

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

## Kemikaalikiertopolttoon perustuvan höyryvoimalaitoksen mallintaminen IPSEpro:lla

Työn tarkastaja: Tero Tynjälä

Työn ohjaaja: Tero Tynjälä

Lappeenranta 27.12.2013

Antti Holopainen

## **TIIVISTELMÄ**

Tekijän nimi: Antti Holopainen

Opinnäytteen nimi: Kemikaalikiertopolttoon perustuvan höyryvoimalaitoksen mallintaminen IPSEpro:lla

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2013

34 sivua, 11 kuvaa, 8 taulukkoa ja 3 liitettä.

Hakusanat: CLC, kemikaalikiertopoltto, IPSEpro, höyryvoimalaitos, hiilidioksidin talteenotto.

Kandidaatintyön tavoitteena on suunnitella IPSEpro-ohjelmistolla kemikaalikiertopolttoa hyödyntävä höyryvoimalaitos. Kandidaatintyössä tutustutaan kemikaalikiertopoltton pääperiaatteisiin ja etuihin hiilidioksidin talteenotossa. IPSEpro-mallin alkuarvot lasketaan Matlab-pohjaisella 0-D mallilla. IPSEpro-ohjelmistoa esitellään. IPSEpro:lla suunniteltu voimalaitos esitetään ja sitä verrataan kilpaileviin hiilidioksidin talteenottotekniikoihin.

Kemikaalikiertopolttoon perustuva höyryvoimalaitos on kilpailukykyinen olemassa olevien teknologioiden kanssa polttoaineen ollessa maakaasua. Kiinteisiin polttoaineisiin siirryttäessä on suoritettava jatkotarkasteluita.

# SISÄLLYSLUETTELO

## Sisällysluettelo

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>3</b>
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>8</b>
<b>2 Kemikaalikiertopoltto</b>	<b>10</b>
2.1 Kemikaalikiertopoltton periaate.....	10
2.2 Kemikaalikiertopoltto voimalaitoksissa .....	11
<b>3 Voimalaitosmallin lähtökohdat</b>	<b>13</b>
3.1 0-D malli.....	13
3.2 IPSEpro.....	15
3.2.1 Komponenttien toiminta-arvot.....	15
3.2.2 Normaali Rankine- prosessi IPSEprossa .....	17
3.2.3 Kemikaalikiertopoltto yhdistettynä Rankine - prosessiin.....	18
3.2.4 Optimointityökalu .....	19
<b>4 IPSEpro- mallit</b>	<b>21</b>
4.1 Yhden välitulistuksen malli .....	21
4.2 Kahden välitulistuksen malli .....	24
<b>5 Tulokset</b>	<b>28</b>
5.1 Hyötysuhteet .....	28
5.1.1 Yhden välitulistuksen malli .....	28
5.1.2 Kahden välitulistuksen malli.....	29
5.2 Hiilidioksidin talteenoton vaikutus hyötysuhteeseen.....	30
5.3 Kilpailevat teknologiat .....	31
5.3.1 USC .....	32
5.3.2 IGCC.....	32
5.3.3 NGCC .....	33
5.3.4 Happipoltto .....	33
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>34</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>35</b>
<b>Liitteet</b>	<b>37</b>



## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

P	teho	[W]
t	aika	[s]
X	reaktioaste	
T	lämpötila	[K, °C]
q	virta	[s <sup>-1</sup> ]
p	paine	[bar]

### Kreikkalaiset aakkoset

$\lambda$	ilmakerroin	
$\Phi$	lämpöteho	[W]
$\eta$	hyötysuhde	

### Alaindeksit

pa	polttoaine
oxd	ilmareaktori
red	polttainereaktori
in	sisääntuleva
out	uloslähtevä

m massa

air ilma

#### Alkuaineet

CO<sub>2</sub> Hiilidioksidi

TiO Titaanioksidi

NiO Nikkelioksidi

H<sub>2</sub>O Vesi

#### Lyhenteet

CLC Chemical looping combustion

IGCC Integrated gasification combined cycle

CCS Carbon capture and storage

HP High pressure

IP Intermediate pressure

LP Low pressure

syve Syöttövesisäiliö

USC Ultra-supercritical

LHV Lower heating value

SC Supercritical

NGCC      Natural gas combined cycle

CFB      Circulating fluidized bed

## 1 JOHDANTO

Pyrkimykset hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen ovat johtaneet uusiutuvan energian kovaan kasvuun Euroopassa viime vuosina. Kasvusta huolimatta fossiiliset polttoaineet tulevat jatkossakin tuottamaan valtaosan Euroopan sähköntarpeesta ainakin lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä. Tästä syystä hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia voidaan pitää yhtenä vartenotettavana teknologisenä ratkaisuna CO<sub>2</sub> päästöjä vähennettäessä. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi toimii siis siirtymävaiheen teknologiana kun siirrytään fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energiamuotoihin.

Hiilidioksidin talteenottomenetelmät voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan; Polton jälkeinen talteenotto, polttoa edeltävä talteenotto ja happipoltto.

Polton jälkeisessä talteenotossa CO<sub>2</sub> poistetaan savukaasuista polttoaineen palamisen jälkeen. Tämän hetken suosituin teknologia perustuu kemiallisen liuottimen käyttöön jossa savukaasut pestään liuottimella joka erottaa hiilidioksidin tyyppistä. Polton jälkeinen talteenotto voidaan lisätä hiilellä ja maakaasulla toimiviin voimalaitoksiin ilman sen suurempia teknisiä muutoksia voimalaitokseen. Haittapuolena on teknologian energiaintensiivisyys, joka johtuu tämänhetkisen parhaan liuotinaineen ominaisuuksista. Uusia, vähemmän energiaa kuluttavia liuotinaineita ollaan kehittämässä.

Polttoa edeltävä talteenotto perustuu hiilidioksidin poistamiseen kaasuturbiinissa ennen vedyn palamista. Tämä yhdistetty kaasutus – ja kaasukombivoimala (IGCC, Integrated gasification combined cycle) perustuu polttoaineen kaasuttamiseen erillisissä reaktoreissa jolloin syntyy hiilidioksidia ja vetyä. Kaasutuksessa syntynyt CO<sub>2</sub> erotetaan vedystä ja jäljelle jäävä vety sekoitetaan tyypeen ennen polttamista kaasuturbiinissa. Ongelmana on riittävän korkean sähköntuotantohyötysuhteen saavuttaminen vedyn palamisesta nykyisillä polttokammioilla ja turbiineilla.

Happipoltto perustuu polttoaineen palamiseen puhtaan hapen kanssa, jolloin syntyvät savukaasut koostuvat suurilta osin hiilidioksidista. Näin saatu CO<sub>2</sub> vaatii enää vain verrattain yksinkertaisen puhdistusprosessin ennen varastointia. Happipoltto mahdollistaa korkean sähköntuotantohyötysuhteen ja se voidaan lisätä jätekäteen vanhoihin voimalaitoksiin. Haittapuolena on hapenerotukseen vaadittavan laitteiston kalleus ja korkea energiankulutus. (EU, 2011).



Tässä työssä tullaan käsittelemään uutta kemikaalikiertopolttoon perustuvaa hiilidioksidin talteenottomuotoa. Työn tarkoituksena on tarkastella kuinka kemikaalikiertopoltto voidaan yhdistää Rankine- prosessiin ja suunnitella IPSEpro-ohjelmistoa käyttäen voimalaitoskokoontarjonta kemikaalikiertopoltton ympärille. Saatua voimalaitosmallia tullaan vertailemaan suositumpiin CCS- tekniikoihin.

Kappaleessa 2 käydään läpi kemikaalikiertopoltton periaate ja kuinka se voidaan integroida nykyisiin voimalaitoskokoontarjontoihin.

Kappaleessa 3 kerrotaan taustatietoa diplomityöstä johon tämä kandityö pohjaa sekä IPSEpro- ohjelmistosta.

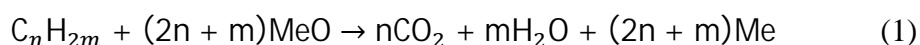
Kappaleessa 4 käydään läpi IPSEprolla rakennetut voimalaitosmallit ja kappaleessa 5 tarkastellaan saatuja tuloksia.

## 2 KEMIKAALIKIERTOPOLTTO

Kemikaalikiertopoltto (Chemical-looping combustion, CLC) on yksi lupaavimista hiilidioksidin talteenottoon tähtäävistä polttomenetelmistä. Suosituimmat hiilidioksidin talteenottojärjestelmät vaativat paljon energiaa joko hiilidioksidin erottamiseksi savukaasuista polton jälkeen tai happipoltossa vaadittavan hapen erottamiseksi ilmasta ennen polttoa. Kemikaalikiertopolttoon perustuvan hiilidioksidin talteenoton erikoisuus on, ettei se vaadi erillistä kaasujen erotusjärjestelmää. Kemikaalikiertopoltton savukaasut koostuvat ideaalitapauksessa puhtaasti hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Tästä syystä kemikaalikiertopoltto on yksi energiatehokkaimpia tapoja ottaa talteen CO<sub>2</sub>- päästöjä savukaasuista. (Bolhàr-Nordenkampf et al., 2008)

### 2.1 Kemikaalikiertopoltton periaate

Kemikaalikiertopoltossa on kaksi reaktoria, ilma- ja polttoainereaktori. Käytettävän polttoaineen tulee olla kaasumaisessa muodossa kun se syötetään polttoainereaktoriin jossa se tulee kosketuksiin metallioksidin (MeO) kanssa. Metallioksidi ja polttoaine reagoivat yhtälön (1) mukaisesti.



