassa (kuva 13) kiehumislämpötilaan ja höyrystetään. Tämän jälkeen höyryä vielä tulistetaan loppulämpötilaan. Näihin prosesseihin tarvittava energia saadaan polttamalla fossiilisia tai uusiutuvia polttoaineita. Polttoainetta syötetään palamisilman kanssa oikeassa suhteessa, jotta palaminen olisi täydellistä. (Huhtinen – Kettunen – Nurminen – Pakkanen 2004, 7.)



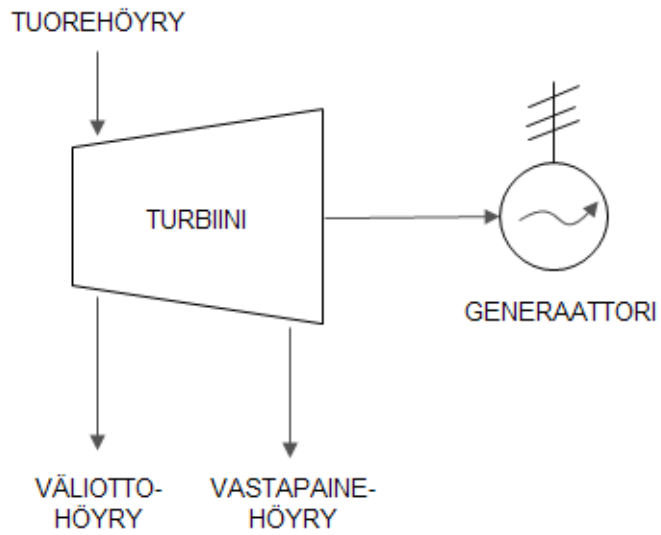
KUVA 13. Kattilan toimintakaavio (Huhtinen ym. 2008, 24)

#### 5.4 Höyryturbiini

Höyry paisutetaan turbiinin läpi, jolloin höyryn lämpöenergia saadaan siirrettyä mekaaniseksi energiaksi. Paisuminen tapahtuu useassa peräkkäisessä siipivyöhykkeessä. Vyöhykkeitä kutsutaan impulssi- ja reaktiovyöhykkeiksi. Impulssivyöhykkeessä höyry paisuu paikallaan olevien suuttimien läpi pyöriviin siipiin, jolloin siipien nopeus kasvaa. Nopeuden kasvu johtuu höyrynpaineen alenemisesta ja sen ominaistilavuuden kasvusta. Juoksupyörän siivet muuttavat höyryn energian juoksupyörää pyörittäväksi energiaksi. Reaktiovyöhykkeessä höyry paisuu staattorin suuttimissa, jolloin höyryn nopeus kasvaa. Staattorin suuttimien jälkeen höyry paisuu lisää pyörivissä suuttimissa, jolloin nopeus edelleen kasvaa (kuva 14). (Joronen ym. 2007, 50–51.)

Turbiinilla tarkoitetaan useasta turbiinista koostuvaa yksikköä, jossa on korkea- ja matalapaineturbiineja. Turbiinit sijaitsevat samalla akselilla ja pyörivät yhteistä generaattoria. Osa korkea- ja matalapaineturbiinien pesistä voidaan erottaa kytkimellä toisistaan voimalaitoksen ajotavan perusteella. Esimerkiksi mata-

lapainepesää ei käytetä, jos tuotetaan sähköä ja kaukolämpöä. (Knowenergy 2014.)



*KUVA 14. Turbiinin toimintaperiaate (Huhtinen ym. 2008, 23)*

## 6 PROSESSIOSIEN MALLINNUS

Tässä luvussa mallinnetaan matemaattisesti muun muassa vastapainevoimalaitoksen komponenttien tehoa, painetta ja savukaasun lämpötilan muutosnopeutta. Näitä matemaattisia mallinnuksia tarvitaan siinä vaiheessa, kun aletaan ohjelmoida voimalaitossimulaattoria. Tämän luvun kaavat on muodostettu ja yhdistetty käyttämällä tämän opinnäytetyön lähdeluettelosta löytyviä lähteitä, esimerkiksi Joroinen ym. 2007 ja Huhtinen ym. 2004.

