

# Integroitujen energiantuotantomenetelmien dynaaminen mallintaminen

Mikko Jegeroff, Hannu Mikkonen, Matti Tähtinen  
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Jyväskylä, Finland  
Mikko Jegeroff, +358 40 5816512, [Mikko.Jegeroff@vtt.fi](mailto:Mikko.Jegeroff@vtt.fi)

AVAINSANAT Apros, aurinkokenttä, CFB, CSP, hybridivoimalaitos

## TIIVISTELMÄ

Aurinkoenergian hyödyntäminen tulee kasvamaan entisestään tulevaisuudessa. Ratkaiseva syy kasvuun on uusiutuvan energian taloudellisuus, ympäristöystävällisyys ja keräintekniikoiden kehittyminen. Uusiutuvan energian osuuden kasvu tulee vaikuttamaan perinteisten voimalaitosten toimintaan ja rooliin energiantuotannossa. Erilaisten energiantuotantoon keskittyneiden kombinaatioiden hyödyntäminen tulee ajankohtaisiksi. Tällaisten tuotantomenetelmien kehittäminen vaatii paljon tutkimus- ja kehitystyötä ja siten tarkasteluihin sopivat tehokkaat menetelmät ja työkalut. Tässä paperissa on esitelty yksi integroitu energiantuotantomenetelmä. On onnistuneesti mallinnettu ja yhdistetty CFB- kattila (Circulated Fluidized Bed) ja CSP- aurinkokenttä (Concentrated Solar Power). Paperissa integroitujen energiantuotantoprosessien dynaaminen tarkastelu ja mallikehitys on tehty Apros- ympäristössä.

## 1 JOHDANTO

Aurinko- ja tuulienergian tuotannolle on tunnusomaista epäsäännöllinen ja jaksoittainen energiantuotanto. Näiden ominaisuuksien vuoksi esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimaan perustuvat energiantuotantomuodot tarvitsevat rinnalleen energiantuotantovaihtoehdon jolla voidaan turvata tarvittava sähkön- ja lämmöntuotanto olosuhteista riippumatta. Energiatuotantomuotojen yhdisteleminen vaatii huolellista suunnittelua ja optimointia. Optimaalisten yhdistämispisteiden ja säätöjen löytäminen energiantuotantomuotojen yhdistämisessä on iso haaste.

Aurinkokentälle simuloidaan vuorokauden mittainen datasarja auringon liikkeistä ja sen säteilemästä energiasta. Näin voidaan nähdä kuinka aurinkokentän ja voimalaitoskattilan välinen yhteiskäyttö toimii. Simulointien perusteella osamallit ja kokonaisuusmalli toimivat hyvin.

## 2 MALLINNUSYMPÄRISTÖ

### 2.1 Apros- mallinnusympäristö

Energiantuotantomuotojen mallinnuksessa ja integroinnissa on käytetty Apros- mallinnusympäristöä. Mallinnusalustaksi kyseiseen tehtävään valikoitui Apros- mallinnusympäristö sen kattavien ja monipuolisten perusvalmiuksien vuoksi. Näitä perusvalmiuksia ovat muun muassa toimilaittekirjastot jotka tarjoavat paljon suoraan hyödynnettäviä laitteita mallinnukseen.

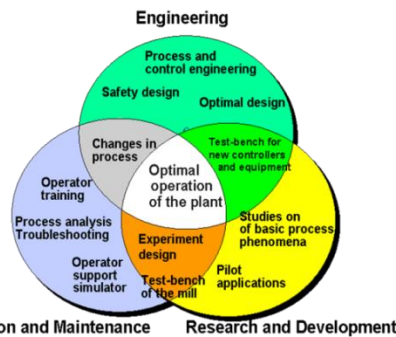
Apros soveltuu monenlaiseen muuhunkin prosessien mallinnukseen ja simulointiin. Ympäristöä käytetään muun muassa perinteiseen tekniikkaan perustuvien voimalaitosten, ydinvoimaloiden ja sellu- ja paperiteollisuuden prosessien mallinnukseen, simulointiin ja tarkasteluihin. Prosessien mallintamisen lisäksi automaation ja sähköistyksen mallintaminen onnistuu Apros- ympäristössä /1/.