Polttoainereaktorin savukaasut koostuvat siis vesihöyrystä ja hiilidioksidista. Kaasua jäädyttämällä vesihöyry saadaan kondensoitumaan, jolloin jäljelle jää lähes täysin puhdasta hiilidioksidia.

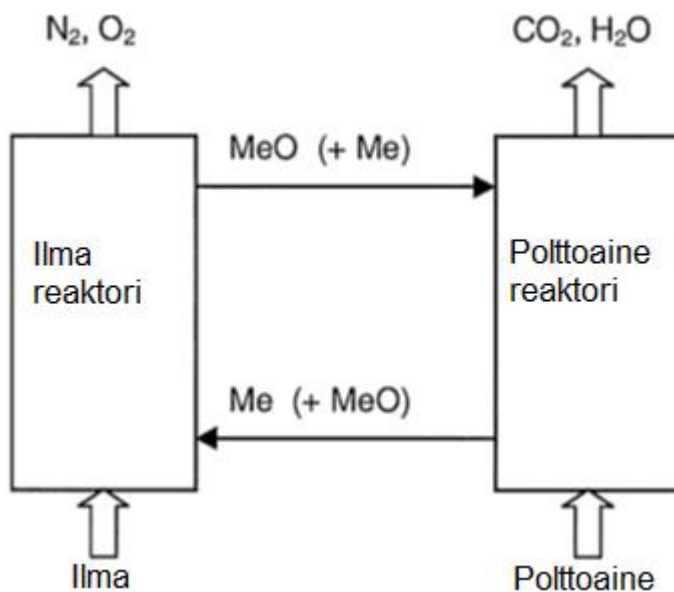
Pelkistynyt metalli Me siirretään polttoainereaktorista ilmareaktoriin jossa metalli hapetetaan uudelleen yhtälön (2) mukaisesti.



Ilmareaktorin savukaasut koostuvat typestä ja pienistä määristä käyttämätöntä happea.

Käytetystä hapenkantajametallista riippuen reaktio (1) on useimmiten endoterminen ja reaktio (2) voimakkaasti eksoterminen. Tästä syystä ilmareaktoria tulee jäädyttää ja se toimiikin normaalin voimalaitoskattilan tavoin veden höyrystäjänä. Reaktioissa

vapautuva kokonaisenergia on kuitenkin yhtä suuri kuin normaalissa palamisessa. Todellisessa tapauksessa metalli ei koskaan hapetu tai pelkisty täydellisesti ja läpivirtausta tapahtuu reaktoreissa. Kuvassa 1 nähdään kemikaalikiertopolton periaatekuva.

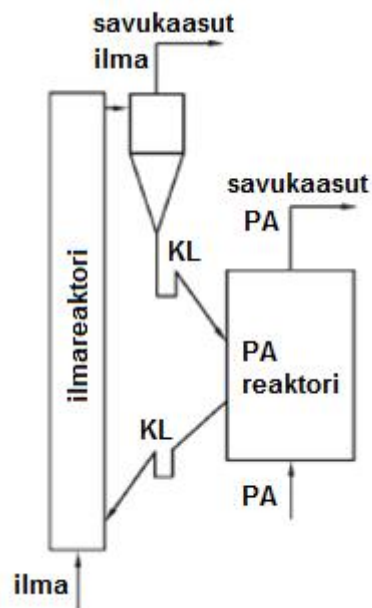


**Kuva 1.** Kemikaalikierto ilma- ja polttoainereaktorin välillä.

Kemikaalikiertopolton etu tavanomaiseen palamiseen verrattuna on siis prosessin sisäänrakennetussa kyvyssä erottaa hiilidioksidi tpestä ilman erillistä erotukseen vaadittavaa laitteistoa. (Lyngfelt et al., 2001).

## 2.2 Kemikaalikiertopoltto voimalaitoksissa

Kemikaalikiertopoltto eroaa tavanomaisesta voimalaitosprosessista siinä että CLC-prosessissa syntyy kaksi toisistaan erillään kulkevaa savukaasuvirtaa. Tämä mahdollistaa tavanomaisesta höyryvoimalaitoksesta poikkeavan savukaasutulistimien ja veden esilämmittimien asettelun. Kuvasta 2 nähdään miten kemikaalikiertopoltoon perustuva voimalaitos poikkeaa konventionaalisista höyryvoimalaitoksista voimalaitoskattiloiden rakenteen ja asemoinnin kannalta.



**Kuva 2.** CLC – prosessin kattilarakenne. KL = kaasulukko, PA = polttoaine. (Pröll et al., 2009)

Kuvassa 2 nähtävä ilmareaktori toimii kuten tavanomaisessa voimalaitoksessa toimiva kiertoleijupetikattila ja sen savukaasut poistuvat sykloniin jossa kaasut ja petimateriaali erotetaan toisistaan. Normaalista kiertoleijupetikattilasta poiketen petimateriaalia ei palauteta välittömästi kattilan pohjalle, vaan se johdetaan erilliseen polttoainereaktoriin (PA-reaktori) jossa kiintoaine reagoi polttoaineen kanssa. Polttoaineen reagoinnin seurauksena polttoainereaktorista saadaan toinen kuuma savukaasuvirta (savukaasut PA) jonka energiaa voidaan hyödyntää.

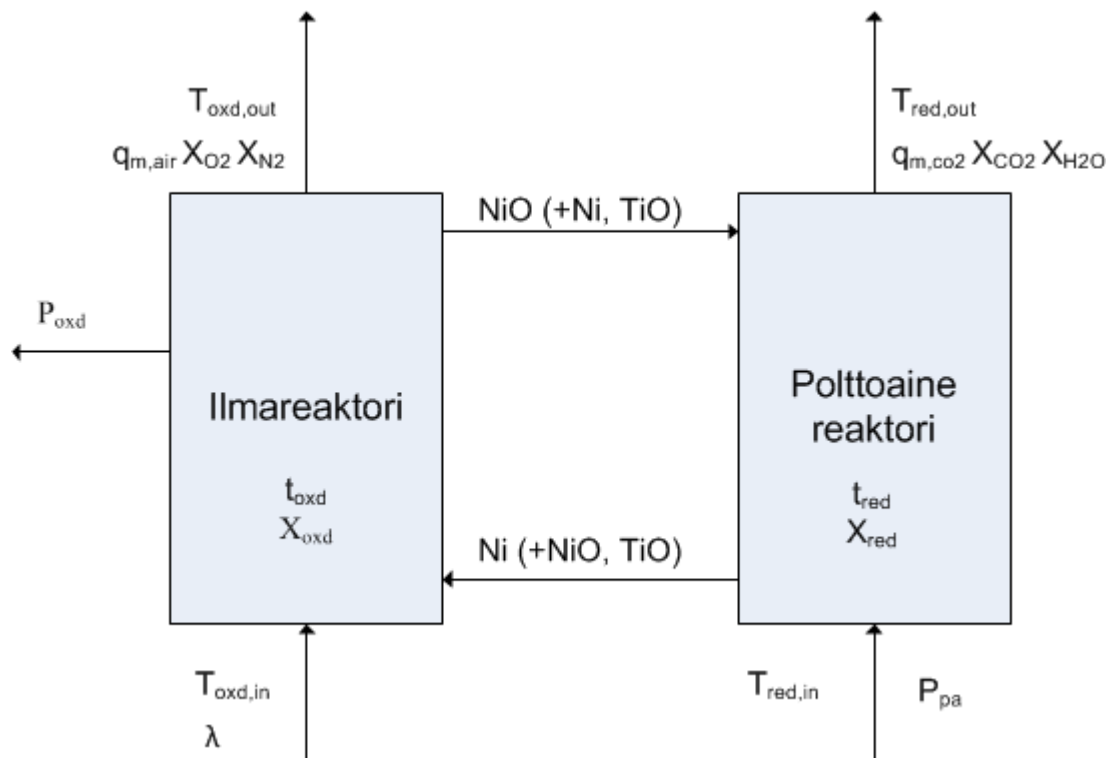
Yllä esitetty kiertoleijupetikattilasta ja leijupetikattilasta koostuva voimalaitoskokoontulo on vain yksi useista erilaisista vaihtoehdoista. Tässä kandidityössä keskitytään tarkastelemaan voimalaitosratkaisua joka tuottaa ilmareaktorissa veden höyrystämiseen tarvittavan energiamäärän ja lisäksi syntyy kaksi kuumaa savukaasuvirtaa. (Pröll et al., 2009).

### 3 VOIMALAITOSMALLIN LÄHTÖKOHDAT

Kandityön tavoitteena oli suunnitella 1000 MW polttoaineteholla toimiva, maakaasua polttava, kemikaalikiertopolttoon perustuva voimalaitoskonsepti käyttäen IPSEpro-ohjelmistoa. Voimalaitosmallin pohjana toimi energiatekniikan osastolle tehty alustava IPSEpro- malli (ks. Liite 1) sekä Petteri Peltolan (Peltola, 2009) diplomityönä tekemä matlab:lla toimiva 0-D malli.

#### 3.1 0-D malli

Voimalaitosmallin laskennan alkuarvojen laskemiseksi käytettiin Matlab- pohjaista 0-D mallia (Peltola, 2009). 0-D malli mallintaa kahden leijupetikattilan pohjalta toimivaa CLC- prosessia jossa polttoaineena käytetään metaania ja hapenkantajana nikkeliä. Kiertoaineena on nikkelin lisäksi inerttiä titaanioksidia. (Peltola, 2009).