### 6.1 Kaukolämmönvaihdin

Kaukolämpövesi lämmitetään turbiinista tulevalla vastapainehöyryllä. Kaukolämmönvaihtimen tuottama lämmitysteho saadaan laskettua kaavalla 1.

$$P_{KL} = m_1 \times h_1 \quad \text{KAAVA 1.}$$

$P_{KL}$  = kaukolämmönvaihtimen teho

$m_1$  = massavirta turbiinilta [kg/s]

$h_1$  = turbiinilta tulevan höyryn entalpia [kJ/kg]

### 6.2 Syöttövesisäiliö

Lauhteen teho saadaan laskettua kaukolämmönvaihtimesta tulevan kylläisen veden entalpian ja massavirran avulla kaavalla 2.

$$P_{LAUHDE} = m_2 \times h_2 \quad \text{KAAVA 2.}$$

$P_{LAUHDE}$  = lauhteen teho

$m_2$  = massavirta kl-vaihtimelta [kg/s]

$h_2$  = kl-vaihtimelta tulevan kylläisen veden entalpia [kJ/kg]

### 6.3 Höyryn tarvitsema teho

Kattilan veden lämmittämiseen, höyryttämiseen ja tulistamiseen tarvittava teho saadaan laskettua kaavalla 3.

$$P_{kattila} = m_3(h_3 - h_4) \quad \text{KAAVA 3.}$$

$P_{kattila}$  = kattilan tarvitsema teho [MW], asetusarvo polttoaineen syötölle

$m_3$  = kattilaan tulevan veden massavirtaus [kg/s]

$h_3$  = kattilasta uloslähtevän tulistetun höyryn entalpia [kJ/kg], halutun lämpötilan asetusarvo

$h_4$  = kattilaan tulevan veden entalpia [kJ/kg]

### 6.4 Polttoaineesta saatavan tehon laskenta

Polttoaineesta saatava teho saadaan laskettua kaavalla 4.

$$P_{pa} = m_{pa} \times c_{pa} \quad \text{KAAVA 4.}$$

$P_{pa}$  = polttoaineesta saatava teho [kW]

$m_{pa}$  = polttoaineen massavirta [kg/s]

$c_{pa}$  = käytettävän polttoaineen lämpöarvo [MJ/kg]

### 6.5 Höyryturbiini

Turbiinin sähköteho saadaan laskettua kaavalla 5.

$$P_s = m_4 h_5 - m_5 h_6 - m_6 h_7 \quad \text{KAAVA 5.}$$

$P_s$  = generaattorin sähköteho [kW]

$m_4$  = tuorehöyryn massavirta [kg/s]

$h_5$  = tuorehöyryn entalpia [kJ/kg]



$m_5$  = väliottohöyryn massavirta [kg/s]

$h_6$  = väliottohöyryn entalpia [kJ/kg]

$m_6$  = vastapainehöyryn massavirta [kg/s]

$h_7$  = vastapainehöyryn entalpia [kJ/kg]

## 6.6 Kattilan paine

Kattilan paine saadaan dynaamisen paineen kaavalla 6. Kattilan painetta laskiessa fluidin tiheytenä käytetään ilman tiheyttä.

$$p = 1/2 \rho v^2 \quad \text{KAAVA 6.}$$

$p$  = dynaaminen paine, [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  = fluidin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = fluidin nopeus [m/s]

## 6.7 Savukaasusta saatava lämpöenergia

Lämmön siirtyminen savukaasusta lämmitettävään pintaan saadaan laskettua konvektion kaavalla 7. Savukaasun lämmönsiirtokerroimeksi käytetään ilman lämmönsiirtokerrointa.