Prosessien yksikköprosessit ja niiden väliset virtaukset, säätöpiirit ja ohjaukset sekä prosessien toiminnan kannalta oleelliset laskennat sisältyvät Apros- mallinnusympäristöön. Apros perustaa fysikaalisen kuvauksensa aineen-, liikkeen- ja lämmönsiirron yhtälöihin. Kuvassa 1 esitettyjen yhtälöiden mukaisesti laskenta perustuu fysikaalisiin periaatteisiin ja empiirisiin korrelaatioihin /2/.

- Continuity equation:  $\frac{\partial A\rho}{\partial t} + \frac{\partial A\rho v}{\partial z} = 0$ 
  - A = cross-sectional area of flow
  - $\rho$  = density of running material
  - t = time
  - v = stream velocity
  - z = co-ordinate of flow direction
- Linear momentum:  $\frac{\partial A\rho v}{\partial t} + \frac{\partial A\rho v^2}{\partial z} + \frac{\partial A\rho p}{\partial z} = AF + A\rho g \cos\theta$ 
  - p = pressure
  - F = friction loss
  - g = gravitation induced acceleration
  - $\theta$  = angle between direction of flow and gravitation vector
- Energy equation:  $\frac{\partial A\rho H}{\partial t} + \frac{\partial A\rho H v}{\partial z} = \frac{\partial AD}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z}$ 
  - H = total enthalpy
  - D = coefficient of diffusion

Kuva 1. Aproksen laskenta perustuu fysikaalisiin ja empiirisiin korrelaatioihin

Mallinnusympäristö mahdollistaa hyvin monipuolisen prosessien suunnitteluun, kehittämiseen, tutkimiseen, optimointiin ja kunnossapitoon liittyvän tarkastelun. Kuvassa 2 on esitetty Aproksen soveltuvuus erilaisiin käyttötarkoituksiin.



Kuva 2. APROKSEN soveltuvuus erilaisiin käyttötarkoituksiin.

Apros- ympäristöön rakennettu mallinnusalausta tarjoaa työkalun tarkastella ja edelleen kehittää muun muassa uusiutuvan energian tuottamista yhdessä perinteisen voimalaitoksen kanssa. Mallinnusalausta soveltuu erinomaisesti tutkimuksessa tarkasteltujen ja mallinnettujen prosessien säätö- ja automaatio suunnitteluun.

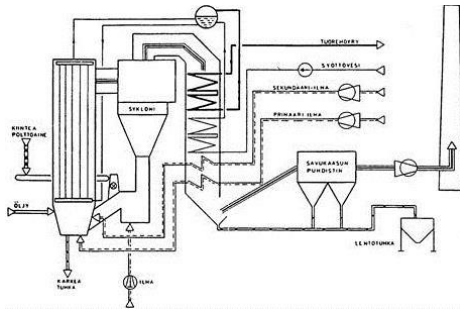
Tässä tutkimuksessa mallinnusympäristöllä toteutetut simuloinnit antavat arvokasta tietoa yhdistetyn energiantuotannon vaikutuksista voimalaitoskattilan dynamiikkaan ja säätöjen toteutukseen. Yleensä tuotantoprosessien simuloinneissa tärkeitä tarkasteltavia asioita ovat tyypilliset prosessin käyttötilanteet, muun muassa laitoksen ylösajot, alasajot, kuormanmuutokset, polttoaineen laadunvaihtelut ja näiden yhteisvaikutukset.

Mallin simuloimiseen käyttöliittymä tarjoaa hyvän ja havainnollisen tavan. Mallin antamia vasteita ja prosessissa tapahtuvia ilmiöitä voidaan seurata simuloinnin edetessä joko numeerisina arvoina tai trendikuvaajina. Kaikki simuloinneissa syntyvä data voidaan määrittää tallennettavaksi jatkotarkasteluja varten. Muun muassa simulointiaikaa, trendinäyttöjä, säädinten asetusarvoja, säädinten parametreja ja prosessilaitteiden käyntitietoja voidaan muuttaa simuloinnin aikana /3/.

