



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institute of Automation and Control

Voimalaitosprosessien ohjaus

Energiatekniikan automaatio
TKK 2007

Yrjö Majanne, TTY/ACI

Martti Välisuo, Fortum Nuclear Services

Sisältö

- Johdanto
- Automaatiolle asetettävien vaatimusten lähtökohdat
- Automaation toiminnot
- Voimalaitoksen dynamiikasta



Prosessinohjauksen raja

- Voimalaitoksen prosessinohjauksen tehtävä on hallita voimalaitoksen tehontuotanto ja muu prosessin toiminta reaaliaikaisesti.
- Prosessinohjaus on energiantuotannon hallinnan alin taso
- Prosessinohjaus saa tuotanto-ohjeet tuotannonohjauksesta.
- Prosessinohjauksesta siirretään valikoitua ja jalostettua informaatiota tuotannonohjaukseen.



Teollisuustuotannon aikahorisontit

Liiketoiminnan ohjaus

1 ... 5 vuotta

Tuotannonohjaus ja kunnossapito

1 tunti ... 1 vuosi

Prosessinohjaus

10 ms ... 1 h

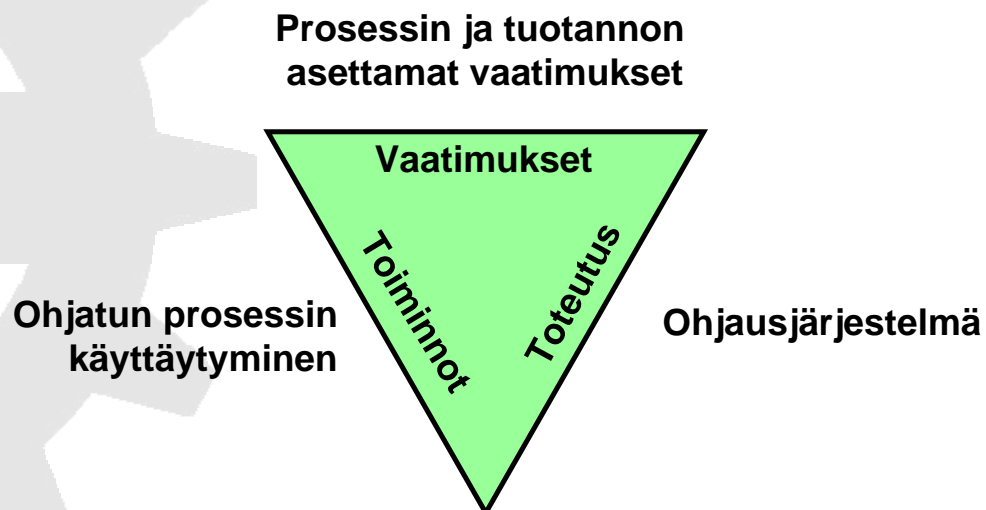


Miksi, mitä ja miten

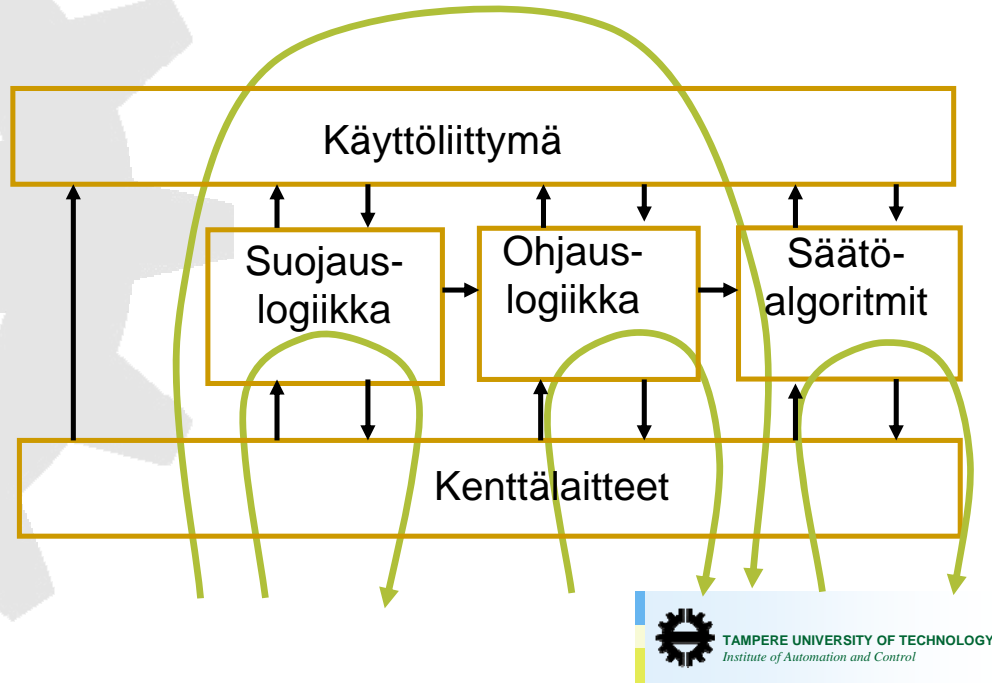
- Yksi tapa jäsentää automaation kokonaisuutta, on kysyä miksi, mitä ja miten.
- Kysymyksen **miksi** vastauksena on vaatimusten kuvaus
- Kysymyksen **mitä** vastauksena on toimintojen kuvaus
- Kysymyksen **miten** vastauksena on laitteiden ja ohjelmistojen kuvaus.



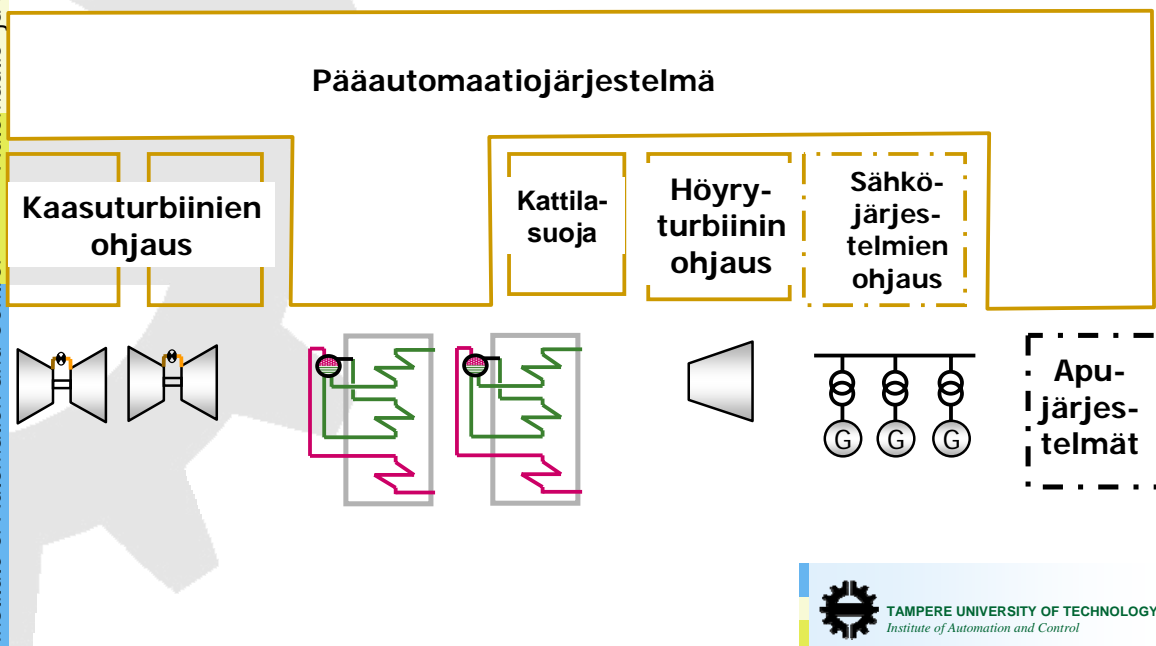
Näkökulmia prosessinohjaukseen

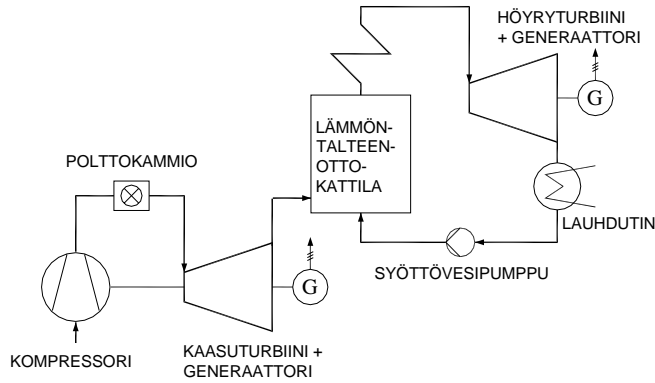
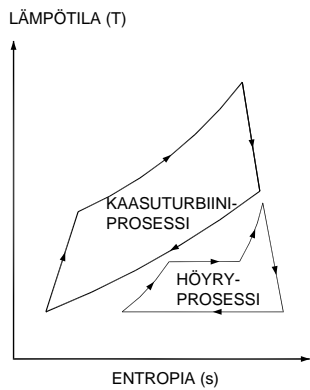
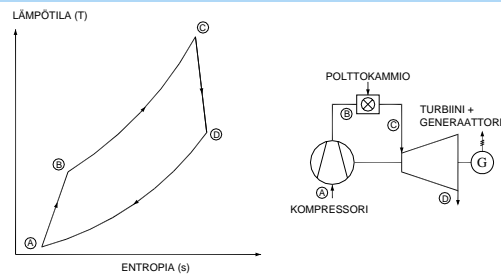
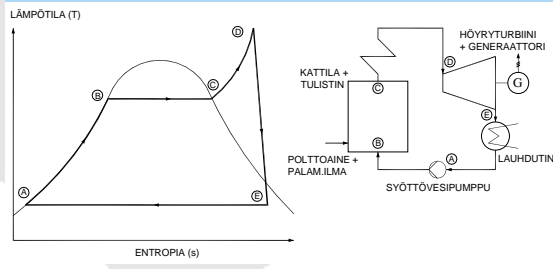