$$q_{konv} = hA\Delta T \quad \text{KAAVA 7.}$$

$q_{konv}$  = savukaasun lämpöteho

$h$  = savukaasun lämmönsiirtokerroin [W/(m<sup>2</sup>K)]

$A$  = kattilan seinien pinta-ala [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  = Lämmitettävän veden ja savukaasun välinen lämpötilaero [°C]

## 6.8 Kattilan savukaasujen lämpötilan muutosnopeus

Eri polttoaineiden lämpöarvoilla on vaikutus kattilan savukaasujen lämpötilan muutosnopeuteen. Tämä aika riippuu polttoaineen syötön nopeudesta, polttoaineen sisältämästä energiamäärästä ja palamisilmamäärästä. Palamisilmapuhallin seuraa polttoaineen syöttöä, joten sen vaikutus kattilan lämpötilan muutosnopeuteen oletetaan olevan vähäinen. Kattilan lämpötilan muutosnopeus saadaan kaavasta 8. Yleisimpien polttoaineiden lämpöarvoja saadaan taulukosta 1. (Huhtinen ym. 2004.)

$$P_{teho} = P_{syöttö} \times W_{energia}$$

KAAVA 8.

$P_{teho}$  = polttoaineen luovuttama teho

$P_{syöttö}$  = polttoaineen massavirta [Kg/min]

$W_{energia}$  = polttoaineen sisältämä energia [MJ/kg]

TAULUKKO 1. Polttoaineiden lämpöarvoja (Alakangas 2000, 9)

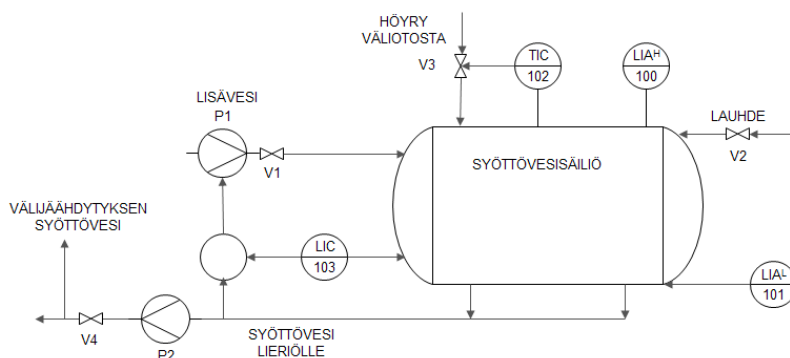
Polttoaine	Mittayksikkö	GJ	MWh	toe	t/m <sup>3</sup> (tai t/i-m <sup>3</sup> )
Raakaöljy	tonni	41,868	11,63	1	0,855
Raskas polttoöljy normaali/vähärikk.	tonni	40,60/ 41,10	11,278/ 11,417	0,970/ 0,0982	0,955
Kevyt polttoöljy	tonni	42,5	11,806	1,015	0,845
Dieselöljy	tonni	41,5	11,528	0,991	0,845
Nestekaasut	tonni	46,3	12,861	1,106	0,58
Kivihilli	tonni	25,211	7,003	0,602	0,8
Koksi	tonni	29,3	8,139	0,602	0,8
Maakaasu (0°C	1000m <sup>3</sup>	36	10	0,86	0,732
Masuunikaasu	1000m <sup>3</sup>	3,79	1,053	0,091	
Koksaamokaasu	1000m <sup>3</sup>	16,7	4,639	0,399	
Mustalipeä	t <sub>ka</sub>	11,7	3,25	0,279	1,415
Koivupilke (halko)	p-m <sup>3</sup>	5,4	1,5	0,129	1,415
Sekapilke (halko)	p-m <sup>3</sup>	4,51	1,25	0,107	0,35
Polttohake	i-m <sup>3</sup>	2,88	0,8	0,069	0,3
Sahanpuru	i-m <sup>3</sup>	2,16	0,6	0,052	0,3
Kutterin lastu	i-m <sup>3</sup>	1,8	0,5	0,043	0,1
Havupuun kuori	i-m <sup>3</sup>	2,16	0,6	0,052	0,3
Koivun kuori	i-m <sup>3</sup>	2,52	0,7	0,06	0,35
Puupelletit	tonni	16,92	4,7	0,404	0,69
Palaturve	i-m <sup>3</sup>	5,04	1,4	0,12	0,38
Jyrsinturve	i-m <sup>3</sup>	3,24	0,9	0,077	0,32
Biokaasu	m <sup>3</sup> kaasua	14,4 - 28,8	4 - 8	0,344 - 0,688	