## 2.2 Mallinnettu CFB- kattilalaitos

Mallinnettu energiantuotantomuotojen yhdistämissovellus on CFB- kattilatekniikkaan perustuvan voimalaitoksen (sähköteho 430 MW) ja CSP- aurinkokentän yhdistelmä. CFB- polttotekniikan tärkein etu on sen soveltuvuus hyvinkin heikkolaatuisesta polttoaineesta toteutettavaan energiantuotantoon. Tekniikka on laajasti käytössä teollisuudessa. Kuva 3 esittää mallinnetun CFB- kattilalaitoksen perusrakenteen /4/.

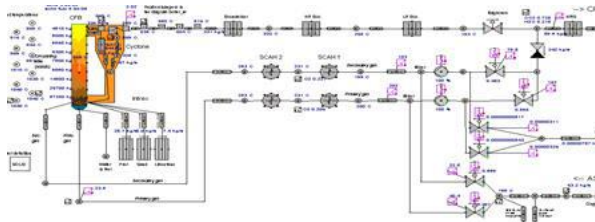
CFB:n tulipesän perusilmiöt liittyvät polttoainepartikkeleiden leijutukseen primääri-, sekundääri-, ja tertiääri-ilmojen avulla. Polttoaine syötetään tulipesän alaosaan jossa ilmat aloittavat polttoaineen kuljettamisen kohti tulipesän yläosaa. Matkalla polttoaine partikkelit palavat. Palamaton jae kierrätetään takaisin tulipesän alaosaan. Savukaasu ja hienojakoisin tuhka jatkaa matkaa sykloneille ja erilaisille savukaasun puhdistimille ja lämmönvaihtimille ennen piipun kautta ulos siirtymistä. Pääosa tuhkasta laskeutuu petiin ja poistetaan arinan alta /5/.



Kuva 3. CFB- polttotekniikkaan perustuvan voimalaitoksen pääkomponentit.

Mallinnetun voimalaitoksen höyryn arvot ovat 560 °C ja 275 bar. Mallinnetun voimalaitoksen polttoaine on bituminen hiili jonka kosteuspitoisuus on 14 – 16 %. Kattilan höyrystys on mallinnettu läpivirtausmenetelmällä jolloin ei ole lieriön kautta takaisinkiertoa vaan kaikki vesi menee kattilan läpi vain kerran samalla höyrystyksen. Kattilalaitosmallin syöttövesilinja sisältää matala- ja korkeapaine esilämmitykset, syöttövesipumpun ja säiliön sekä kaikki tarvittavat lämmönvaihtimet ja ruiskutukset höyryn tulistamiseksi haluttuihin arvoihin. Turbiinialue on mallinnettu kolme vyöhykkeiseksi höyryn painetason mukaan.

Mallinnettu voimalaitosprosessi sisältää kaikki toimilaitteet ja säätimet polttoaineen, veden, höyryn, ilman ja savukaasun säätöihin. Näin malli mahdollistaa kuormanmuutokset, höyryarvojen ja sähköntuotannon vakioimisen ja aurinkokentän tuomien muutosten tasapainottamisen säätöpiirien avulla. Kuvassa 4 on esitetty yleisluonteinen kuva mallinnetun CFB- kattilalaitoksen päävirtauksista.

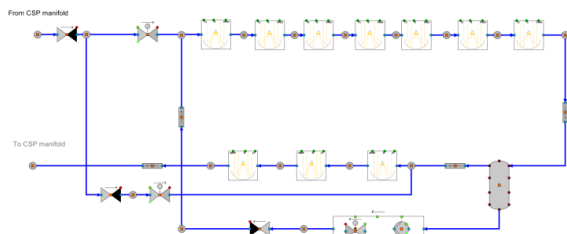


Kuva 4. Mallinnetun CFB- kattilalaitoksen kaavioesitys.

### 2.3 Mallinnettu aurinkokenttä

Mallinnettu aurinkoenergian keruumenetelmä on tyypiltään parabolinen peilikeräin -aurinkokenttä. Aurinkokenttämalli sisältää säämoduulin ja kaksi osaisen aurinkokentän. Aurinkomoduli laskee auringon säteilyn ja suunnan. Erillinen laskenta moduuli optimoi sekä laskee peilien asentoa ja tehollista säteilyä keräimelle. Kuvassa 5 näkyy kaavioesitys aurinkokentästä ja sen pääelementeistä.