Prosessinohjauksen toiminnallinen rakenne



Ohjausjärjestelmät; esimerkkinä kombivoimalaitos





- Johdanto
- Automaatiolle asetettävien vaatimusten lähtökohdat
- Automaation toiminnot
- Voimalaitoksen dynamiikasta



Prosessilaitteet

- Prosessilaitteita, kuten kattilaa, turbiinia, pumppuja jne. on käytettävä valmistajan ohjeiden mukaisesti.



Tuotanto

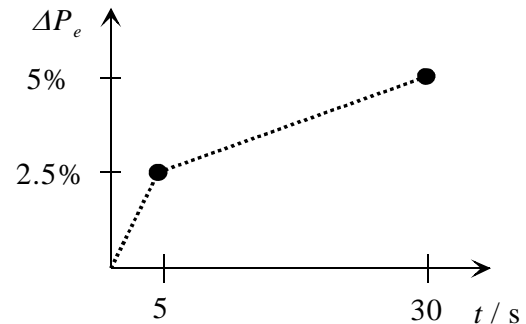
- Voimalaitoksen tehtävänä on tuottaa sähköä ja usein myös kaukolämpöä tai prosessihöyryä.
- Yksi energialaji on tavallisesti päätuote, jonka tarve määrää voimalaitoksen tuotannon.
- Voimalaitoksen tulee pystyä määrättyihin tehonmuutosnopeuksiin.
 - Sähkötehon muutosnopeus on kriittinen niille laitoksille, jotka osallistuvat sähköverkon taajuuden säätöön.
 - Taajuuden säätö jaetaan primääriin eli sekuntitason säätöön, sekundääriin eli minuuttitason säätöön ja tertiääriin eli tuntitason säätöön.
 - Pohjoismaissa primääristä ja sekundääristä säädöstä vastaavat lähinnä vesivoimalaitokset.
 - Keski-Euroopassa on tavallista, että lämpövoimalaitokset osallistuvat myös primääriin säätöön.



Tuotanto

- Sähköverkon taajuuden primääriin eli sekunti-tason säätöön osallistuvilta tuotantoyksiköitä on tyypillisesti vaadittu, että
 - tuotantoyksikkö kykenee muuttamaan tehoaan 2,5% nimellistehosta ajassa 5 s
 - ja 5% nimellistehosta ajassa 30 s.
 - Tämän jälkeen tuotantoyksikön tulee pystyä muuttamaan tehoaan 4 ... 8% nimellistehosta minuutissa.
- Voimalaitoksen tulee pystyä käyttämään suunniteltua polttoainevalikoimaa.
 - Voimalaitosten taloudellisuutta pyritään nykyään parantamaan käyttämällä halpaa polttoainetta.
 - Halvempi polttoaine on tavallisesti hankalammin käsiteltävää ja epätasaisempaa.

*Change of generated power
100% = nominal power*



Tuotanto

- Voimalaitoksen hyvä käytettävyys on erittäin tärkeää.
- Suunnittelemattomat pysäytykset aiheuttavat
 - tuotannonmenetyksiä,
 - voimalaitoksen komponenttien rasittumista ja energiahukkaa,
 - paperitehtaassa voimalaitoksen suunnittelematon pysähtyminen aiheuttaa usein myös paperikoneen seisokin



Organisaatio

- Voimalaitoksen automaation tulee olla yhteensopiva käyttömiehityksen kanssa.
- Mitä pienempi vuoromiehistö on ja mitä laajempi on kunkin operaattorin vastuualue, sitä laajempi ja täydellisempi tulee automaation olla.
- Kaukokäyttö ja miehittämätön käyttö antavat omat vaatimuksensa.



Turvallisuus

- Suojausjärjestelmällä on ratkaiseva merkitys voimalaitoksen turvallisuudelle.
- Turvallisuuteen kuuluu henkilövahinkojen ja ympäristövahinkojen välttäminen.
 - Suojauksilla estetään myös aineellisia vahinkoja, esim. laitteiden rikkoutumisia.
- Häiriötilanteessa operaattorin tulee voida luottaa suojauksiin niin, että hän voi keskittyä tuotannon ylläpitämiseen.



Taloudellisuus

- Voimalaitoksen tulee toimia hyvällä hyötysuhteella.
- Ajotavan tulee olla sellainen, että se ei lisää kunnossapitokustannuksia eikä lyhennä liian nopeasti prosessin pääkomponenttien jäljellä olevaa elinikää.



Automaation luotettavuus ja kunnossapito

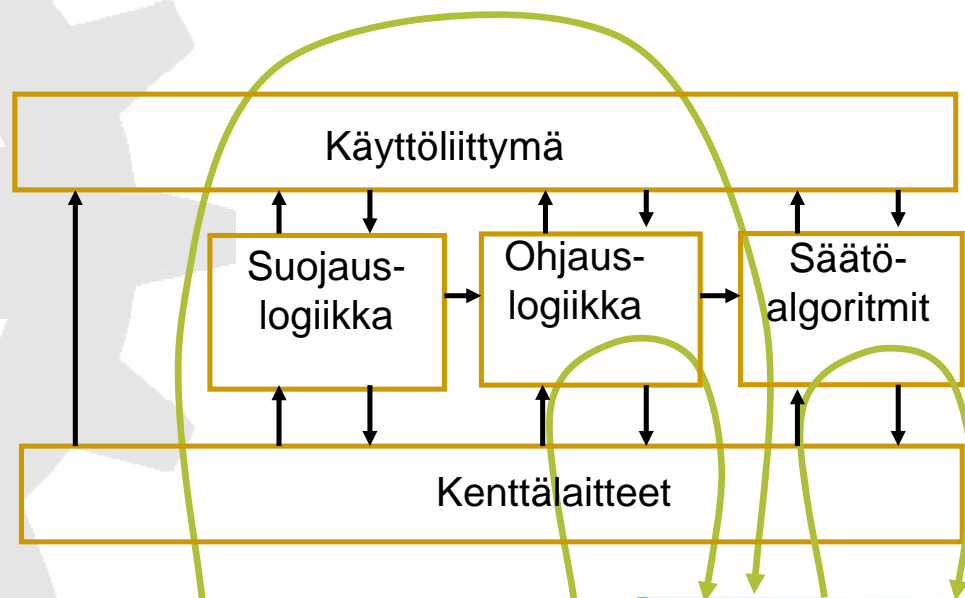
- Voimalaitoksen automaation tulee olla erittäin luotettavaa.
 - esim. yksi tuotantoa häiritsevää virhetoiminto vuodessa on jo liikaa.
- Voimalaitoksen automaatiojärjestelmän käyttöikä on keskimäärin varsin pitkä - monta kertaa pitempi kuin muilla tietoteknisillä järjestelmillä.
 - Tavalla tai toisella pitää varmistaa varaosien saatavuus ja mahdollisuus tehdä muutoksia.



- Johdanto
- Automaatiolle asetettävien vaatimusten lähtökohdat
- Automaation toiminnot
- Voimalaitoksen dynamiikasta



Prosessinohjauksen toiminnallinen rakenne



Kenttälaitteet

- Mittausanturit ja binäärianturit tuovat tietoa prosessista prosessinohjauksen käyttöön.
- Moottorinohjaimet käynnistävät ja pysäyttävät sähkömoottoreita.
- Toimilaitteet käyttävät toimielimiä, kuten venttiileitä ja peltejä.
 - Kaksiasentoisia toimilaitteita kutsutaan sulkutoimilaitteiksi.
 - Toimilaitteita, joiden asentoa voi ohjata portaattomasti, kutsutaan säätötoimilaitteiksi.
- Suuressa voimalaitoksessa saattaa olla jopa 2000 mittausanturia, 2000 binäärianturia, 500 toimilaitetta ja 300 säätöpiiriä.