**Kuva 3.** 0-D mallin prosessikaavio.

Kuvassa 3 nähdään 0-D mallin prosessikaavio. 0-D malli laskee savukaasujen koostumukset, lämpötilat ja massavirrat massa- ja energiataseiden avulla. Laskentaa varten 0-D malliin on syötettävä laitoksen polttoaineteho, kiintoaineen viipymisaika

ilma- ja polttoainereaktorissa, ilma- ja polttoainereaktorin reaktioasteet, kiintoaineen hapenkantajakomponentin (NiO) ja inertin komponentin (TiO) osuudet, ilmakerroin, ilman sisääntulolämpötila ja polttoaineen sisääntulolämpötila. Lisäksi on päätettävä ilmareaktorilta otettava lämpöteho eli kuinka paljon lämpöä siirtyy ilmareaktorissa höyrypiiriin. Taulukossa 1 nähdään 0-D malliin syötetyt arvot ja niillä saadut tulokset. (Peltola, 2009).

**Taulukko 1.** 0-D malliin syötetyt arvot ja niiden perusteella saadut laskennan alkuarvot.

0-D malli	inputs		
$P_{pa}$	1000	MW	Polttoaineteho
$t_{oxd}$	30	s	Ilmareaktorin viipymisaika
$t_{red}$	60	s	Polttoainereaktorin viipymisaika
$X_{oxd}$	0.6		Ilmareaktorin reaktioaste
$X_{red}$	0.5		Polttoainereaktorin reaktioaste
active NiO	40	%	Aktiivisen komponentin osuus
inert (TiO)	60	%	Inertin komponentin osuus
$\lambda$	1.1		Ilmakerroin
$T_{oxd,in}$	293	K	Ilman sisääntulolämpötila
$T_{red,in}$	293	K	Polttoaineen sisääntulolämpötila
$P_{oxd}$	400-600	MW	Ilmareaktorin lämpöteho
	outputs		
$q_{m,co2}$	100	kg/s	Polttoainereaktorin savukaasujen massavirta
$X_{CO2}$	0.55		CO <sub>2</sub> osuus savukaasuista
$X_{H2O}$	0.45		H <sub>2</sub> O osuus savukaasuista
$q_{m,air}$	298	kg/s	Ilmareaktorin savukaasujen massavirta
$X_{O2}$	0.027		O <sub>2</sub> osuus savukaasuista
$X_{N2}$	0.973		N <sub>2</sub> osuus savukaasuista
$T_{oxd,out}$	823 -1147	°C	Ilmareaktorin savukaasujen lämpötila
$T_{red,out}$	708 -1016	°C	Polttoainereaktorin savukaasujen lämpötila

Valittu ilmareaktorin lämpöteho vaikuttaa suoraan uloslähtevien savukaasujen lämpötilaan. Mitä suurempi ilmareaktorin lämpöteho on, sitä pienempi savukaasujen lämpötila ja päinvastoin. Koska voimalaitoksen hyötysuhteen kannalta parasta mahdollista ilmareaktorin lämpötehon ja savukaasujen lämpötilojen suhdetta ei tiedetä, laskettiin 0-D mallilla useat alkuarvot IPSEpro- mallia varten. Taulukossa 2 nähdään ilmareaktorin lämpötehon vaikutus savukaasujen lämpötiloihin.

**Taulukko 2.** Ilmareaktorin tehon vaikutus ilma- ja polttoainereaktorin savukaasuvirtojen lämpötilaan.

Ilmareaktori [MW]	ilma [°C]	PA [°C]
600	823	708
550	899	784
500	982	860
450	1067	938
400	1147	1016

## 3.2 IPSEpro

IPSEpro on prosessisimulointiohjelma erilaisten energia- ja kemiantekniikan stationääristen ongelmatilanteiden ratkaisuun. IPSEpro kykenee mallintamaan yksittäisiä voimalaitoskomponentteja, rajattuja prosessikokonaisuuksia sekä kokonaisia voimalaitoksia. IPSEpron modulaarinen rakenne mahdollistaa voimalaitosprosessin rakentamisen useista erillisistä komponenteista ja niiden yhdistämisen mieleisellään tavalla. IPSEpron optimointityökalu mahdollistaa myös rakennetun mallin iteratiivisen optimoinnin valittujen parametrien suhteen. (Simtech, 2003a).

### 3.2.1 Komponenttien toiminta-arvot

IPSEpro- ohjelmassa voimalaitosprosessi rakennetaan komponentti kerrallaan. Jokaiselle komponentille on annettava tiettyjä toiminta-arvoja jotta ohjelma pystyy ratkaisemaan suunnitellun voimalaitoksen puuttuvat tilapisteet. Käytetyt toiminta-arvot on lueteltu taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Eri komponenteille annetut toiminta-arvot.

lämmönsiirtimien	
asteisuus	5 K
nestepuolen painehäviö	0,5 bar
kaasupuolen painehäviö	0,01 bar
lauhduttimen	
alijäähtyminen	2 K
kuuman puolen painehäviö	0,01 bar
kylmän puolen painehäviö	0,1 bar
Turbiinien hyötysuhde	
HP	94 %
IP	92 %
LP	89 %
kattilan hyötysuhde	100 %
kattilan painehäviö	0 bar
putkiston painehäviö	0 bar
syve-säiliön painehäviö	0,2 bar
pumppujen hyötysuhteet	
isentrooppinen	80 %
mekaaninen	90 %
generaattorin hyötysuhteet	
sähköntuotto	98 %
mekaaninen	98 %

On huomattava että taulukossa esitetty lämmönsiirtimen asteisuus on epärealistisen pieni. Todellisuudessa ekonomaisereiden ja tulistimien asteisuus saattaa olla useita satoja celsiusia. Lämmönsiirtimien asteisuudet vaihtelevat voimakkaasti riippuen lämmönsiirtimestä ja niiden suunnitteluparametreista eikä tämän työn tarkoituksena ole keskittyä yksittäisten lämmönsiirtimien mitoittamiseen. Eri mallien vertailtavuuden vuoksi lämmönsiirtimien asteisuus pidetään kaikille samana jolloin voidaan minimoida aiheutettu virhe. (Kaikko, 2013).

Lämmönsiirtimen nestepuolen painehäviö voidaan yleisesti arvioida olevan 2 – 5 % kokonaispaineesta. Tulistimien ja välitulistuksen osalta lämmönsiirtimien painehäviöt olisivat siis korkeammat kuin taulukoitu 0.5 bar, mutta eri mallien vertailtavuuden takia tässä työssä käytetään kaikille lämmönsiirtimille yhteisiä arvoja. (Kaikko, 2013).

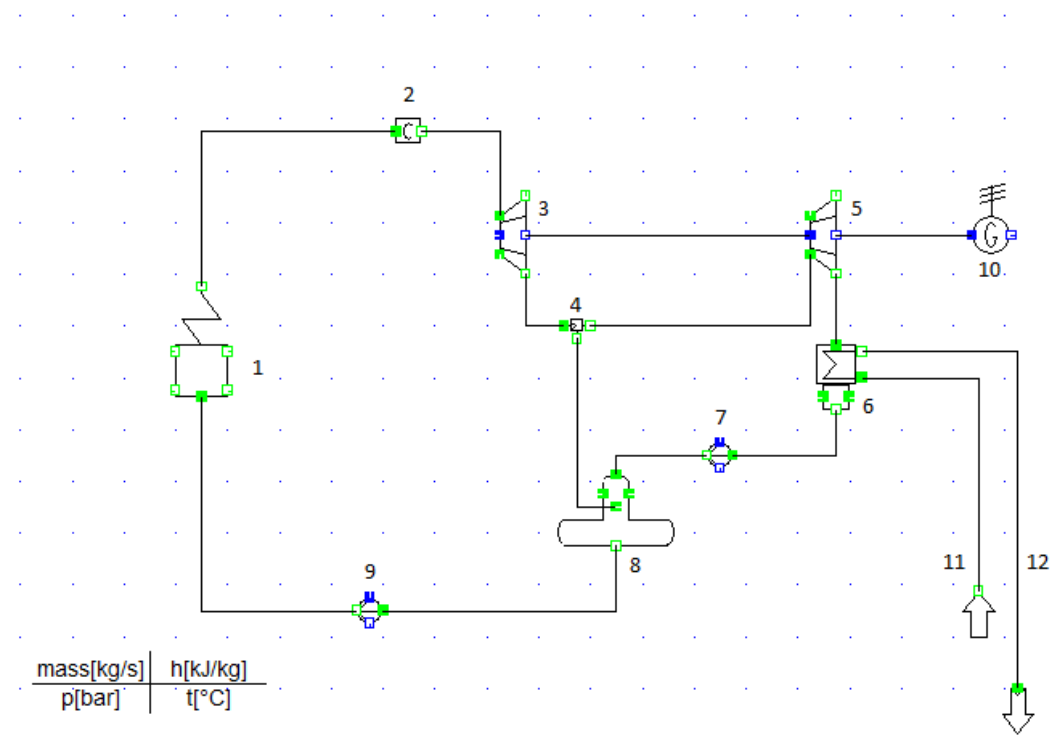


Kattilan hyötysuhde ja painehäviöt ovat myös epärealistisen hyviä, mutta tämä johtuu laskennallisesta tarpeesta tuoda IPSEpro:n laskentaan tietty polttoaineteho. Tässä työssä ei pyritä ottamaan kantaa CLC- prosessia hyödyntävän voimalaitoskattilan hyötysuhteeseen. (Kaikko, 2013).

### 3.2.2 Normaali Rankine- prosessi IPSEprossa

IPSEprolla tehty tavanomainen Rankine- prosessi yhdellä väliotolla ja syöttövesisäiliöllä on esitetty kuvassa 3. Kuvassa komponentit toisiinsa yhdistävä musta viiva kuvaa höyrypiiriä, poikkeuksena kaksi turbiinia ja generaattorin yhdistävä akseli joka kuvaa voimavälitystä turbiinien ja generaattorin välillä.