Ensimmäinen sarja aurinkokeräjiä esilämmittää ja höyrystää aurinkokenttään syötetyn veden. Tämän jälkeen virtaus johdetaan höyryn erotus lieriöön. Erotettu höyry johdetaan aurinkokentän tulistinosalle. Aurinkokentältä ulostulevan höyryn lämpötila säädetään jatkojohdyntämisen kannalta optimaalisimmalle mahdolliselle tasolle. Lieriöllä höyrystä erotettu vesi johdetaan esilämmitys vyöhykkeelle säätämään syöttöveden lämpötilaa.

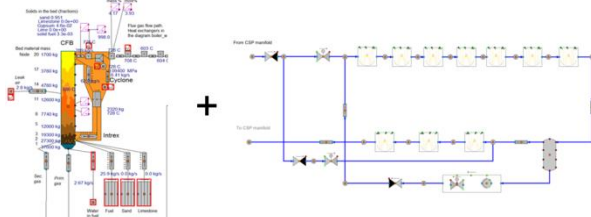


Kuva 5. Mallinnetun aurinkokenttämallin kaavioesitys.

### 2.4 Mallinnettu voimantuotantokombinaatti

Toteutetussa versiossa energiantuotantomenetelmien yhdistely on toteutettu siten, että syöttövesi aurinkokentälle on otettu CFB- kattilalaitoksen lauhduttimelta ennen veden uudelleen lämmitystä. Tällöin veden lämpötila on verrattain alhainen. Malli ei tässä vaiheessa sisällä energiavarausta tasapainottamaan ja nopeuttamaan muutoksia aurinkokentän tuotannon ja voimalaitoskattilan välillä.

Aurinkokentältä palaava höyryvirta on liitetty CFB- kattilan syöttöveden esilämmitykseen korvaamaan turbiinin välioton virtausta. Tässä on esitetty vain yksi tapa integroinnin toteuttamiseen. Kuvassa 6 on esitetty yhdistetyt energiantuotantoprosessit.



Kuva 6. CFB-kattila ja aurinkokenttä on integroitu onnistuneesti APROS-ympäristössä.

### 3 TULOKSET

Prosessien toimivuuden, toiminnallisuuden, dynamiikan ja niissä syntyvien ilmiöiden vuoksi on prosessien mallintaminen monestakin näkökulmasta järkevää ja hyödyllistä. Mallintaminen vaatii kuitenkin siihen soveltuvan ympäristön ja ennen kaikkea, laajaa ymmärrystä mallinnettavasta kohteesta. Mallin testaaminen tapahtuu simuloimalla mallia ja vertaamalla saatuja vasteita teoreettisiin arvoihin tai jos kyseessä on olemassa oleva prosessi niin sen antamiin todellisiin vasteisiin. Paperissa esitettyä hybridimallia on kattilalaitoksen osalta voitu tarkastaa oikean datan pohjalta.

Tavallisesti dynaamiset simulointitarkastelut sisältävät prosessille tyypillisiä muutostilanteita, kuten yksittäisten prosessimuuttujien askelmaisia muutoksia, kokonaisprosessin kuormanmuutoksia ja erilaisia häiriötilanteita sekä ilman prosessin säätöjä että niitä käyttäen. Tällaisilla kokeilla voidaan tehdä johtopäätöksiä muun muassa vasteiden realistisuudesta ja säätöjen toimivuudesta. Esiteltyä mallia on testattu simulointikokein molemmissa edellä mainituissa tapauksissa.

Ensimmäisessä vaiheessa on simuloitu CFB- kattilalaitosta ja analysoitu sen antamia vasteita. Näin on voitu varmistua kattilalaitoksen mallinnuksen onnistumisesta ja rajata sen mahdollisesti tuomien epätarkkuuksien vaikutus hybridimallin antamista vasteista. Kattilalaitoksen säätöjen tavoite on saavuttaa niin tasainen ja tehokas energiantuotanto kuin mahdollista. Säätöjärjestelmän pitää reagoida mahdollisimman nopeasti kuormanmuutoksiin, prosessihäiriöihin ja esimerkiksi polttoaineen laadunvaihteluihin. Simuloimalla tehtyjen kokeiden perusteella CFB- kattilalaitos toimii hyvin sekä dynaamisten vasteiden että säätöjen näkökulmista.