Logiikkaohjaukset

Suojaukset

- Suojausten tehtävä on varmistaa voimalaitoksen turvallisuus ja estää laitevauriot.
- Suojaukset pysäyttävät prosessilaitteita ja ohjaavat sulkutoimilaitteita vaaratilanteessa.
- Suojausjärjestelmä havaitsee vaaratilanteen mittausviestien raja-arvojen ylittymisestä tai binäärianturien viesteistä.
- Voimalaitoksen pääsuojat ovat
 - kattilasuoja,
 - turbiinisuoja
 - generaattorisuoja.



Logiikkaohjaukset

Suojaukset

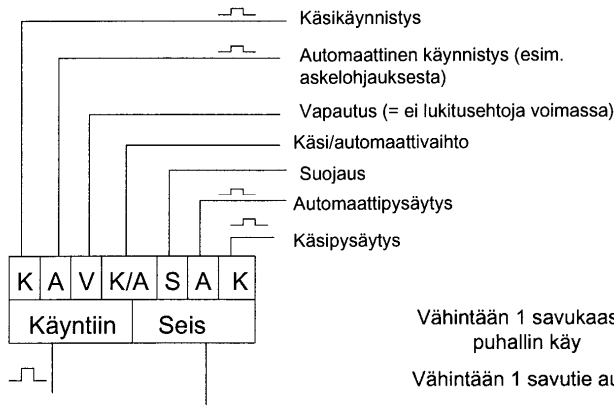
- Tiukkojen luotettavuusvaatimusten takia suojausten laiteteknillinen toteutus on usein erilainen kuin muun prosessiautomaation.
- Tärkeimmät suojaukset ovat redundanttisia
 - järjestelmässä on rinnakkaisuutta siten, että yksittäinen vika ei estäisi suojaustoimintoa.
 - Joissakin tapauksissa koko suojauspiiri on kaksinkertainen, kun taas joissakin tapauksissa antureita on kaksi tai kolme.
- Standardissa SFS 5712, Höyrykattilat. Höyrykattilalaitos. Rekisteröitävälle höyrykattilalle määritellään suojausvaatimuksia.



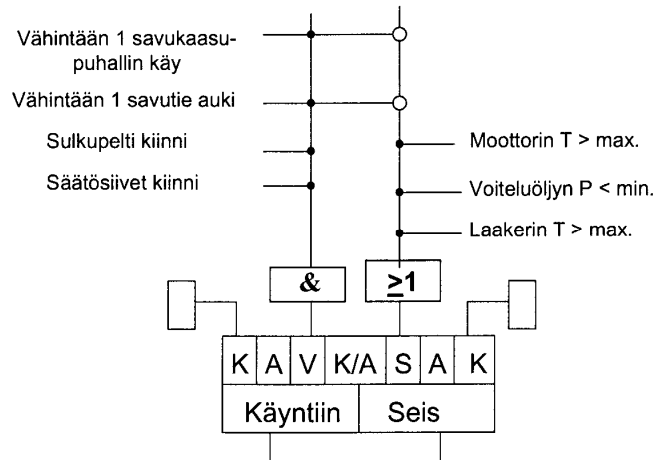
Yksittäisohjaukset ja lukitukset

- Yksittäisohjauksella tarkoitetaan yhden toimilaitteen, sähkömoottorin tai vastaavan ohjausta.
- Yksittäisohjaukseen liittyy tavallisesti useita käskyjä ja ehtoja, kuten lukituksia.
- Lukitusten tehtävä on estää ihmistä tai automaatiota käynnistämästä laitteita tai ohjaamasta toimilaitteita väärässä järjestyksessä ja väärissä tilanteissa.
- Monet suojausehdot ovat samalla lukitusehtoja.





Ilmapuhaltimen ohjaus

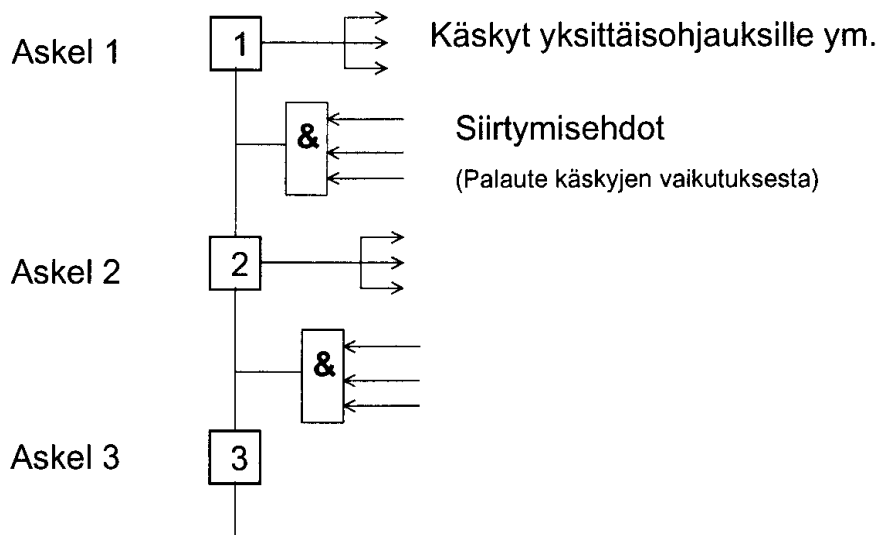


Vaihto-ohjaukset

- Voimalaitoksessa on usein joitakin redundanttisia prosessilaitteita.
- On esim. tavallista, että on kolme syöttövesipumppua, joista kaksi riittää täyden kuorman ajoon.
- Silloin on yleensä olemassa vaihto-ohjaus, joka käynnistää automaattisesti seisovan pumpun, jos jompikumpi käynnissä olevista pumpuista pysähtyy häiriön takia.

Askelohjaukset

- Askelohjelman eli ohjausekvenssin tehtävä on käynnistää tai pysäyttää määrätty osajärjestelmä.
- Joissakin tapauksissa koko voimalaitos voidaan käynnistää yhdellä askelohjelmalla eli "yhdellä napilla".



Rev.	Date	Name	Chkcd	Appr.	Revision				
Logic					Name	Status	Pos.	Sign	Ref.
					01				
					02				
					03				
					04				
					05				
					06				
					07				
					08				
					01	OIL LANCE	IN		SEQ1-08/51
					02	OIL FLOW CONTROL	IGN. POS.		SEQ1-15/68
					11				
					12				
					13				
					14				
					15	OIL LANCE	IN	GSC-21782	DI
					16				
					17				
					18				
					01	ATOMIZING STEAM VALVE	OPEN		SEQ1-21/51
					02	AIR FLOW CONTROL	FIRING SP.		SEQ1-15/04
					03				
					22				
					23				
					24				
					25				
					26	ATOMIZING STEAM VALVE	OPEN LIMIT	GSO-21803	DI
					27				
					28	AIR FLOW	F>MIN.	FSC-21822.2	
					29				
					30				
					31				
					32				
					33				
					01	IGNITER CYLINDER	IN		SEQ1-09/58
					34				
					35				
					36				
					37				
					38				
					39				
					40	IGNITER CYLINDER	IN LIMIT	GSC-21785	DI
					41				
					42				
					43				



Säädöt

Säätöpiirien hierarkkinen jako

■ Pääsäädöt

- Pitää tehontuotannon (eli kuorman) yhtä suurena kuin hetkellinen kulutus
- Tärkein tuotantosuure on
 - sähköteho tai
 - vastapaine tai
 - lähtevän kaukolämpöveden lämpötila
- Myös tuorehöyryn paineen säätö kuuluu pääsäätöihin.

■ Stabiiloivat säädöt

- Pitävät prosessisuuret ohjearvoissaan. Kompensoi- vat häiriöiden ja kuorman- muutosten vaikutukset.
- Tärkeitä säädettäviä suureita
 - höyryn lämpötilat
 - lieriön pinta
 - syöttövesivirta
 - savukaasujen happipitoisuus.