Toimivan mallin rakentaminen vaatii komponenttien toiminta-arvojen lisäksi myös putkissa kulkevan väliaineen aineominaisuuksien, tässä tapauksessa höyryn, määrittämisen. Tämän lisäksi ohjelmaan on syötettävä tiettyjen tilapisteiden tiedot, kuten tuorehöyryn haluttu lämpötila ja paine, väliottojen paineet, syve- säiliön paine sekä paisunnan loppupaine.



Kuva 4. IPSEprolla tehty höyryvoimalaitosprosessi.

Kuvassa 4 numeroidut komponentit 1 – 12 on lueteltuna alla taulukossa 4.

**Taulukko 4.** Numeroidut komponentit.

numero	komponentti
1	Kattila
2	Connector
3	Korkeapaineturbiini
4	Väliotto
5	Matalapaineturbiini
6	Lauhdutin
7	Lauhdepumppu
8	Syöttövesisäiliö
9	Syöttövesipumppu
10	Generaattori
11	"Source" - komponentti jäähdytysvedelle
12	"Sink" - komponentti jäähdytysvedelle

Numeroiduista komponenteista erityismaininnan vaativat komponentit 2, 11 ja 12. Komponentti 2 eli Connector on ohjelmiston vaatima komponentti joka poistaa kiertoprosessista ”ylimääräisen” massataseen. Komponentti 11 on Source- eli lähdekomponentti, jolla voidaan tuoda prosessiin sen ulkopuolelta erilaisia ainevirtoja. Komponentti 12 on Sink- eli nielukomponentti, jolla prosessista voidaan poistaa erilaisia ainevirtoja. (Simtech, 2003b).

### 3.2.3 Kemikaalikiertopoltto yhdistettynä Rankine - prosessiin

Kemikaalikiertopolton toteuttaminen IPSEprolla vaatii kahden ylimääräisen Source- ja Sink- komponentin lisäämisen prosessiin. Source- komponenteilla prosessiin tuodaan savukaasuvirta halutulla paineella, lämpötilalla ja massavirralla. Sink- komponentit taas poistavat savukaasuvirrat prosessista. Lisäksi on määriteltävä savukaasukoostumukset molemmille savukaasuvirroille jotta IPSEpro kykenee laskemaan näiden aineominaisuudet.

Voimalaitosmallin kehittäminen lähti liikkeelle energiatekniikan osaston tarjoamasta alustavasta IPSEpro- mallista (ks. Liite 1). Kyseinen malli on yksinkertainen

voimalaitosprosessi jossa ilma- ja polttoainereaktorin savukaasuvirtoja käytetään kertaalleen tulistukseen ja välitulistukseen sekä veden esilämmitykseen ennen syvesäiliötä. Tämän lisäksi prosessi sisältää yhden höyryn väliotolla suoritetun syöttöveden esilämmityksen sekä yhden välioton syöttövesisäiliöön.

### 3.2.4 Optimointityökalu

IPSEpro sisältää erillisen optimointityökalun joka mahdollistaa prosessin tilapisteiden optimoinnin tietyn parametrin suhteen. Optimointityökalulle asetetaan tietty parametri jota ohjelma pyrkii maksimoimaan tai minimoimaan, tässä tapauksessa pyrittiin maksimoimaan generaattorin sähköteho. Tämän jälkeen ohjelmalle annetaan lista muuttujista joita ohjelma lähtee varioimaan, kuten tuorehöyryn ja väliottojen paineet. Muuttujille annetaan myös raja-arvot joiden välillä arvojen tulee pysyä. Annettujen tietojen pohjalta ohjelma pyrkii löytämään parhaan mahdollisen ratkaisut annettujen raja-arvojen puitteissa. (Simtech, 2003c).

Kuvassa 5 nähdään yhden välioton mallissa optimointityökaluun syötetyt arvot.

Optimization (Genetic Algorithm)

Objective Function  
generator001.power  
 Minimize  Maximize

Decision Variables & Parameters

Item Name	Min	Max	Bit
stream027.p	35.0000...	85.0000...	16
stream002.p	20.0000...	50.0000...	16
stream040.p	10.0000...	45.0000...	16
stream001.p	2.000000	10.0000...	16
stream034.p	0.500000	9.000000	16

GA Parameters  
Population size: 100  
No. of generations: 20  
Probability of crossovers: 0.6  
Probability of mutations: 0.002

**Kuva 5.** Optimointityökalun käyttöliittymä, jossa määritellään optimoitavien suureiden raja-arvot sekä muut optimointiparametrit.

Objective function kertoo tavoitteen eli generaattoritehon maksimoinnin. Muuttujiksi on asetettu järjestyksessä välitulistuksen paine, ensimmäisen välioton paine, toisen välioton paine, syve – säiliön paine ja paisunnan loppupaine. Min ja Max – arvot näyttävät ohjelmalle asetetut raja-arvot.

Optimointityökalua käytettiin ali- ja ylikriittisille höyrynarvoille optimaalisten tulistus – ja väliottopaineiden sekä paisunnan loppupaineen löytämiseksi.

## 4 IPSEPRO- MALLIT

Työn tavoitteena oli rakentaa alustavan IPSEpro- mallin pohjalta 1000 MW polttoaineteholla toimiva, metaania polttoaineena käyttävä höyryvoimalaitos. Malleja tarkasteltaessa on huomattava että 0-D mallin lämpötilojen iteroinnissa on virhe minkä johdosta 0-D mallista saadut savukaasulämpötilat ovat liian pienet eivätkä vastaa suunniteltua 1000 MW polttoainetehoa. Todellinen polttoainetehto laskennassa käytetyillä savukaasujen arvoilla on noin 960 MW.

Erilaisia voimalaitoskoonpanoja rakennettaessa kaksi kokoonpanoa osoittautui varteenotettavimmiksi vaihtoehtoiksi hyötysuhteen kannalta. Ensimmäinen on yhteen välitulistukseen perustuva malli joka pystyy toimimaan laajalla savukaasulämpötilojen alueella. Toinen malli käyttää hyväkseen kahta välitulistusta, mutta malli ei ole yhtä joustava savukaasujen lämpötilojen suhteen. Molemmille malleille on suoritettu laskenta ali- ja ylikriittisillä höyrynarvoilla. Alikriittisen mallin tuorehöyryn paineena käytetään 160 bar painetta ja ylikriittisen mallin tuorehöyryn paineena käytetään 275 bar painetta. Kappaleissa 4.1 ja 4.2 esiteltävä data on kaikki laskettu alikriittiselle prosessille.

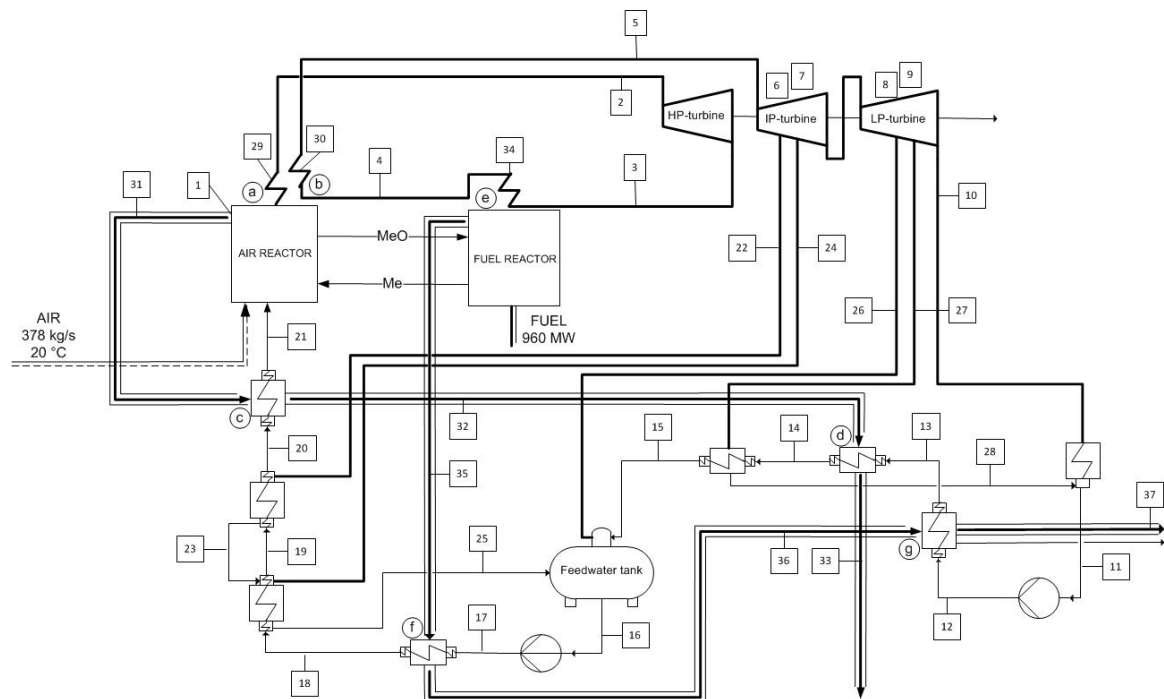
On huomattava että alikriittisille tapauksille käytetyt lämpötilat tulistukselle ja välitulistukselle ovat korkeat. Määritelmän mukaan yli 593 °C asteen lämpötilaa ja 24.1 MPa:n painetta käyttävät laitokset luokitellaan ylikriittisiksi. (Otsuka, Kaneko 2007, s.214). Ali- ja ylikriittisen mallin vertailtavuuden vuoksi molempien mallien tulistus- ja välitulistuslämpötilat on asetettu samaksi ja ainoana muuttujana mallien välillä käytetään painetta.