## 7 KUVAUKSET OSAPROSESSIEN SÄÄDÖISTÄ

Osaprosessien ohjauksien ja säätöjen tehtävä on huolehtia, että kattila tuottaa mahdollisimman turvallisesti ja taloudellisesti halutun paineista höyryä (Huhtinen ym. 2004, 262). Tässä luvussa esitellään tarkemmin voimalaitoksen osaprosesseista syöttövesisäiliön pinnankorkeuden säätö, lieriökattilan lieriön pinnankorkeuden säätö, höyryn lämpötilasäätö, höyryn paineen ja tehon säätö, palamisilman, savukaasujen sekä tulipesän paineen säädöt ja polttoaineiden säädöt. Valmista simulaattoria käyttävät opiskelijat voivat käyttää apuna tässä luvussa esitetyjä PI-kaavioita simulaattorin osaprosessien ohjaussovellusten tekemiseen.

### 7.1 Syöttövesisäiliön pinnankorkeuden säätö

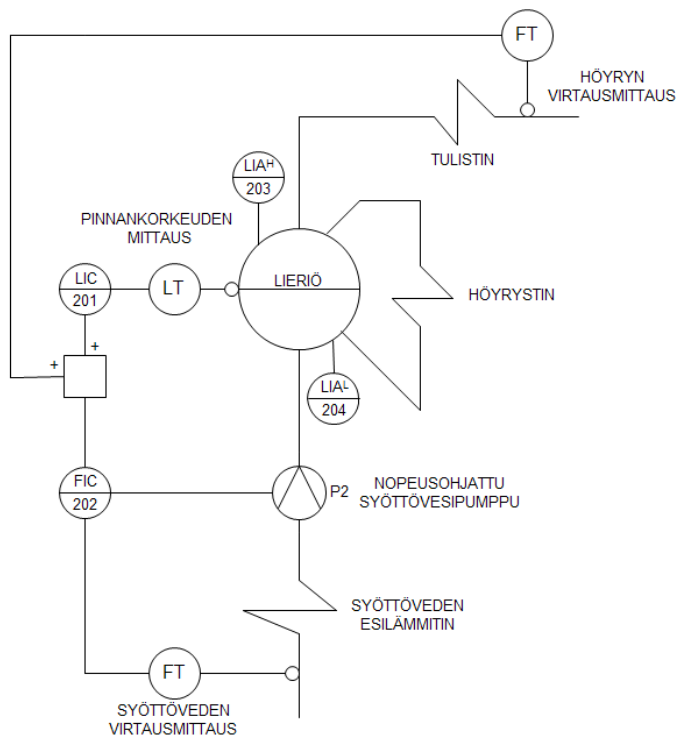
Voimalaitossimulaattorin syöttövesisäiliön (kuva 15) pinnankorkeutta säädetään LIC-103 säätimellä. Syöttöveden pinnankorkeuteen vaikuttaa lauhteen määrä, joka virtaa suoraan säiliöön venttiilin V2 kautta. Pinnankorkeuteen vaikuttaa myös lisäveden määrä. Lisäveden virtaussäätö koostuu kaksipistesäädöllä LIC-103 minimipinnasta. Veden lämmityksen säätö tapahtuu väliottohöyryventtiilillä V3 syöttövesisäiliön lämpötilan mukaan. Tavoitteena on pitää veden lämpötila mahdollisimman lähellä kylläistä tilaa. Ylärajahälytys LIA<sup>H</sup>-100 sulkee seuraavat venttiilit: lisävesi V1, lauhte V2, väliottohöyry V3 venttiilit ja alarajahälytys LIA<sup>L</sup>-100 sulkee syöttövesiventtiilin V4.