Säädöt

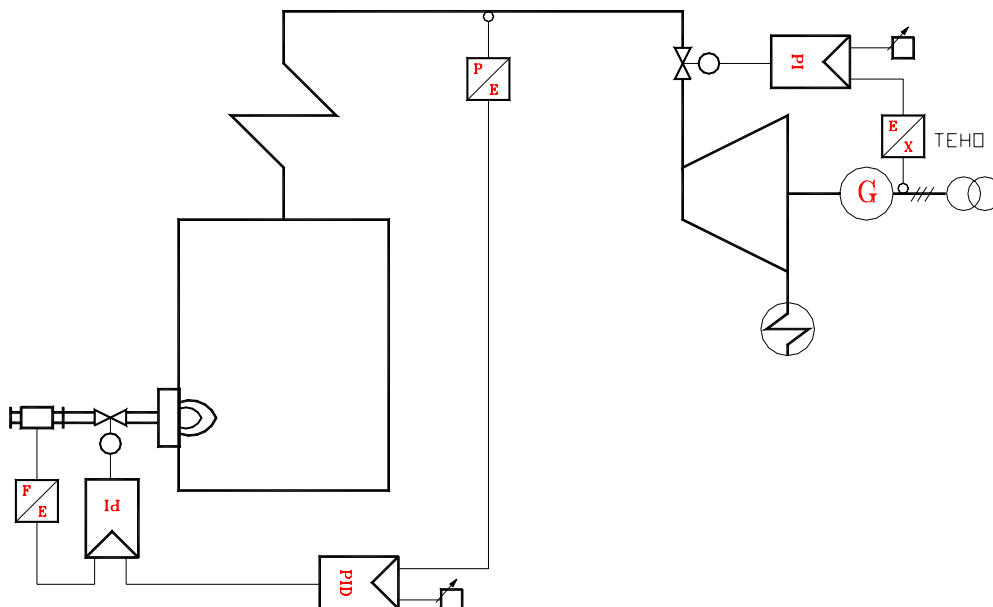
Voimalaitoksen pääsäädöt

- Voimalaitoksen pääsäätojä ovat kattilan **höyrynpainesäätö** ja **tuotantotehojen säädöt**.
- Höyryn painetta voidaan säätää joko höyryn kulutuksen puolelta turbiinin pääsäätoventtiileillä (etupainesäätö) tai höyryn tuotannon puolelta polttoaineteholla.
 - Kummassakin tapauksessa säätöön liittyy myötäkyykentä höyryvirrasta polttoaineen syöttöön.
- Sähkötehoa säädetään sillä keinolla, kumman höyryn paineen säätö jättää vapaaksi.
 - Jos höyryn painetta säädetään polttoaineteholla, niin sähkötehoa säädetään turbiinin pääsäätoventtiileillä.
 - Tämä vaihtoehto on näistä kahdesta nopeampi: jos sähkötehoa suurennetaan nopeasti, turbiini "ryöstää" hetkellisesti kattilasta enemmän tehoa, kuin sinne polton kautta tulee.



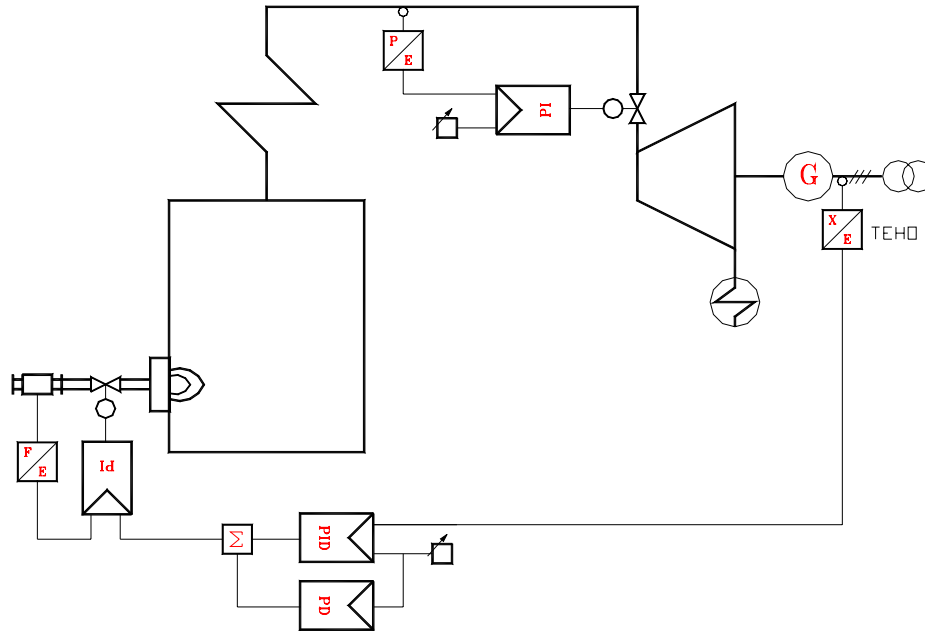
Kiinteän paineen ajotapa

Kattila seuraa ajotapa



Turbiinin etupainesäätö

Turbiini seuraa ajotapa



Turbiinin vastapainesäätö

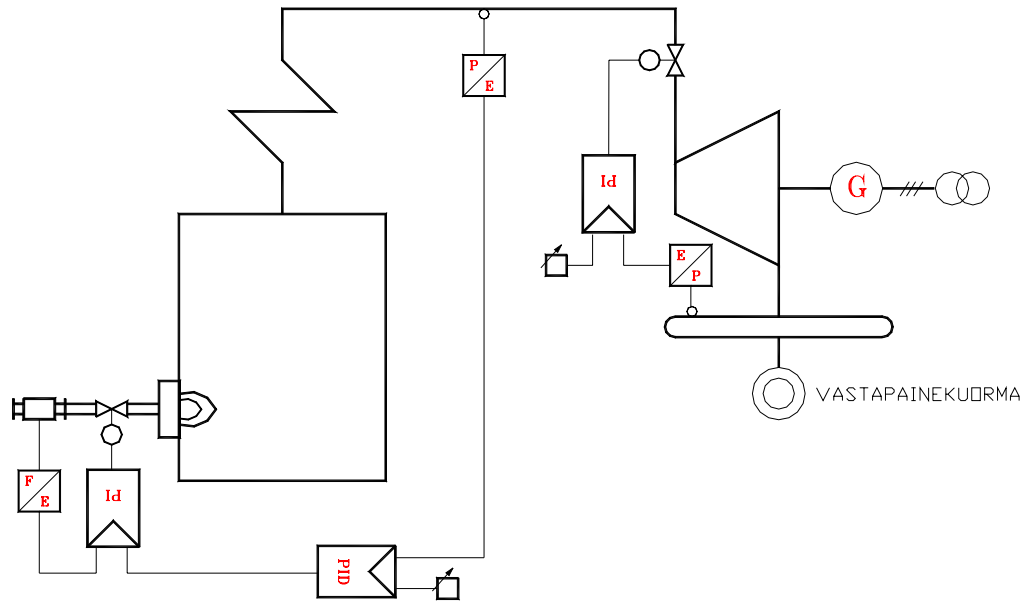
Kattila kiinteällä paineella

- Sähkötehon sijasta voidaan säätää vastapainekuormaa, esim. kaukolämpötehoa.
 - mahdollisia samat vaihtoehdot kuin sähkötehon säädössä: vastapainekuormaa säädetään siis joko polttoaineteholla tai turbiinin pääsäätöventtiileillä.
 - Sähköteho määräytyy epäsuorasti vastapainetehon kautta.
- Prosessihöyrytukkia syötetään joko turbiinin perästä, jolloin kyseessä on siis vastapainekuorma, tai turbiinin välitosta.



Turbiinin vastapainesäätö

Kattila kiinteällä paineella



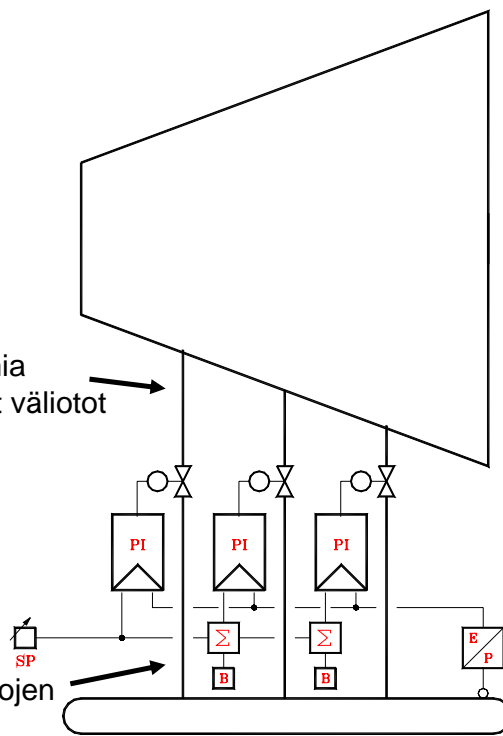
Vastapaine turbiinin väliotosta

- Väliotosta syötettävän tukin painetta säädetään väliottolinjassa sijaitsevalla säätöventtiilillä.
- Höyrytukin syöttö saattaa tulla turbiinin eri tehotasoilla eri väliotosta.
 - kutakin väliottolinjan venttiiliä kohti on yksi tukin paineen säädin.
 - säätimien asetusarvot on porrastettu siten, että pienipaineisempaan väliottoon liittyvässä säätimessä on aina hiukan ylempi tukin paineen asetusarvo