### 4.1 Yhden välitulistuksen malli

Yhden välitulistuksen mallissa kattilasta lähtevä tuorehöyry tulistetaan ilmareaktorin savukaasuilla 600 °C asteeseen. Välitulistus 610 °C asteeseen suoritetaan sekä polttoaine- että ilmareaktorin savukaasuilla. Jäljelle jäävä osuus savukaasujen lämmöstä käytetään syöttöveden esilämmitykseen ekonomaisereissa. Turbiineilta on kolme välitotta syöttöveden esilämmittimille sekä yksi syöttövesisäiliölle. Kuva rakennetusta IPSEpro- mallista löytyy liitteestä 2.

Kuvassa 6 on mallin virtauskaavio. Kuvassa tummennetulla viivalla merkitty putki sisältää höyryä, ohuella viivalla merkitty putki sisältää vettä ja kahdesta ohuesta ja yhdestä tummennetusta viivasta koostuva putki sisältää savukaasuja.

Kuvaan on numeroitu höyryn ja savukaasujen tilapisteet. Tilapisteiden arvot alikriittisessä prosessissa on lueteltu taulukossa 5. Pisteet 6-9 kuvaavat turbiinissa välioton jälkeen jatkavat höyryn määrää ja tilaa. Kirjaimin merkityt kohdat a-g ovat savukaasulämmönsiirtimiä, joiden tehot on merkitty erikseen taulukkoon 6.



**Kuva 6.** Yhden välitulistuksen mallin virtauskaavio.

**Taulukko 5.** Höyryn ja savukaasujen massavirta, paine ja lämpötila eri tilapisteissä alikriittisillä höyrynarvoilla.

höyry	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$q_m$ [kg/s]	266,5	266,5	266,5	266,5	266,5	256,0	247,7	233,4	227,2	227,2
$p$ [bar]	160,5	160,0	39,9	39,4	38,9	30,8	19,7	5,9	2,2	0,045
$T$ [C]	469,0	600,0	375,4	503,1	610,0	570,1	498,3	334,1	223,4	31,0
höyry	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$q_m$ [kg/s]	233,4	233,4	233,4	233,4	233,4	266,5	266,5	266,5	266,5	266,5
$p$ [bar]	0,035	7,4	6,9	6,4	5,9	5,7	162,5	162,0	161,5	161,0
$T$ [C]	24,7	24,8	43,4	102,8	118,3	156,6	159,4	186,9	206,6	230,2
höyry	21	22	23	24	25	26	27	28		
$q_m$ [kg/s]	266,5	10,5	10,5	8,4	18,9	14,3	6,2	6,2		
$p$ [bar]	160,5	30,8	30,3	19,7	19,2	5,9	2,2	1,7		
$T$ [C]	297,8	570,1	211,6	498,3	191,9	334,1	223,4	107,8		
ilmareaktorin savukaasu	29	30	31	32	33					
$q_m$ [kg/s]	298,0	298,0	298,0	298,0	298,0					
$T$ [C]	982,0	700,7	508,1	235,2	46,4					
PA-reaktorin savukaasu	34	35	36	37						
$q_m$ [kg/s]	100,0	100,0	100,0	100,0						
$T$ [C]	860,0	380,4	164,4	29,8						

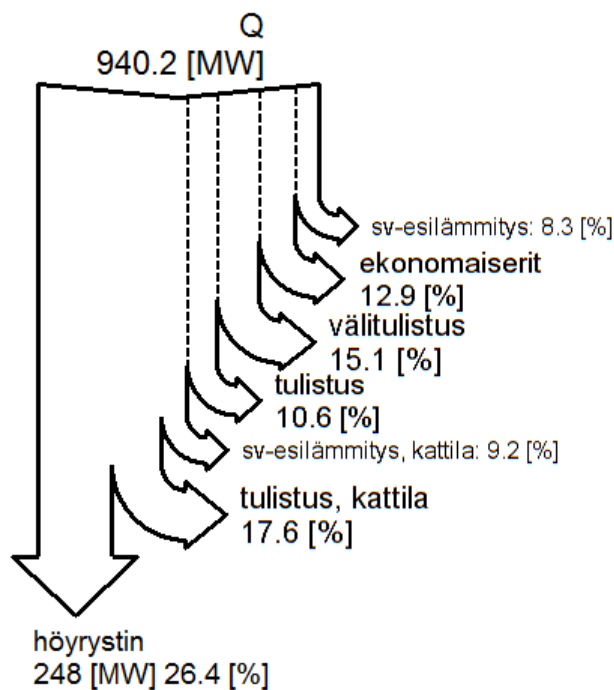
Taulukkoon 6 on lueteltu kaikki voimalaitoksen savukaasulämmönsiirtimet ja niiden tehot. Teholla tarkoitetaan tässä tapauksessa lämmönsiirtimen siirtämää energiamäärää savukaasuista höyryyn/syöttöveeten. Näistä lämmönsiirtimistä a-d toimivat ilmareaktorin savukaasuilla ja e-g toimivat polttoainereaktorin savukaasuilla.

**Taulukko 6.** Savukaasulämmönsiirtimien tehot

lämmönsiirrin	a	b	c	d	e	f	g
$P$ [MW]	100.0	63.3	88.6	59.0	78.2	32.3	18.7

Kuvassa 7 olevassa Sankey-diagrammissa on esitetty, miten alikriittisessä prosessissa höyrypiiriin tuotava lämpöteho jakautuu kattilan ja lämmönsiirtimien kesken. Kuvassa

ylhäällä nähtävä lämpöteho  $Q$  ei siis ole laitoksen polttoainetehto, vaan hörypiiriin siirtyvä lämpöteho.



**Kuva 7.** Sankey- diagrammi höyryyn tuodusta lämpötehosta alikriittisessä prosessissa.

Kuvassa mainittu syöttöveden esilämmitys sisältää molemmat syve-säiliötä edeltävät lämmönsiirtimet. Samoin ekonomaiserit sisältävät molemmat syöttövesipumpun jälkeiset savukaasulämmönsiirtimet.

## 4.2 Kahden välitulistuksen malli

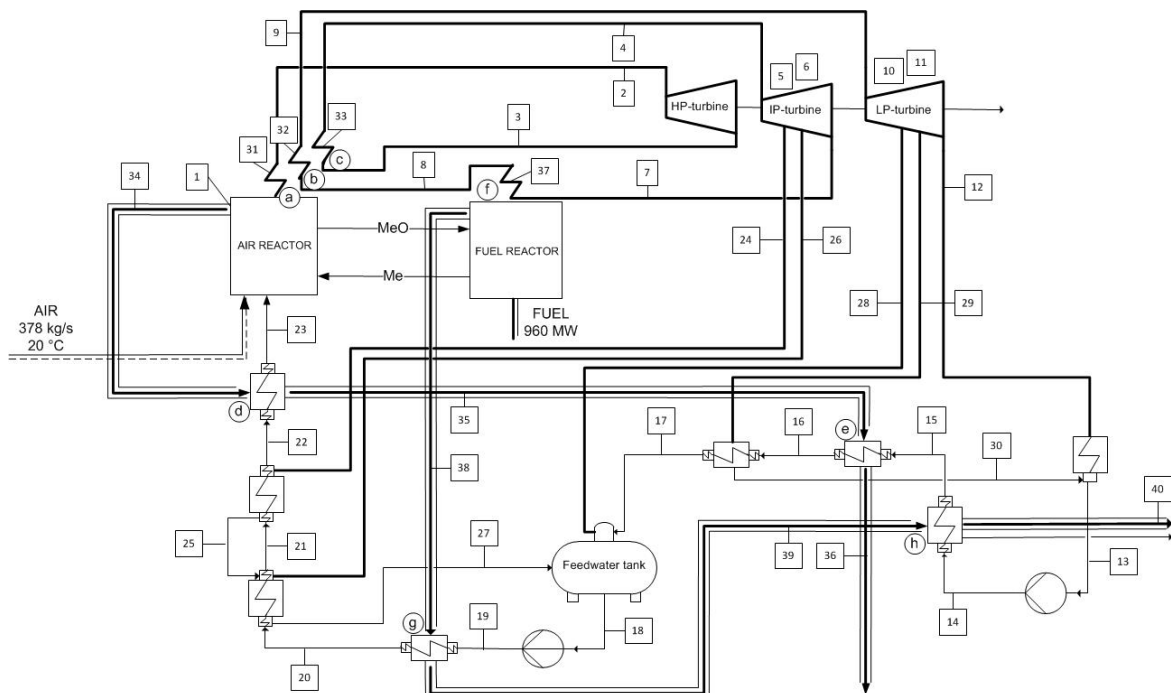
Kahden välitulistuksen mallissa kattilasta lähtevä tuorehöyry tulistetaan ilmareaktorin savukaasuilla 600 °C asteeseen. Ensimmäinen välitulistus 610 °C asteeseen suoritetaan pelkästään ilmareaktorin savukaasuilla. Toinen välitulistus 610 °C asteeseen suoritetaan sekä polttoaine- että ilmareaktorin savukaasuilla, mutta savukaasujen virtaussuunnassa katsottuna toinen välitulistus sijaitsee ennen ensimmäistä (savukaasut virtaavat järjestyksessä tulistus → 2. välitulistus → 1. välitulistus → ekonomaiserit). Jäljelle jäävä osuus savukaasujen lämmöstä käytetään syöttöveden esilämmitykseen.