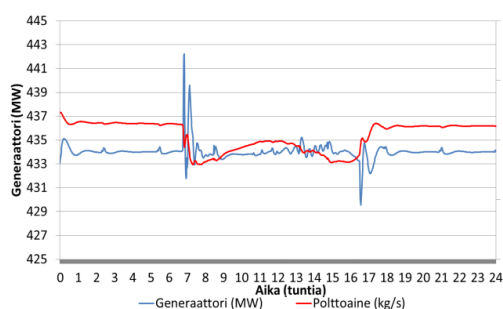
Paperissa esitetyissä tarkasteluissa simulointeja on tehty vain yhdellä kuormatasolla. Perusteellisemmassa tutkimuksessa on tarpeen selvittää ilmiöitä useammalla kuormatasolla jolloin saadaan tietoa muun muassa prosessin lineaarisuuksista.

Hybridivoimalaitoksen näkökulmasta tarkasteltuna on hyvä huomata CFB- kattilalaitosta mallinnettaessa hiilivarannon vaikutus prosessin tehon dynamiikkaan. Hiilipolttoaineella toimiva kattila luo suuren hiilivarannon tulipesään joka tasaa polttoprosessia polttoaineen syöttöongelmissa ja polttoaineen laadun vaihdellessa. Hiilivarannon hyödyntäminen hybridivoimalaitoksen käytöhallinnassa voisi olla myös yksi mahdollisuus hyödynnettäväksi erilaisten dynamiikoiden omaavien prosessien optimaalisessa yhdistämisessä.

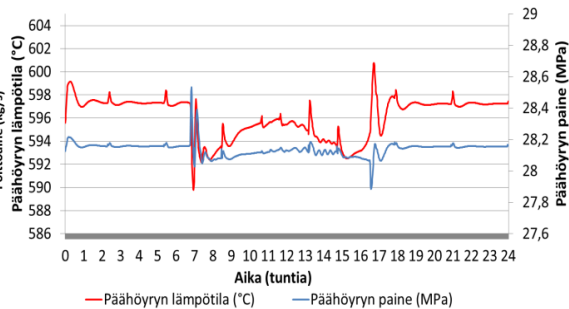
#### 3.1 Tulosten tarkastelu

Tässä paperissa on esitelty yksi integroitu energiantuotantomenetelmä. On mallinnettu ja yhdistetty CFB- kattila ja aurinkokenttä. Mallinnettu hybridivoimalaitos on toteutettu kattilalaitoksen säätöjen osalta perinteisten säätömenetelmien mukaan. Kokonaisprosessin simulointikokeet sisältävät kuormanmuutoskoikeita.

Aurinkokentällä simuloidaan vuorokauden mittainen datasarja auringon liikkeistä ja sen säteilemästä energiasta. Kuvat 7 ja 8 esittävät yhden vuorokauden kestäneen simulointijakson pääprosessimittausten antamat arvot ja niiden antamat vasteet. Tulosten mukaan voidaan nähdä, että aurinkokentän ja voimalaitoskattilan välinen yhteiskäyttö toimii. Säädöt toimivat oikein ja prosessi-ilmiöt vaikuttavat realistisilta.



Kuva 7.



Kuva 8

Kuvassa 7 on esitetty simuloitu hybridivoimalaitoksen generaattorin energiantuotanto (MW) ja polttoaineen massavirta (kg/s). Kuvassa 8 on simuloitu hybridivoimalaitoksen päähöyryn lämpötila (°C) ja paine (MPa).

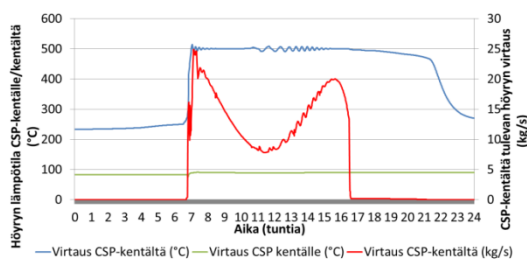
Mitä voimakkaammin aurinko paistaa, sitä suuremman osuuden aurinkokenttä ottaa energiantuotannossa. Tämän voi todeta kuvasta 9 jossa aurinkokentältä tulevan höyryn määrä kasvaa nopeasti. Ilmiö on havaittavissa myös käänteisesti. Auringon laskiessa höyryn virtaus aurinkokentältä laskee. Vuorokauden edetessä voi huomata kuinka aurinkokenttä alkaa tuottaa voimalaitoskattilalle höyryä yhtäkkisesti, tuotanto myös lakkaa yhtäkkisesti. Syynä tähän on tämän hetkinen säätömenetelmä jossa höyryä aletaan ottaa kattilalle vasta kun aurinkokenttä kykenee tuottamaan riittäväillä ominaisuuksilla olevaa höyryä.