KUVA 15. Syöttövesiprosessin PI-kaavio

## 7.2 Lieriökattilan lieriön pinnankorkeuden säätö

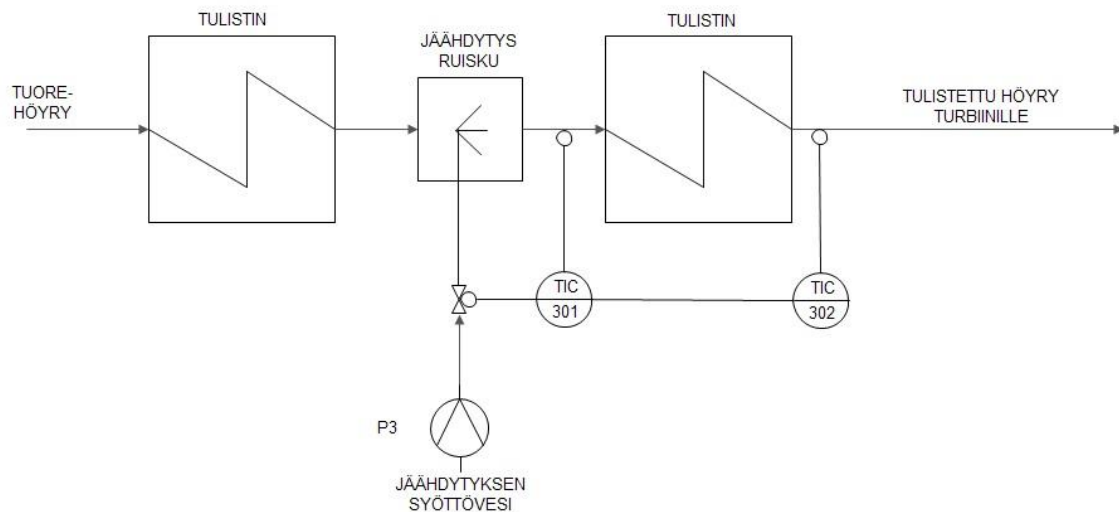
Kattilan syöttövesimäärän säädöllä (kuva 16) pyritään pitämään lieriön pinnankorkeus vakiona. Pinnankorkeuden säätö ei voi perustua pelkästään mittaukseen, koska höyrynkulutuksen äkillinen lisääntyminen aiheuttaa höyrynpaineen laskun ja silloin osa vedestä höyrystyy nopeasti. Tällöin höyrykuplien osuus kasvaa ja seurauksena on lieriön vedenpinnan näennäinen nouseminen. Syöttövesivirtausta säädetään kolmipistesäätönä, jolloin minimoidaan mahdolliset lieriön pinnankorkeuden vaihtelut. Lieriön pintasäädin LIC-201 antaa ohjearvon aläsäätimelle FIC-202, joka säätelee syöttöveden virtausta. Syöttöveden virtauksen asetusarvoon lisätään kattilasta lähtevän veden määrä, joka saadaan tuorehöyryn virtausmittauksesta. Syöttöveden virtausta ohjataan nopeusohjatulla pumpulla P2. LIA<sup>H</sup>-203 -ylärajahälytyksestä syöttövesipumppu pysähtyy. LIA<sup>L</sup>-204 -alarajahälytyksestä seuraa tulet pois -käsky, jolla estetään lieriön kuiviin kiehuminen. (Joronen ym. 2007, 152; Huhtinen ym. 2004, 269–270)



KUVA 16. Lieriön pinnansäädön PI-kaavio (Majanne – Välisuo 2007)