Koska kahden välitulistuksen mallissa molemmat välitulistukset tapahtuvat savukaasuista saatavalla lämmöllä, vaatii malli toimiakseen hyvin kuumia savukaasuja



eikä sen toiminta-alue savukaasujen lämpötiloilla mitattaessa ole yhtä laaja kuin yhden välitulistuksen mallissa. Alimmilla savukaasun lämpötiloilla savukaasujen energia ei yksinkertaisesti riitä kahden välitulistuksen lisäksi tuorehöyryn tulistamiseen heti kattilan jälkeen. Jo tästä syystä IPSEprolla on vaikeuksia löytää toimivia ratkaisuja alimmille lämpötilatasoille ja malli muuttuu laskennallisesti epävakaaaksi. Kuva rakennetusta IPSEpro- mallista löytyy liitteestä 3.

Kuvassa 8 nähdään mallin virtauskaavio. Kuvaan on numeroitu höyryn ja savukaasujen tilapisteet. Tilapisteiden arvot alikriittisillä arvoilla on lueteltu taulukossa 7. Pisteet 5, 6, 10 ja 11 kuvaavat turbiinissa välioton jälkeen jatkavan höyryn määrää ja tilaa. Kirjaimin merkityt kohdat a-h ovat savukaasulämmönsiirtimiä, joiden tehot on merkitty erikseen taulukkoon 8.



**Kuva 8.** Kahden välitulistuksen mallin virtauskaavio.

**Taulukko 7.** Höyryn ja savukaasujen arvot eri tilapisteissä alikriittisillä höyrynarvoilla.

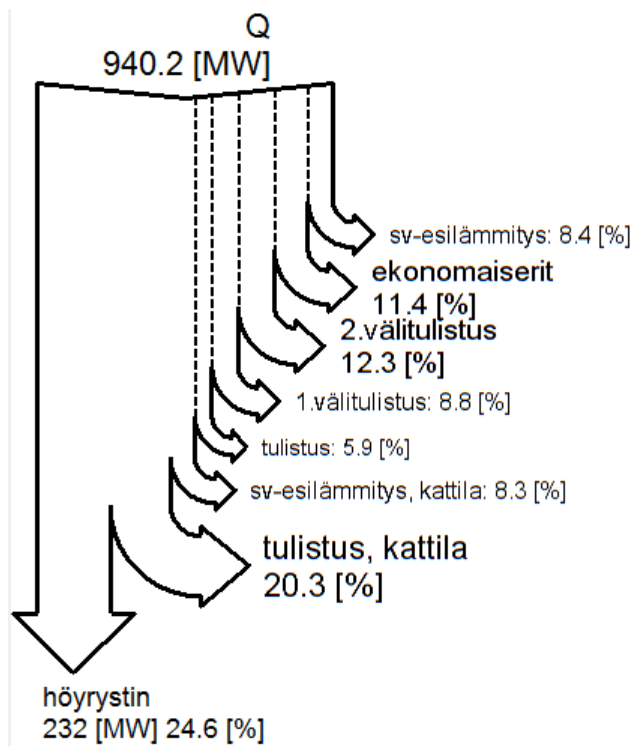
höyry	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q <sub>m</sub> [kg/s]	248,3	248,3	248,3	248,3	237,4	227,4	227,4	227,4	227,4	216,5
p [bar]	160,5	160,0	76,5	76,0	36,1	23,4	17,6	17,1	16,6	6,3
T [C]	519,2	600,0	472,9	610,0	484,3	419,5	379,2	537,2	610,0	462,8
höyry	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
q <sub>m</sub> [kg/s]	212,3	212,3	216,5	216,5	216,5	216,5	216,5	248,3	248,3	248,3
p [bar]	2,6	0,0	0,0	7,8	7,3	6,8	6,3	6,1	162,5	162,0
T [C]	345,0	31,0	24,7	24,8	45,4	111,8	124,1	159,8	162,7	192,2
höyry	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
q <sub>m</sub> [kg/s]	248,3	248,3	248,3	10,9	10,9	10,0	20,9	10,9	4,2	4,2
p [bar]	161,5	161,0	160,5	36,1	35,6	23,4	22,9	6,3	2,6	2,1
T [C]	215,5	239,3	300,4	484,3	220,5	419,5	197,2	492,8	345,2	116,8
ilmareaktorin savukaasu	31	32	33	34	35	36				
q <sub>m</sub> [kg/s]	298,0	298,0	298,0	298,0	298,0	298,0				
T [C]	982,0	827,7	722,1	477,9	244,3	50,4				
PA-reaktorin savukaasu	37	38	39	40						
q <sub>m</sub> [kg/s]	100,0	100,0	100,0	100,0						
T [C]	860,0	384,2	167,7	29,8						

Taulukkoon 8 on lueteltu kaikki voimalaitoksen savukaasulämmönsiirtimet ja niiden tehot. Teholla tarkoitetaan tässä tapauksessa lämmönsiirtimen siirtämää energiamäärää savukaasuista höyryyn/syöttöveeten. Lämmönsiirtimet a-e toimivat ilmareaktorin savukaasuilla ja f-h toimivat polttoainereaktorin savukaasuilla.

**Taulukko 8.** Savukaasulämmönsiirtimien tehot.

lämmönsiirrin	a	b	c	d	e	f	g	h
P [MW]	55.1	37	82.7	75.3	60.3	78.8	31.8	18.7

Kuvassa 9 olevasta Sankey- diagrammista voidaan havaita miten alikriittisessä prosessissa höyrypiiriin tuotava lämpöteho jakautuu kattilan ja lämmönsiirtimien kesken.



**Kuva 9.** Sankey – diagrammi tehon jakautumisesta lämmönsiirtopintojen kesken.

Kuvassa mainittu syöttöveden esilämmitys sisältää syve-säiliötä edeltävät savukaasulämmönsiirtimet ja ekonomaiserit sisältävät syöttövesipumpun jälkeiset lämmönsiirtimet.

## 5 TULOKSET

Tässä kappaleessa tarkastellaan laskennasta saatuja alustavia hyötysuhteita ja arvioidaan omakäyttöhäviöiden vaikutusta hyötysuhteeseen. Lopuksi saatuja tuloksia verrataan kilpaileviin teknologioihin.

### 5.1 Hyötysuhteet

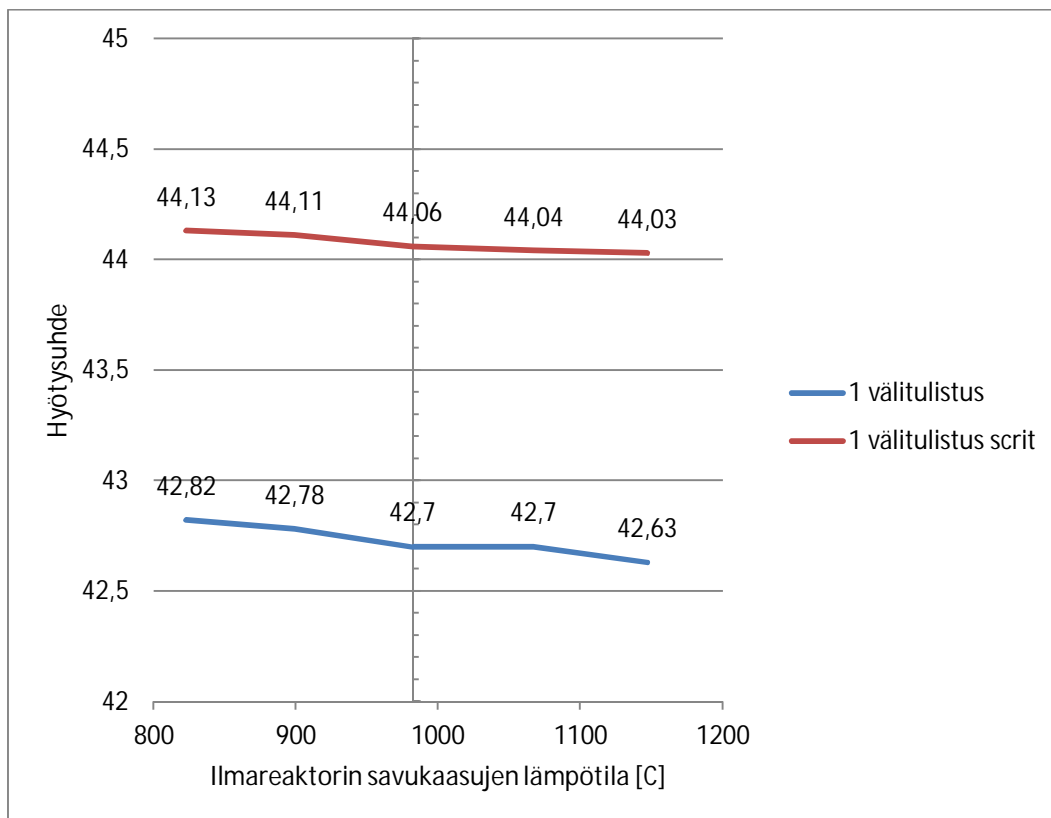
Tässä kappaleessa tarkastellaan IPSEprolla malleille saatuja hyötysuhteita. Tämä ei kuitenkaan vielä ota huomioon kaikkia laitoksen omakäyttöhäviöitä. Näiden häviöiden tarkastelu tehdään kappaleessa 5.2.

#### 5.1.1 Yhden välitulistuksen malli

Yhden välitulistuksen mallin prosessihyötysuhteeksi saadaan alikriittisillä höyrynarvoilla 42.7 % ja ylikriittisillä 44.06 %. Kyseiset hyötysuhteet saadaan kun ilmareaktorista otettava teho on 500MW ja savukaasulämpötila ilmareaktorissa 982 °C ja polttoainereaktorissa 860 °C.