Integrointi aurinkokentän ja CFB- kattilan välillä on toteutettu tässä mallissa siten, että höyryn paine- ja lämpötilatasojen täytyy olla riittävät jotta sitä voidaan hyödyntää yhteistuotannossa. Laitosten integroinneissa voi toteuttaa myös tapoja joissa integrointia toteutetaan useassa kohdassa. Kyseeseen voi tulla matalampi paineisen ja lämpötilaisen höyryn hyödyntäminen.

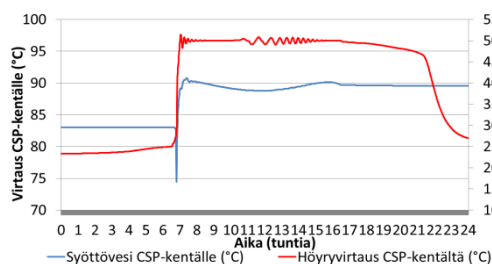
Yhden vuorokauden kestäneen simulointijakson pääprosessimittausten antamat arvot on esitetty kuvissa 9 - 11. Pääsäätimen asetusarvo jolla asetetaan haluttu sähköntuotannon määrä, on pidetty vakiona. Energian tuotanto on pysynyt päivällä suhteellisen vakiona. Sitä on säädetty polttoaineen syötöllä (Kuva 7). Pääsädin ohjaa samalla kattilan syöttöveden virtausta ja turbiinalueelle menevän höyrynpainetta. Muutosten vaikutus näkyy hieman höyryn paineessa, mutta höyryn lämpötila pysyy hyvin asetetulla tasolla (Kuva 8). Energiantuotannossa tapahtuu värähtelyä kun korkeapainevälitöthöyryn virtausta suljetaan ja aurinkokenttä alkaa syöttää höyryä esilämmittimelle (Kuva 7). Sama ilmiö tapahtuu päinvastoin kun aurinkokentältä tulevan höyryn virtaus päättyy.

Yksi luonteenomainen piirre aurinkokentän toiminnalle on sen sijainnin ja auringon kiertoradan välinen kulma. Erityisesti kuvissa 9 ja 11 voi nähdä kuinka aurinkokentän tuottama teho elää päivän edetessä. Paraboliselle aurinkokeräimelle on ominaista, että peilien kulmaa voi säätää vain yhdellä akselilla. Usein putket ja peilit sijoitetaan etelä- pohjoisuunta. Tällöin peilien kulmaa voi kääntää ja optimoida vain itä- länsisuunnassa.

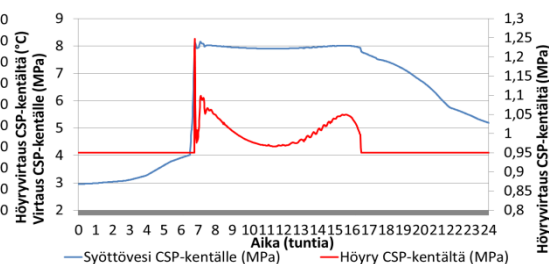
Paperissa esitetyt simuloinnit on toteutettu siten, että aurinkokentän sijainniksi on asetettu maantieteellisesti Marokkoon, ajan kohtana simuloinnille on 21. joulukuuta. Sijainti pohjoisella pallonpuoliskolla ravun kääntöpiirin ulkopuolella aiheuttaa auringon kiertoradan ja aurinkokentän sijainneista johtuvan ilmiön korostumisen tehon tuotannossa. Aurinkokentän maantieteellisen sijainnin, vuodenajan, vuorokaudenajan ja peilien suuntauksen keskinäisistä vaikutuksista höyryntuotantoon on kerrottu tarkemmin artikkelissa Tähtinen et al. 2014 (6).



Kuva 9. CFB-kattilalta aurinkokentälle menevän syöttöveden simuloitu lämpötila (°C), aurinkokentältä CFB-kattilalle menevän höyryn simuloitu lämpötila (°C) ja virtausnopeus (kg/s).