### 7.3 Höyryn lämpötilan säätö

Höyryn lämpötilan säädössä (kuva 17) tulistetun höyryn joukkoon ruiskutetaan syöttöettä jäähdytsruiskulla. Höyryn lämpötila on pidettävä mahdollisimman tarkasti ihannearvossaan, joka on tulistinmateriaalin mukaan määritelty. Alemman säätimen asetusarvon minimirajoitus on esimerkiksi 320 °C ja ylemmän säätimen maksimirajoitus esimerkiksi 525 °C. Höyryn lämpötilan säätö toteutetaan kaskadisäädöllä, jossa ylempi säätö on *PI*- ja alempi säätö on *PID*-tyyppinen, jossa *D*-osa tulee polttoaineen syötöstä ja tuorehöyryn energiavirrasta. (Joronen ym. 2007, 165; Huhtinen ym. 2004, 273–274.)

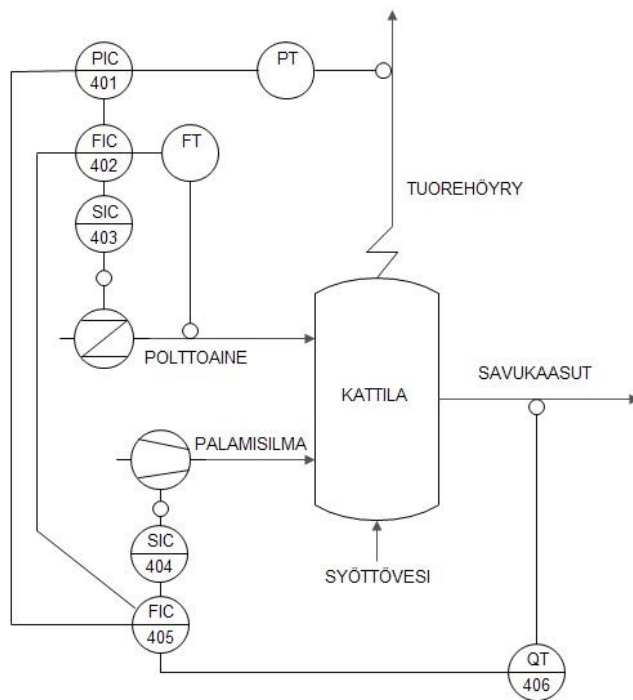


KUVA 17. Höyryn lämpötilan säädön *PI*-kaavio (Majanne – Välisuo 2007)

### 7.4 Höyryn paineen ja polttoaineiden säädöt

Tuorehöyryn paineen säätö (kuva 18) toteutetaan kiinteän paineen säätönä polttoainevirtausta ohjaamalla. Säätimen lähtöviestinä on polttoaineteho megawatteina. Paineen säädin PIC-401 antaa ohjauksen polttoaineen virtaussäätimelle FIC-402. FIC-402 säätelee polttoaineen syöttöä. Eroarvo saadaan tuorehöyryn paineen asetusarvon ja mittauksen erotuksesta. (Joronen ym. 2007, 263–266.)

Polttoaineen virtaussäädin FIC-402 antaa asetusarvon palamisilmasäätimelle FIC-405. Ilmamäärän säädön tavoitteena on saada ilmamäärä pidettyä palamisen kannalta optimaalisena suhteessa polttoaineen määrään. Palamisilma puhaltimen ollessa käsikäytöllä palamisilman säätö seuraa polttoaineen syötön määrää. (Joronen ym. 2007, 263–266.)