Eri kuormia
vastaavat väliotot

Asetusarvojen
porrastus



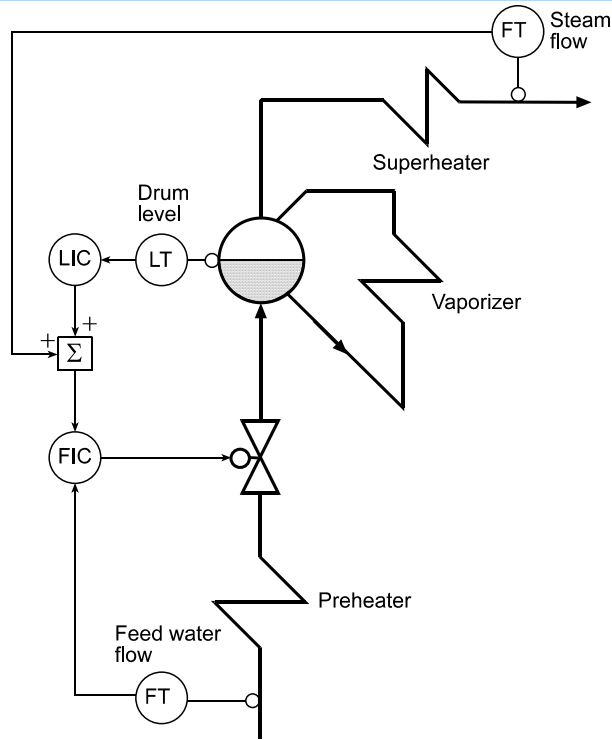
Muita tärkeitä säätöjä

Lieriökattilan lieriön pinnansäätö

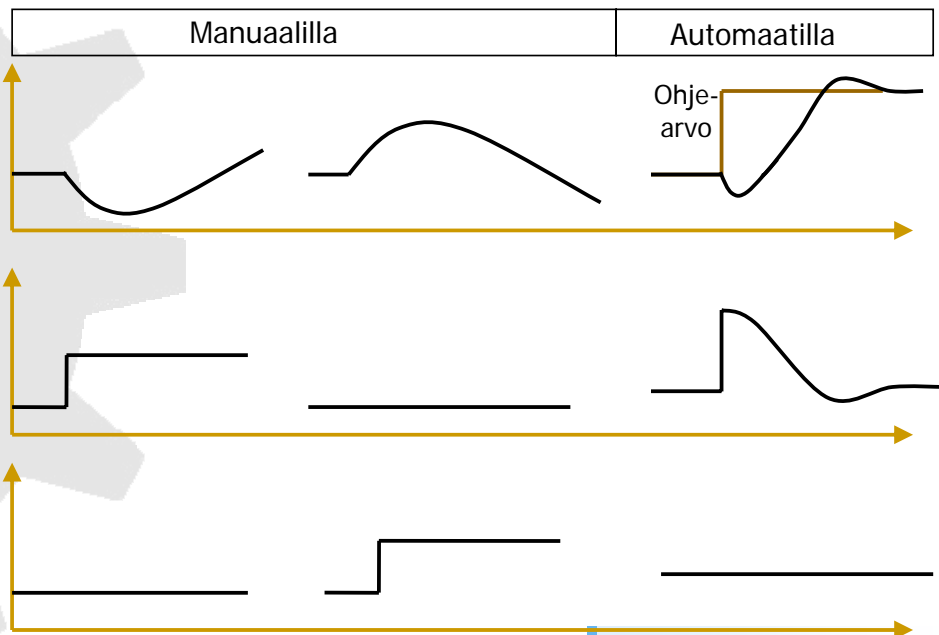
- Lieriökattilan lieriön pinnansäätö
 - Lieriön pintaa säädetään kaskadisäädöllä: lieriön pinnan säädin antaa ohjearvon alasäätimelle, joka säätelee syöttöveden ja tuorehöyryn virtauseroa (ns. kolmipistesäätö). Toimilaitteena on syöttöveden säätöventtiili tai nopeusohjattu syöttövesipumppu.



Lieriön pinnansäätö

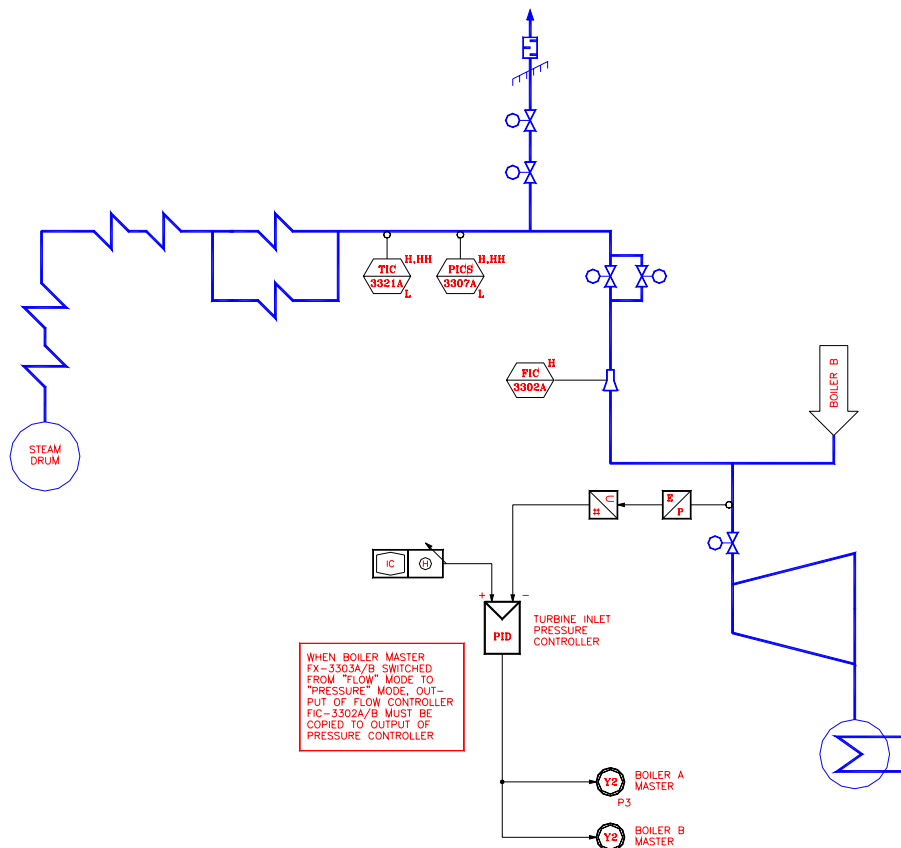


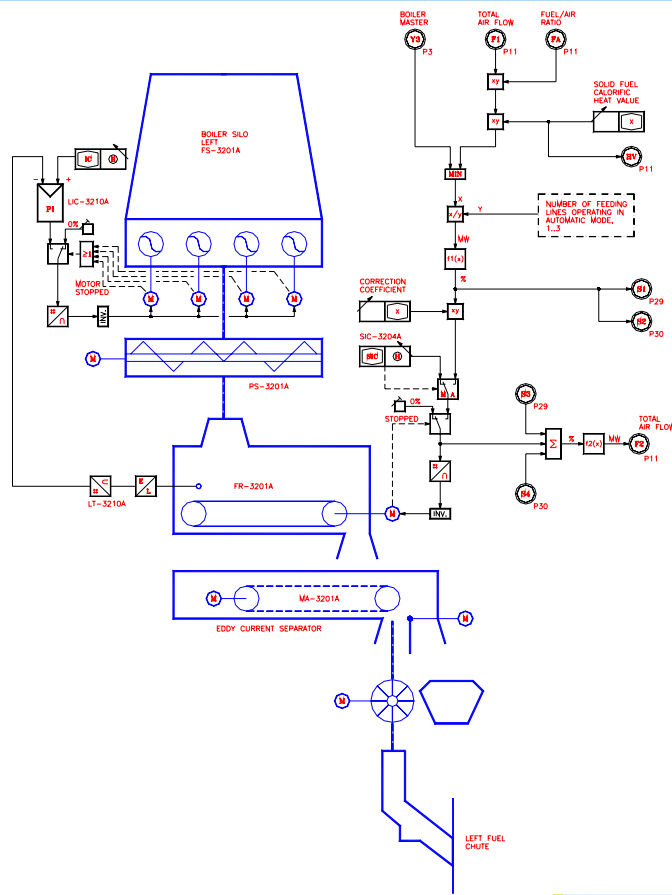
Lieriön pinnansäätö



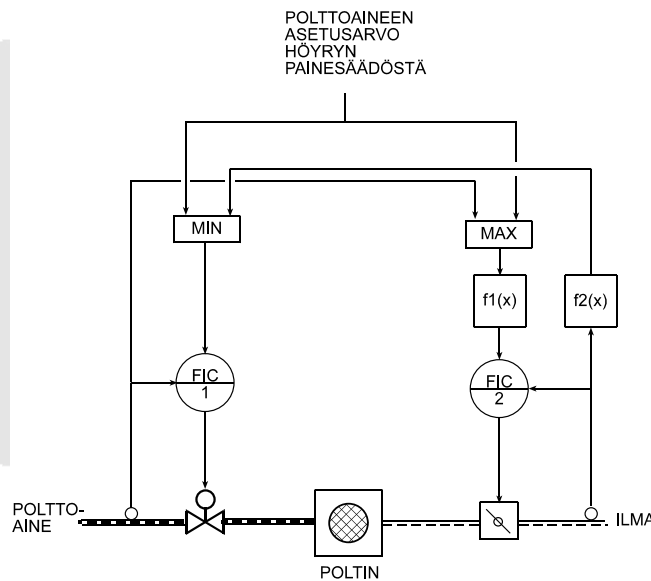
Polttoaineen ja palamisilman säätö

- Polttoaineen ja ilman säätö
 - Pääsäädin, joka on höyryn paineen säädin, sähkötehon säädin tai vastapainekuorman säädin, antaa polttoainetehon asetusarvon.
 - Polttoainetehon asetusarvo menee polttoaineen jakoon: siitä muodostetaan pääpolttoaineen ja mahdollisten tukipolttoaineiden tehojen asetusarvot ja näistä muodostetaan syöttimien nopeuksien asetusarvot.
- Polttoainetehon asetusarvosta muodostetaan myös kokonaisilmavirran asetusarvo.
 - Leijupolttokattilassa kokonaisilmavirran ohjearvo jaetaan leijuilmaan, sekundääri-ilmaan ja tertiääri-ilmaan.
 - Savukaasun happipitoisuuden säädin antaa tyypillisesti korjauksen sekundääri-ilman asetukseen.