Kuva 10.



Kuva 11.

Kuvassa 10 aurinkokentälle menevän syöttöveden simuloitu lämpötila (°C) ja aurinkokentältä CFB-kattilalle palaavan höyryn simuloitu lämpötila (°C). Kuvassa 11. aurinkokentälle menevän syöttöveden simuloitu paine (MPa) ja aurinkokentältä CFB-kattilalle palaavan höyryn simuloitu paine (MPa).

## 4 YHTEENVETO

Keskitetty aurinkoenergian kerääminen yhdistettynä perinteisen CFB- kattilalaitoksen kanssa on kasvava ja lupaava tekniikka sähkön ja lämmön tuottamiseen. Aurinkoenergian hyödyntäminen mahdollistaa fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisen ja samalla kasvihuonekaasupäästöjen vähentymisen.

Tavoitteena oli testata ja varmistua mallinnetun hybridivoimalaitoksen toiminnasta ja hyödynnettävyydestä tulevaisuuden energiaratkaisujen testaamiseen, analysointiin ja optimointiin. Malli perussäätöineen antaa hyvän alusen prosessin tutkimukseen, kokeiluihin ja optimointiin muun muassa kehitettäessä erilaisia prosessien integrointitapoja tai sovellettaessa kehittyneitä säätömenetelmiä.

Tulosten mukaan (Kuvat 7 ja 8) vuorokauden aikana tapahtuneiden dynaamisten muutosten vaikuttama dynamiikka on oikeansuuntainen ja säädöt toimivat suunnitellulla tavalla. Malli on siten hyödynnettävissä sekä nykyisten että tulevaisuuden voimalaitosten tutkimus- ja kehitystyöhön. Suurin haaste mallin rakentamisessa on ollut melko vähäinen saatavilla oleva suunnittelu ja referenssidata.

Apros tarjoaa erinomaisen mallinnympäristön tulevaisuuden energiantuotantomuotojen kehittämiseen ja tutkimiseen. Integroiduissa tuotantomalleissa on ensiarvoisen tärkeää löytää oikea tapa prosessien yhdistämiseen. Seuraavassa vaiheessa puhutaan monitavoiteoptimoinnista ja sen toteutuksesta automaation avulla. Samanaikaisesti täytyy huomioida hyvin monta erilaista tekijää, perusprosessiteknisistä asioista aina materiaalitekniisiin ja päästöihin liittyviin asioihin saakka.

Moniulotteiset menetelmät vaativat kehittyneitä säätömenetelmiä ja niiden virittämistä sovelluskohteeseen. Prosessi-integraatioita tutkittaessa tulee tarpeelliseksi miettiä myös erilaisten ennustavien menetelmien hyödyntämistä sekä väliavarastojen tarvetta jotta kokonaisprosessin dynaaminen nopeus täyttäisi tarvittavat vaatimukset. Edellä mainittujen asioiden tarkasteluun tarvitaan hyvät työkalut.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] Lappalainen, J.; Blom, H.; Juslin, K., Dynamic process simulation as an engineering tool – A case of analysing a coal plant evaporator, VGB Powertech, 1/2 2012, pp. 62-68.
- [2] Lappalainen, J.; Mikkonen, H.; Jegoroff, M.; Sanchez-Biezma, A.; Kovacs, J.; Tourunen, A., Simulation studies on oxy-CFB boiler dynamics and control, 3rd Oxyfuel Combustion Conference, Ponferrada, Spain, September 9-13, 2013.
- [3] Juslin, K., 2005, A companion model approach to modeling and simulation of industrial processes, VTT Publications 574, 155p+app.15p.
- [4] Basu, P., Combustion of coal in circulating fluidized-bed (CFB) boilers: a review. Chem Eng Sci 1999;54:5547–5557.
- [5] Huhtinen, M.; Kettunen, A.; Nurminen, P.; Pakkanen, H., Höyrykattilatekniikka. 2.-3. edition. Helsinki, Edita. Pages 316.
- [6] Tähtinen, M.; Kannari, L.; Weiss, R.; Mikkonen, H., Dynamic modelling of concentrated solar power and power plant integration. 4th solar workshop, Berlin, Germany, November 10.-11., 2014