KUVA 18. Höyrynpaineen ja tehon säädön PI-kaavio (Huhtinen ym. 2008, 154–155)

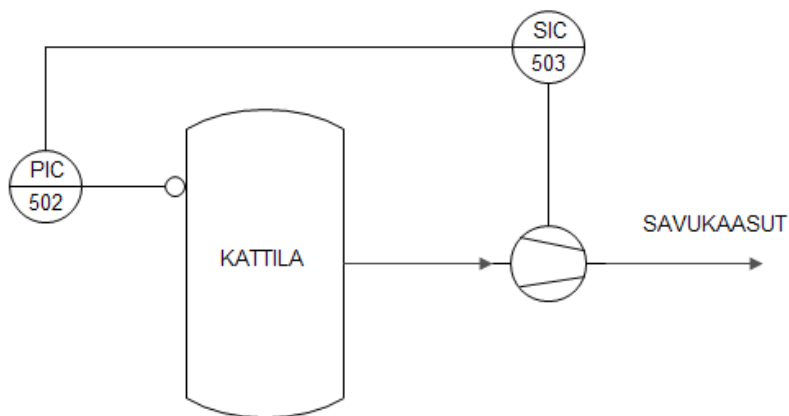
## 7.5 Palamisilman, savukaasujen ja tulipesän paineen säädöt

### 7.5.1 Palamisilman säätö

Palamisen hyötysuhteen tärkein asia on oikean ilmamäärän syöttäminen polttoaineen määrää kohtaan. Ilmamäärän on oltava riittävän suuri, jotta kaikki polttoaineessa oleva palava materiaali palaa, mutta mahdollisimman pieni, jotta savukaasuvirran mukana poistuva hukkalämpö olisi mahdollisimman pieni. (Joronen ym. 2007, 38.) Palamisilmapuhaltimen pyörimisnopeussäätö SIC-403 (kuva 18) saa asetusarvon polttoaineen syötön määrästä.

### 7.5.2 Savukaasujen ja tulipesän paineen säätö

Tulipesän paineen säädöllä tavoitteena on pitää tulipesässä pientä alipainetta. Tällä pyritään siihen, että savukaasut eivät vuoda kattilahuoneeseen. Savukaasut imetään pyörimisnopeussäätöisellä savukaasupuhaltimella (kuva 19). SIC-503 ohjaa savukaasupuhallinta, joka saa asetusarvon tulipesän paineensäätimestä PIC-502. (Huhtinen ym. 2004, 269; Joronen ym. 2007, 164.)

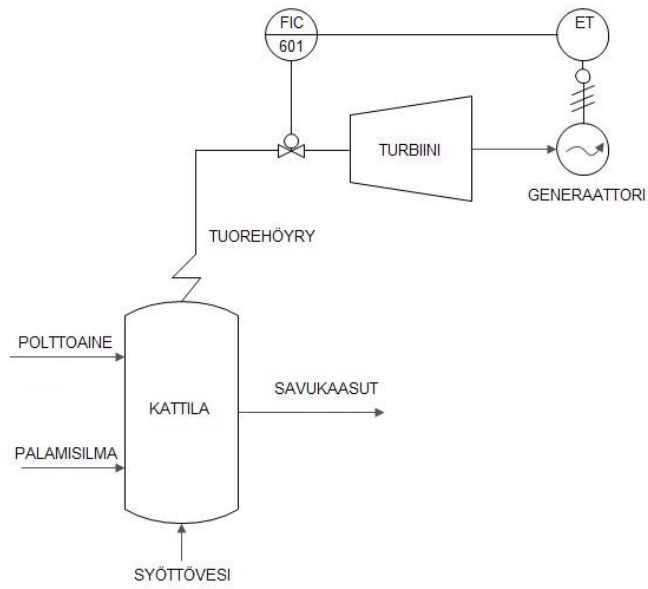


KUVA 19. Savukaasun ja tulipesän paineen säätö (Huhtinen ym. 2004, 269)

### 7.6 Tehon säätö

Sähkötehoa säädetään kiinteän paineen säätötavassa turbiinin teholla ja höyrynpainetta polttoaineteholla. Kun sähkötehon tarve kasvaa, kasvattaa generaattori asetusarvoa turbiinin höyryvirtausventtiiliä säättävälle FIC-601 tehosäätimelle (kuva 20). Höyryvirtausta turbiinille säädetään pääsäätöventtiileillä, jotka hyödyntävät kattilaan varastoitunutta energiaa. Kattilaan varastoituneen energian vähetessä höyrynpaine laskee. Kiinteän paineen säädössä höyrynpaine pyritään pitämään asetusarvossaan. Höyrynpaineen laskiessa höyrynpaineen säädin PIC-401 antaa polttoainevirtauksen muutoskäskyn virtausta säättävälle FIC-402, jotta höyrynpaine palautuisi asetusarvoon (kuva 18). (Joronen ym. 2007, 150–151.)