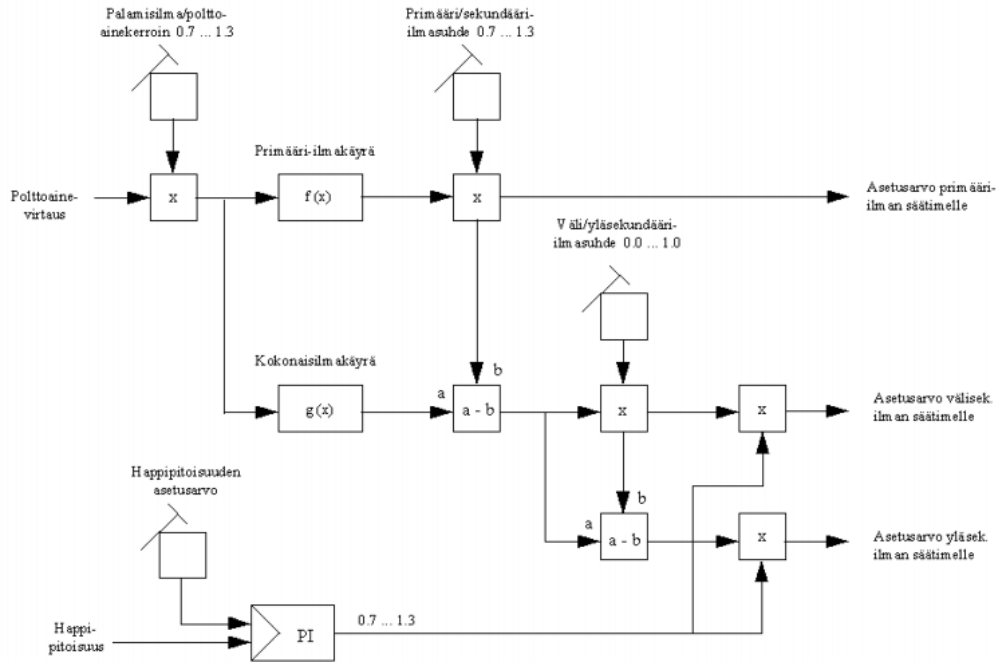


Polttoaineen ja ilman ristiinlukitus

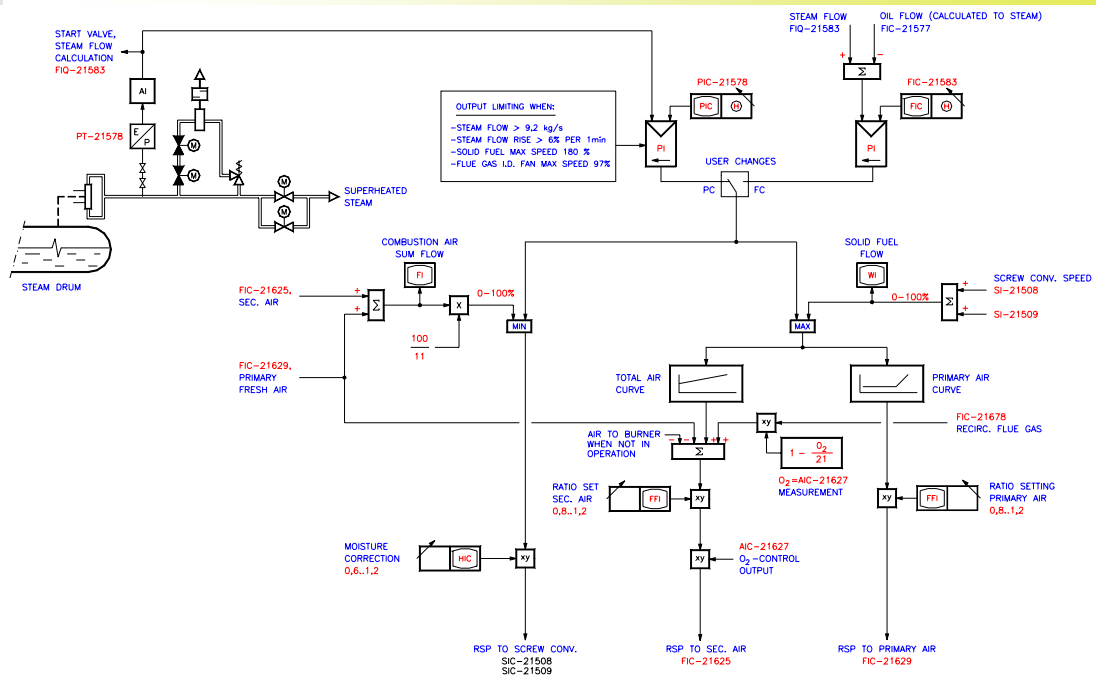


$f_1(x)$ = funktio polttoainemäärästä palamisilmamäärään
 $f_2(x)$ = funktio palamisilmamäärästä polttoainemäärään

Ilmamäärän säätö



Ilmamäärän säätö



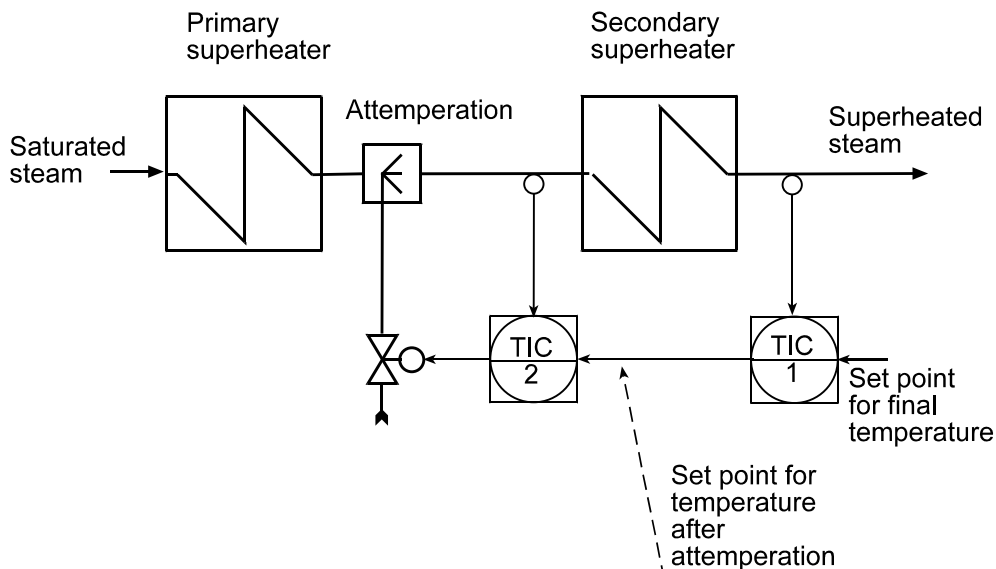
Tuorehöyryn lämpötilan säätö

■ Höyryn lämpötilojen säätö.