Kuvassa 10 nähdään IPSEpro- mallin hyötysuhteen kehitys savukaasujen lämpötilan funktiona. Kuvassa punaisella nähtävä käyrä näyttää hyötysuhteen ylikriittisillä höyrynarvoilla, sininen käyrä alikriittisillä höyrynarvoilla. Kuvaajista nähdään että yhden välitulistuksen malli ei ole kovinkaan herkkä savukaasulämpötilojen muutoksille verrattuna kahden välitulistuksen malliin.

Paras hyötysuhde mallille saadaan ilmareaktorin lämpötehon ollessa 600MW ja savukaasulämpötilojen ollessa ilmareaktorissa 823 °C ja polttoainereaktorissa 708 °C. Kuvaa 10 tulkitsemalla voidaan olettaa, että ilmareaktorin tehoa kasvattamalla ja savukaasuja jäähdyttämällä olisi vielä mahdollista nostaa prosessin hyötysuhdetta. Tämän toteaminen vaatisi kuitenkin ylimääräisen laskennan suorittamista.

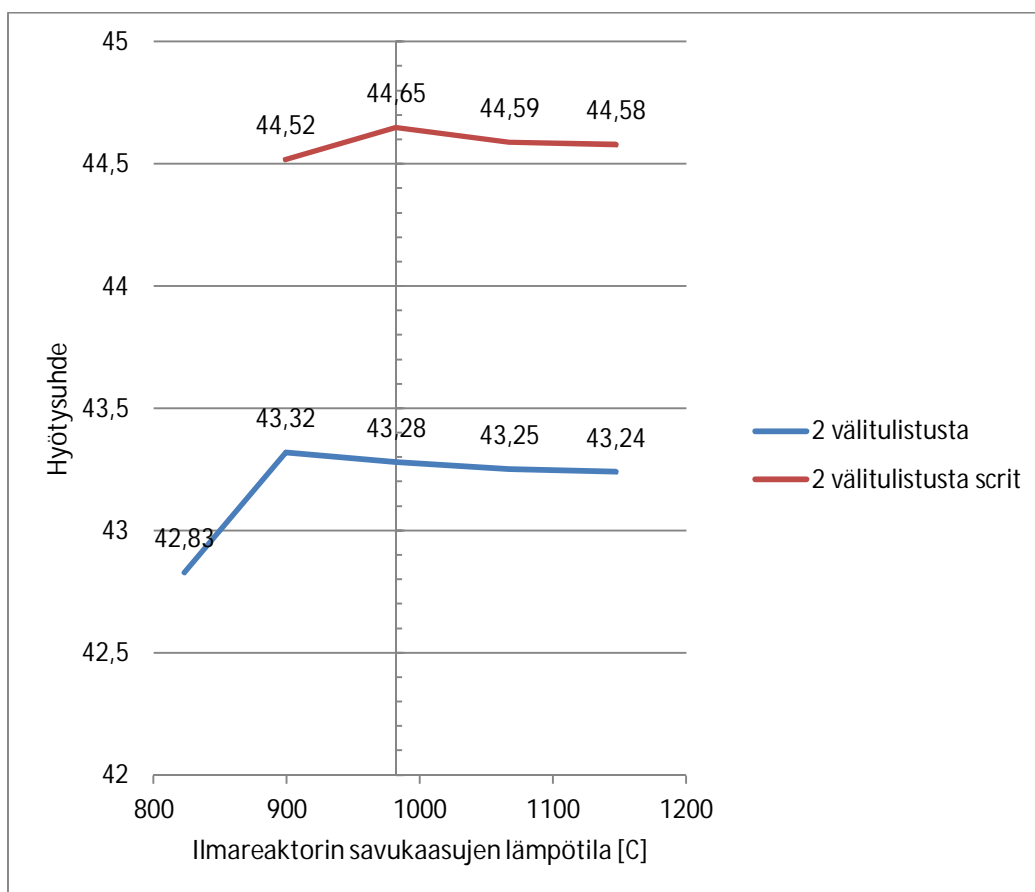


**Kuva 10.** Hyötysuhde savukaasulämpötilojen funktiona.

### 5.1.2 Kahden välitulistuksen malli

Kahden välitulistuksen mallin prosessihyötysuhteeksi saadaan alikriittisillä höyrynarvoilla 43.28 % ja ylikriittisillä 44.65 %. Kyseiset hyötysuhteet saadaan kun ilmareaktorista otettava teho on 500MW ja savukaasulämpötilat taulukon 2 mukaiset.

Kuvassa 11 nähdään savukaasujen lämpötilojen vaikutus hyötysuhteeseen. Punainen käyrä näyttää hyötysuhteen ylikriittisillä höyrynarvoilla, sininen alikriittisillä höyrynarvoilla.



**Kuva 11.** Hyötysuhde savukaasulämpötilojen funktiona.

Tuloksissa huomattavin ero yhden välitulistuksen malliin havaitaan ylikriittisessä prosessissa, jolle ei matalimmilla savukaasujen lämpötiloilla saada lainkaan tuloksia. Myös alikriittisessä prosessissa havaitaan notkahdus hyötysuhteessa matalilla savukaasujen lämpötiloilla. Käytännössä alhaisilla savukaasujen lämpötiloilla toimittaessa ensimmäinen savukaasutulistin siirtää hyvin vähän tai ei lainkaan lämpöä savukaasuista höyryyn. Tulistus tapahtuu silloin täysin kattilassa, ja kyseinen savukaasulämmönsiirrin on vain turha komponentti ilman lisähyötyä prosessille.

Hyötysuhteen kannalta kahden välitulistuksen prosessi on noin 0.5-0.6 prosenttiyksikköä parempi kuin yhden välitulistuksen malli.

## 5.2 Hiilidioksidin talteenoton vaikutus hyötysuhteeseen

Tulosten tarkasteluissa laskettu prosessihyötysuhde on laskettu yhtälöllä (3),

$$\eta = \frac{P_{el} - P_{pumput}}{\Phi_{pa}} \quad (3)$$

Jossa

$P_{el}$  on generaattorin sähköteho

$P_{pumput}$  on pumppujen tarvitsema teho

$\Phi_{pa}$  on polttoaineteho

Yllä olevalla tavalla laskettu prosessihyötysuhde sopii hyvin IPSEpro- mallien keskinäiseen vertailuun, mutta IPSEpro-mallissa ei ole erikseen mallinnettu hiilidioksidin talteenoton vaatimaa tehoa tai petimateriaalin leijutukseen tarvittavaa puhallintehoa. Jotta prosessia voidaan verrata suoraan muihin hiilidioksidin talteenottomuotoihin, on mainitut häviöt vähennettävä prosessihyötysuhteesta.

0-D mallin avulla pystytään laskemaan puhallinhäviö. Puhaltimen hyötysuhteen ollessa 90 %, saadaan ilmareaktorin puhallintehoksi 8,3 MW ja polttoainereaktorin puhallintehoksi 3,6 MW. Hiilidioksidin puristaminen 110bar paineeseen kuljetusta varten vaatii noin 0.4 GJ/tCO<sub>2</sub> (Metz et al., 2005). Hiilidioksidin massavirta savukaasuissa on 55 kg/s, tällöin hiilidioksidin puristamiseen tarvittavaksi tehoksi saadaan 22MW. Todellisessa prosessissa savukaasuihin pääsee myös vuotoilmaa ja hiilidioksidin erottamiseen savukaasuista tarvitaan erillinen laitteisto. Tässä tarkastelussa ei kuitenkaan vielä oteta huomioon hiilidioksidin erottamiseen kuluva energiaa.

Kun puhaltimen ja hiilidioksidin puristamisen aiheuttamat tehohäviöt otetaan huomioon, tulee yhden välitulistuksen mallin prosessihyötysuhteeksi 39,2 % alikriittisessä tapauksessa ja 40,5 % ylikriittisessä tapauksessa. Kahden välitulistuksen mallin hyötysuhteeksi alikriittiselle prosessille tulee 39,7 % ja ylikriittiselle 41,1 %.

### 5.3 Kilpailevat teknologiat

Vaikka tässä kandityössä käsitelty esimerkkivoimalaitos käyttää polttoaineenaan maakaasua, on CLC- teknologiaa kehitettäessä ollut tarkoitus luoda edellytykset

kiinteän polttoaineen käytölle. (Lyngfelt 2013). Kiinteän polttoaineen käyttö kemikaalikiertopoltossa mahdollistaisi kilpailun vallitsevien hiilidioksidin talteenottomuotojen kanssa. Tästä syystä CLC- teknologiaa ei tulla vertaamaan ainoastaan maakaasua hyväksikäyttäviin hiilidioksidin talteenottoteknologioihin kuten IGCC, vaan myös tavanomaisiin hiiltä polttaviin voimalaitoksiin ja niiden kanssa yhteensopiviin hiilidioksidin talteenottomuotoihin kuten polton jälkeinen talteenotto ja happipolttot.

### 5.3.1 USC

Ylikriittiset höyryvoimalaitokset (SC, Supercritical) jotka toimivat tyypillisesti 540 °C lämpötilassa ja 25 MPa paineessa ovat olleet käytössä jo useita vuosia Euroopassa. Parhaalla mahdollisella teknologialla on mahdollista saavuttaa vielä korkeampia höyrynarvoja. Nämä kehittyneet ylikriittiset höyryvoimalaitokset (USC, Ultra-Supercritical) pystyvät saavuttamaan 600 °C lämpötilan ja 30 MPa:n paineen. Nyt jo käytössä olevista USC- laitoksista Nordjyllandsværketin kolmosyksikkö Tanskassa pystyy saavuttamaan 47 % sähköntuotantohyötysuhteen. USC- laitokset ovatkin tulevaisuudessa varteenotettava vaihtoehto kun harkitaan hiiltä polttavan voimalaitoksen rakentamista. (EU, 2011).