KUVA 20. Sähkötehon säätö (Huhtinen ym. 2004, 264)

## 8 LOPPUSANAT

Tämä opinnäytetyö on osa koko voimalaitossimulaattorin suunnittelua ja toteutusta koulutuskäyttöön. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua ennen kaikkea vastapainevoimalaitokseen ja sen pääkomponentteihin sekä suunnitella niiden mallinnuksia.

Tätä työtä voidaan pitää lähtötietoaineistona voimalaitossimulaattorin suunnittelua ja toteutusta jatkavalle. Valmiit kuvaukset prosessiosien säädöistä voivat puolestaan olla simulaattorin käyttäjille lähtötietoaineistona. Valmiissa koulutus-simulaattorissa voidaan ohjata ja säätää kuutta prosessiosaa toteuttamalla kuhunkin osaprosessiin ohjaussovellus. Tarkoituksena on, että ohjaussovelluksilla voidaan ohjata koko voimalaitossimulaattoria. Jos opiskelijaryhmiä on vähemmän kuin kuusi, ylimääräisiä prosessialueita voidaan ohjata esimerkkisovelluksilla. Esimerkkisovellusten tekeminen on yksi työ voimalaitossimulaattorin suunnittelua ja toteutusta jatkavalle.

Voimalaitossimulaattorin suunnittelun jatkaja voisi tarkastella myös eri osaprosessien paineiden säädön toteuttamista. Myös palamisilman ja lisäveden esilämmittimien suunnitteleminen täydentäisi tätä suunnittelua. Lisäksi seuraavaksi voisi ohjelmoida simulaattorin esimerkiksi Siemens S7-300 -logiikalle tai muulle vastaavalle logiikalle.

## LÄHTEET

Alakangas, Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia.

Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. Hakupäivä:

22.5.2014

Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2004  
Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Opetushallitus.

Huhtinen, Markku – Korhonen, Risto – Pimiä, Tuomo – Urpalainen, Samu 2008.  
Voimalaitostekniikka. Tampere: Opetushallitus.

Joronen, Tero – Kovács, Jenó – Majanne, Yrjö 2007. Voimalaitosautomaatio.  
Helsinki: Suomen Automaatioseura ry.

Knowenergy 2014. Höyryturbiinin toimintaperiaate. Saatavissa:

[http://www.knowenergy.net/suomi/monipolttt\\_kattilat/10\\_turbiini/fr\\_text.htm](http://www.knowenergy.net/suomi/monipolttt_kattilat/10_turbiini/fr_text.htm). Hakupäivä 16.3.2014.

Majanne, Yrjö – Välisuo, Martti 2007. Voimalaitosprosessien ohjaus. Tampereen yliopisto. Saatavissa: <http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/voimalaitosohjaus.pdf>. Hakupäivä: 3.5.2014.

Siemens 2014. Automaatiojärjestelmä S7-300, Rakenne. Saatavissa:

[http://www.siemens.fi/pool/products/industry/iadt\\_is/tuotteet/automaatiotekniikka/ohjelmoitavat\\_logiikat/s7\\_300/simatic-s7-300-rakenne-cpun-tiedot\\_6es7398-8aa03-8aa0.pdf](http://www.siemens.fi/pool/products/industry/iadt_is/tuotteet/automaatiotekniikka/ohjelmoitavat_logiikat/s7_300/simatic-s7-300-rakenne-cpun-tiedot_6es7398-8aa03-8aa0.pdf). Hakupäivä 28.3.2014.