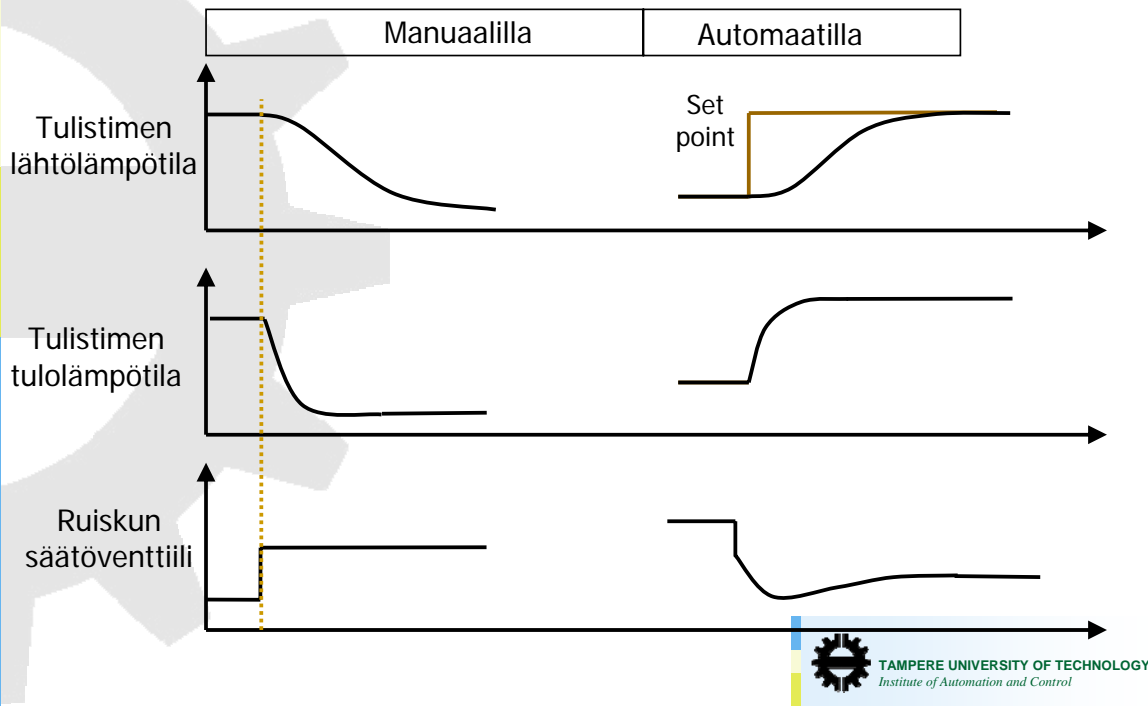
- Jotta voimalaitoksen hyötysuhde olisi hyvä, höyryn lämpötila pidetään lähellä suurinta sallittua arvoa.
- Höyryn lämpötila ei saa nousta sallittua arvoa suuremmaksi, koska yllämpö lyhentää tulistimien elinikää.
- Höyryn lämpötilan vaihtelu aiheuttaa lämpöjännityksiä, mikä myös lyhentää tulistimien elinikää.
- Nyrkkisääntö on, että höyryn lämpötilan säätö toimii hyvin, jos lämpötilan vaihteluväli on alle 10 astetta.
- Tulistimen jälkeistä höyryn lämpötilaa säädetään vesiruis-
kutuksella, joka on ennen tulistinta. Säätökytkentänä on kaskadi, jossa alasäätimen säätösuureena on ruiskutuksen jälkeinen lämpötila.



Tuorehöyryn lämpötilan säätö



Tuorehöyryn lämpötilan säätö



- Johdanto
- Automaatiolle asetettavien vaatimusten lähtökohdat
- Automaation toiminnot
- Voimalaitoksen dynamiikasta

Energian siirtyminen, muuntuminen ja varastoituminen voimalaitoksessa

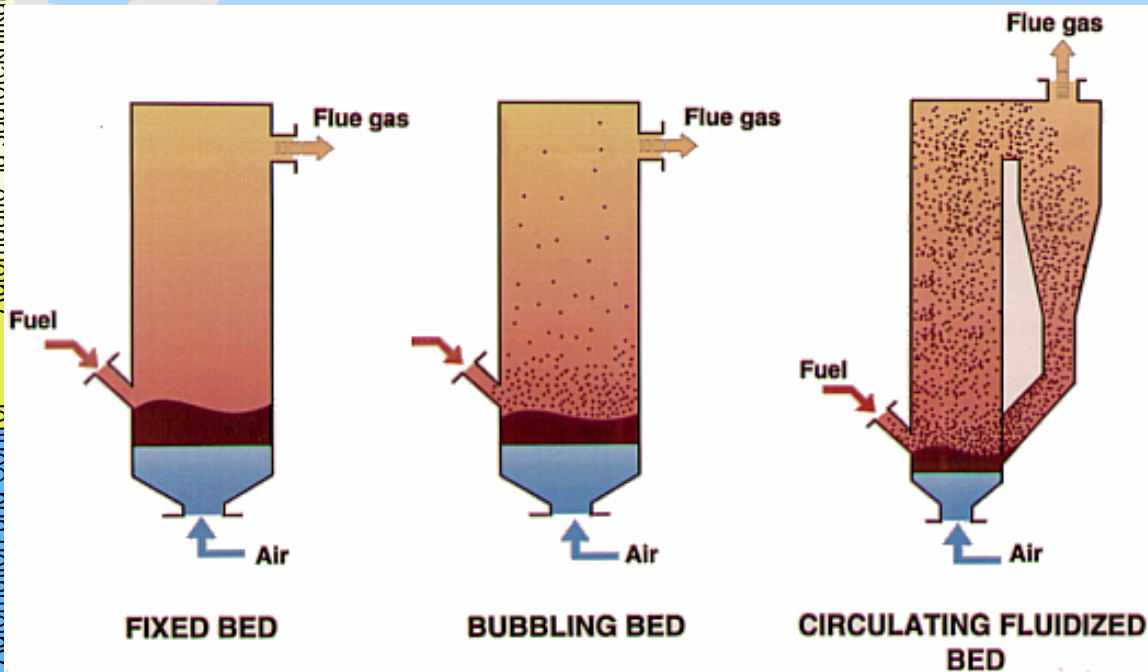
- Voimalaitos koostuu peräkkäisistä energian siirto-, muunto- ja varastoitumisprosesseista.
- Polttoaine sisältää kemiallisesti sitoutunutta energiaa.
- Polttoaineen siirto- ja jakokuljettimet syöttävät sen tulipesään, jossa palaminen muuntaa kemiallisen energian lämpöenergiaksi.
- Lämpöenergia siirtyy höyrystimessä ja tulistimissa vesihöyrypiiriin.
 - Tämä siirtyminen tapahtuu säteilyn, konvektion ja johtumisen kautta.
- Höyry kuljettaa energian turbiiniin, joka muuntaa energian mekaaniseksi.
- Turbiinin akseli siirtää mekaanisen energian generaattoriin, joka muuntaa energian sähköiseksi.



Energian siirtyminen, muuntuminen ja varastoituminen voimalaitoksessa

- Voimalaitosprosessi sisältää useita energiavarastoja, joiden sisältämä energia muuttuu tehonmuutoksissa. Näiden muuttuvien energiavarastojen takia voimalaitos on dynaaminen prosessi.
- Polttoainesiiilot ovat ilmeinen energiavarasto.
 - Niiden tarkoituksena on olla puskurina siltä varalta, että polttoaineen siirtojärjestelmässä tapahtuu häiriö.
- Leijupetiin varastoituu palamatonta polttoainetta.
 - Kivihiilen poltossa tämä varasto on suhteellisen suuri, koska kivihiilimurska palaa hitaasti esim. turpeeseen verrattuna.
- Leijupeti on myös lämpöenergian varasto, joka muuttuu, jos pedin lämpötila muuttuu.





Energian siirtyminen, muuntuminen ja varastoituminen voimalaitoksessa

- Höyrystin on suuri energiavarasto.
 - Höyrystimessä kiertää kylläistä vettä ja höyrykuplia. Siinä tapahtuu siis kaksifaasivirtausta ja siksi sen mallintaminen on suhteellisen hankalaa.
- Höyrystintä voidaan pitää eräänlaisena höyryakkuna, josta vapautuu energiaa, kun paine laskee.
- Paineen laskiessa tapahtuu useita ilmiöitä:
 - höyrystymislämpötila laskee jolloin höyrystys lisääntyy ja sen myötä höyrystimen lämpötila laskee,
 - vesi-höyryseoksen höyrypitoisuus kasvaa ja sen myötä tilavuus kasvaa,
 - lieriön pinnankorkeus nousee
 - pinnankorkeuden säätö pienentää syöttövesivirtausta,
 - höyrystimessä olevan vesihöyryseoksen massa vähenee ja sen myötä energia vähenee,
 - höyrystymislämpö suurenee,
 - veden tiheys suurenee.



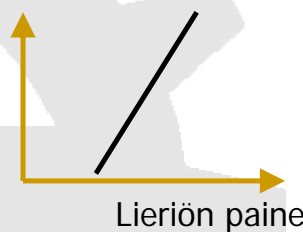
Energian siirtyminen, muuntuminen ja varastoituminen voimalaitoksessa

- Tulistimien energia muuttuu paineen funktiona.
 - Paineen kasvaessa tulistimissa olevan höyryn massa lisääntyy. Samalla energia lisääntyy, sillä energia on sitoutunut massaan.
- Höyrystimen ja tulistimien putkimateriaali on lämpövarasto, joka muuttuu, kun materiaalin lämpötila muuttuu.
 - Materiaalin lämpötila seuraa suurin piirtein putken sisällä virtaavan veden lämpötilaa.
- Käynnistyksen aikana turbiinin ja generaattorin roottori on muuttuva liike-energian varasto.
- Kun generaattori on verkkoon tahdistettuna, pyörimisnopeus on vakio, eikä roottorin liike-energia muutu.

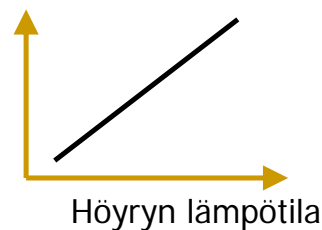


Kattilan muuttuvat energiavarastot

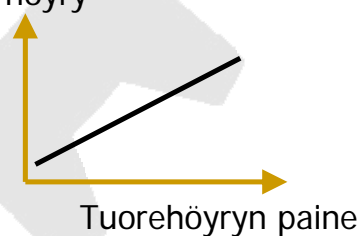
Höyrystimen höyry-vesiseos



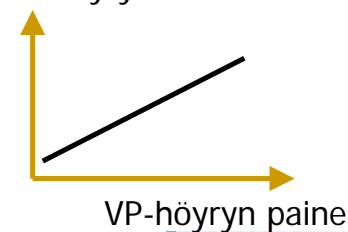
Tulistimen ja höyrylinjojen metalli



KP-tulistimissa ja KP-höyrylinjoissa oleva höyry



Välitulistimissa ja VP-höyrylinjoissa oleva höyry



Tyypillisiä dynaamisia kokeita

Tuotantoyksikön askelvastekoe

- Kokeen tarkoitus on osoittaa, miten nopeisiin tehonmuutoksiin tuotantoyksikkö kykenee.
 - Kaikki säätöpiirit ovat automaattilla.
 - Sähkötehon ohjearvoa muutetaan askelmaisesti esim. 10% nimellistehosta.
 - Arvioidaan sähkötehon vasteen nopeutta sekä havaitaan höyryn paineen ja tulistustilapötilöjen heilahdus.



Termisen hitauden määrittämiskoe

- Kokeen tarkoitus on määrittää, millainen on prosessin dynamiikka ilman säätöjä. Tätä tietoa tarvitaan tehonsäädön suunnittelussa ja virittämisessä.
 - Sähkötehon säätö ja höyrynpaineen säätö ovat käsiohjauksella (eli pois päältä).
 - Polttoaineen syöttöä muutetaan askelmaisesti esim. 10% nimellistehoa vastaavasta arvosta.
 - Tuloksena ovat sähkötehon ja höyrynpaineen vasteet.
- Jos höyryn painetta säädetään turbiiniventtiileillä, koe on mahdollista tehdä myös niin, että höyryn painesäätö on päällä.



Höyrykapasiteetin määrittäminen

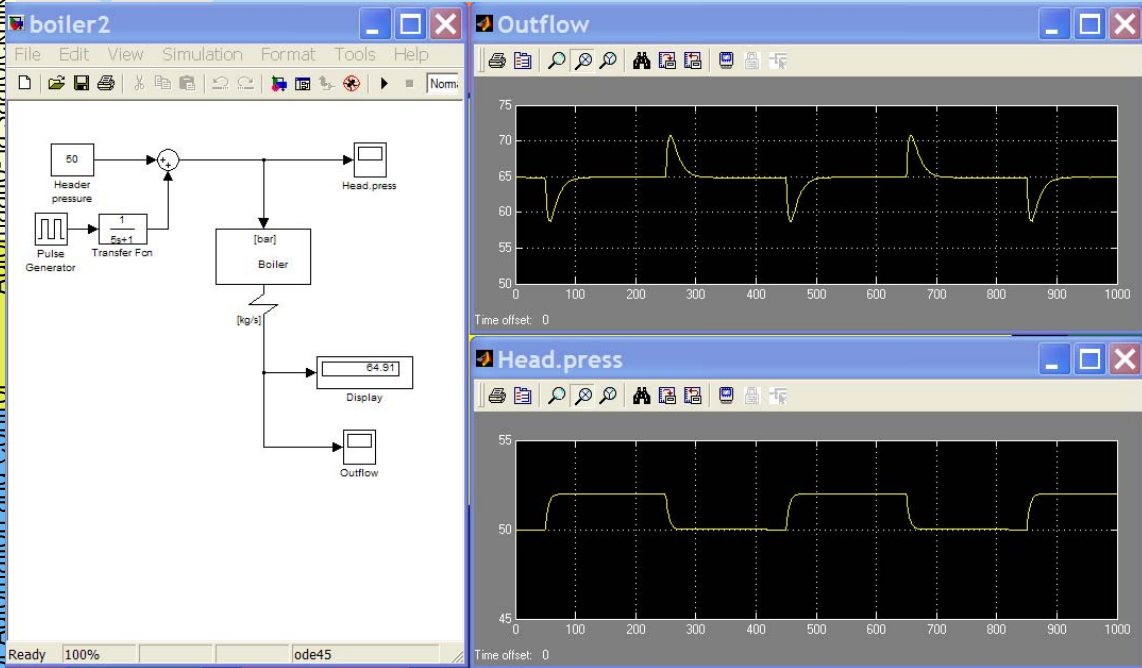
- Kokeen tarkoitus on määrittää, miten kattilan höyry- ja energiavarasto muuttuu paineen funktiona. Tätä tietoa tarvitaan tehonsäädön suunnittelussa ja virittämisessä.
 - Sähkötehon säätö ja höyrynpaineen säätö ovat käsiohjauksella.
 - Turbiinin pääsäätöventtiilien asentoa muutetaan askelmaisesti.
 - Höyrynpaineen ja höyryvirran vasteista määritetään kattilan höyrykapasiteetti.



Höyrykapasiteetin määrittäminen

- Kokeessa tapahtuu seuraavaa.
 - Koska polttoaineen syöttö pysyy vakiona, on kattilan energiantuotto vakio.
 - Kun turbiinin pääsäätöventtiilejä avataan, kattilasta lähtevän höyryn entalpiavirta kasvaa heti uuteen arvoon ja alkaa sitten hitaasti vähetä kohti muutosta edeltänyttä arvoa.
 - Höyrynpaine pienenee tasaisesti ja asettuu lopulta vakioksi.
 - Niin kauan kuin entalpiavirta on suurempi kuin ennen muutosta, kattilan energia vähenee.
 - Kattilan energiakapasiteetti on kattilan energian muutoksen suhde paineen muutokseen





$$C_E = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (h(t)q_m(t) - h(t_1)q_m(t_1))dt}{p(t_2) - p(t_1)}$$

- C_E kattilan energiakapasiteetti
- q_m höyryn massavirta
- h höyryn ominaisentalpia
- p höyryn paine
- t aika.

Sikäli kuin höyryn ominaisentalpia on likimain vakio, voidaan määrittää kattilan höyrykapasiteetti C_h , joka on kattilassa olevan veden ja höyryn massan muutoksen suhde paineen muutokseen.

$$C_h = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (q_m(t) - q_m(t_1))dt}{p(t_2) - p(t_1)}$$

Avoimen termodynaamisen prosessin dynaamiset taseet

Massatase

- Olkoon m järjestelmän sisältämä massa ja $\sum q_m$ järjestelmän kontrollipinnan läpi kulkevien massavirtojen summa. Avoimen järjestelmän massatase on silloin

$$\frac{d}{dt}m = \sum q_m$$



Energiatase

- Järjestelmän energia E koostuu liike-energiasta E_k , potentiaallenergiasta E_p ja sisäisestä termisestä energiasta U .

$$E = E_k + E_p + U$$

- Voimalaitoksen prosesseissa sisäenergia U on niin hallitseva, että liike-energia ja potentiaalienergia voidaan usein jättää huomiotta.



Energiatase

- Ainevirran mukana siirtyvää energiaa kuvataan suurella energiavirta q_E . Se voidaan lausua kontrollipinnan läpi virtaavan aineen ominaisenergian ε ja massavirran q_m avulla.

$$q_E = \varepsilon q_m$$

- Mekaaniset tehot voidaan jakaa hydrauliseen teho P_h ja muihin mekaanisiin tehoihin P_m . Hydraulinen teho on

$$P_h = pAw = \frac{p}{\rho} q_m$$

- p , w ja ρ ovat virtaavan aineen paine, virtausnopeus ja tiheys. A on virtauspoikkipinta.



Energiatase

- Olkoon $\sum q_e$ energiavirtojen summa, $\sum \Phi$ lämpötehojen summa, $\sum P_h$ hydraulisten tehojen summa ja $\sum P_m$ muiden mekaanisten tehojen summa. Avoimen järjestelmän energiatase on silloin

$$\frac{d}{dt} E = \sum q_E + \sum \Phi + \sum P_h + \sum P_m$$

- Usein saadaan riittävä tarkkuus käyttämällä sisäenergiaa U kokonaisenergian E sijasta. Silloin

$$\frac{d}{dt} U = \sum q_U + \sum \Phi + \sum P_h + \sum P_m$$