IPCC:n raportissa Carbon dioxide capture and storage (2005) on tehty arviointeja useiden nykyisten USC- laitosten muuttamisesta CCS- yhteensopiviksi käyttämällä polton jälkeistä hiilidioksidin talteenottoa. Kyseisten laitosten hyötysuhteet (LHV) ennen hiilidioksidin talteenottoa ovat välillä 40.9–44.8 %. Hiilidioksidin talteenoton vaatima energia nostaa prosessin kuluttamaa energiamäärää 26–40 %, mikä käytännössä laskee prosessihyötysuhteita 8-12 prosenttiyksikön verran. CCS- tekniikkaa käyttävien laitoksien hyötysuhde putoaakin välille 30.1–35.4 %. (Metz et al., 2005).

### 5.3.2 IGCC

Kaasutukseen perustuvat kaasukombivoimalat käyttävät tyypillisesti polttoa edeltävää hiilidioksidin talteenottoa. Polttoaineenaan hiiltä käyttävä IGCC pystyy saavuttamaan 38–47 % hyötysuhteen. Hiilidioksidin talteenoton kanssa hyötysuhteeksi saadaan 31–40 %. (Metz et al., 2005).



### 5.3.3 NGCC

Maakaasukombivoimalat (Natural gas combined cycle, NGCC) koostuvat maakaasun polttamiseen tarvittavasta kaasuturbiinista ja savukaasuista lämmön talteen ottavasta höyrypiiristä. Tämän maakaasua polttoaineena käyttävän kombivoimalaitoksen hyötysuhteet liikkuvat välillä 55–58 %. Kun laitokseen lisätään polton jälkeinen hiilidioksidin talteenotto, hyötysuhde putoaa välille 47–50 %. (Metz et al., 2005).

### 5.3.4 Happipoltto

Happipolttoa voidaan yhdistää moniin erilaisiin voimalaitosratkaisuihin. Kun tarkastellaan happipoltolla saavutettavaa hyötysuhdetta, riippuu se hyvin voimakkaasti siitä voimalaitostyypistä mihin happipoltto on lisätty. Uusi pölypoltolla toimiva hiilivoimalaitos, jonka hyötysuhde on 44.2 %, voi saavuttaa talteenoton kanssa 35.4 % hyötysuhteen. Hiiltä polttava CFB- laitos jonka hyötysuhde on 37 % saavuttaa talteenoton kanssa vaatimattoman 25.8 % hyötysuhteen. Happipolttoa käyttävä NGCC jonka hyötysuhde on 56 % voi sen sijaan saavuttaa jopa 44.7 % hyötysuhteen talteenoton kanssa. (Metz et al., 2005).

## 6 YHTEENVETO

Hyötysuhteilla mitattaessa voidaan havaita että suunniteltu kemikaalikiertopolttoa hyväksikäyttävä voimalaitos pystyy saavuttamaan kilpailukykyisen hyötysuhteen muihin CCS- tekniikoihin verrattuna. Hiiltä polttaviin voimalaitosratkaisuihin verrattuna kemikaalikiertopoltto tarjoaa aina yhtä hyvän tai paremman hyötysuhteen kuin olemassa olevat teknologiat. On kuitenkin otettava huomioon että esimerkki voimalaitos on suunniteltu toimimaan maakaasulla. Siirtyminen kiinteisiin polttoaineisiin tulee todennäköisesti vaikuttamaan laitoksen hyötysuhteeseen.

Maakaasua käyttäviin kaasukombivoimalaitoksiin verrattuna kemikaalikiertopoltto ei pysty saavuttamaan yhtä hyvää hyötysuhdetta. Toisaalta kyseiset laitokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia, sillä esimerkiksi NGCC:lle ilmoitettu hyötysuhde on sähkön- ja lämmöntuotannon yhteinen hyötysuhde, kun taas tässä kandidityössä käsitelty voimalaitos on puhtaasti sähköntuotantoon rajattu.

On muistettava että tässä kandidityössä suunniteltu IPSEpro-malli on alustava ehdotus mahdolliseksi voimalaitosprosessiksi. Esimerkiksi savukaasulämmönsiirtimien järjestystä suunniteltaessa ei ole kiinnitetty suurta huomiota kyseisten järjestelyiden monimutkaisuuteen tai järkevyyteen. Jatkokehitystä suoritettaessa olisikin hyvä kiinnittää enemmän huomiota kattiloiden dimensioista johtuvien rajoitteiden huomioimiseen. Lisäksi IPSEpro:lla suoritettun laskennan tarkkuutta voitaneen lisätä korvaamalla käytetty kattilakomponentti useilla erillisillä lämmönsiirtimillä, jolloin voidaan tarkemmin määrätä höyrystimen ja tulistimien lämpötehot.

## LÄHDELUETTELO

Lyngfelt, A., Leckner, B., Mattisson, T. (2001). A fluidized-bed combustion process with inherent CO<sub>2</sub> separation; application of chemical-looping combustion. *Chemical Engineering Science*, 56: 3101 – 3113.

Lyngfelt, Anders (2013). Chemical-looping combustion of solid fuels – Status of development. *Energy Procedia*, Volume 37, 2013, sivut 608–617.

Bolhàr-Nordenkamp, J., Pröll, T., Kolbitsch, P., Hofbauer, H. (2008). Comprehensive Modeling Tool for Chemical Looping Based Processes. *Chemical Engineering & Technology*. 2009, 32, No. 3, 410 – 417.

Pröll, T., Kolbitsch, P., Bolhàr-Nordenkamp, J., Hofbauer, H. (2009). A Novel Dual Circulating Fluidized Bed System for Chemical Looping Processes. *AIChE Journal*, December 2009, Vol. 55, No. 12, 3255 – 3266.

Simtech, 2003a. Manual Version 4.0.001. IPSEpro Model Development Kit. 2003. SimTech.

Simtech, 2003b. Manual Version 4.0.002. Advanced Power Plant Library. 2003. SimTech.

Simtech, 2003c. Manual Version 4.0.002. IPSEpro-PSOptimize. 2003. SimTech.

Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M., Meyer, L., (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press. Intergovernmental Panel on Climate Change 2005. 431 sivua. ISBN-13 978-0-521-86643-9.

Peltola, Petteri (2009). Model-based study of a chemical-looping combustion process. Diplomityö. Lappeenranta University of Technology, LUT Energia, Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 68 sivua.

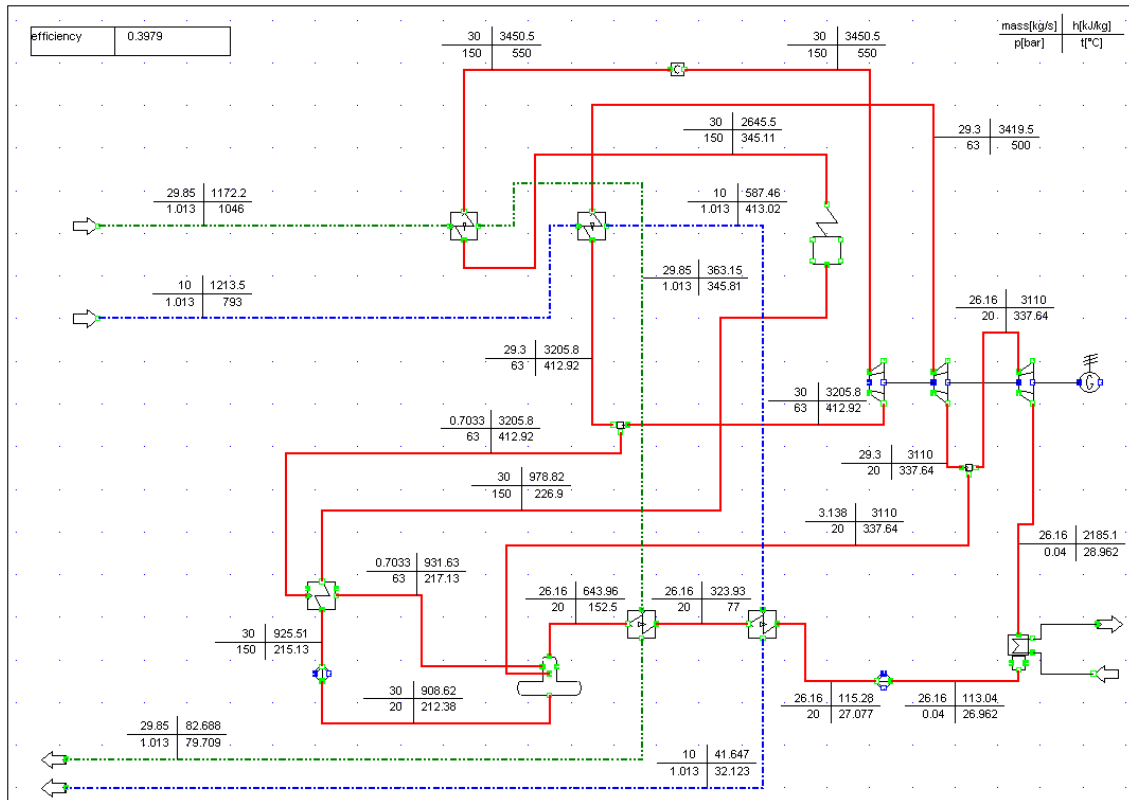
EU (2011). 2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan. Technology Descriptions. 2011. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 178 s. ISSN 1018-5593.

Otsuka, T., Kaneko, M., (2007). Development History and Operation Experience of Ultra-Supercritical (USC) Power Plants. International Conference on Power Engineering, October 23-27, 2007, Hangzhou, China, 214 – 218.

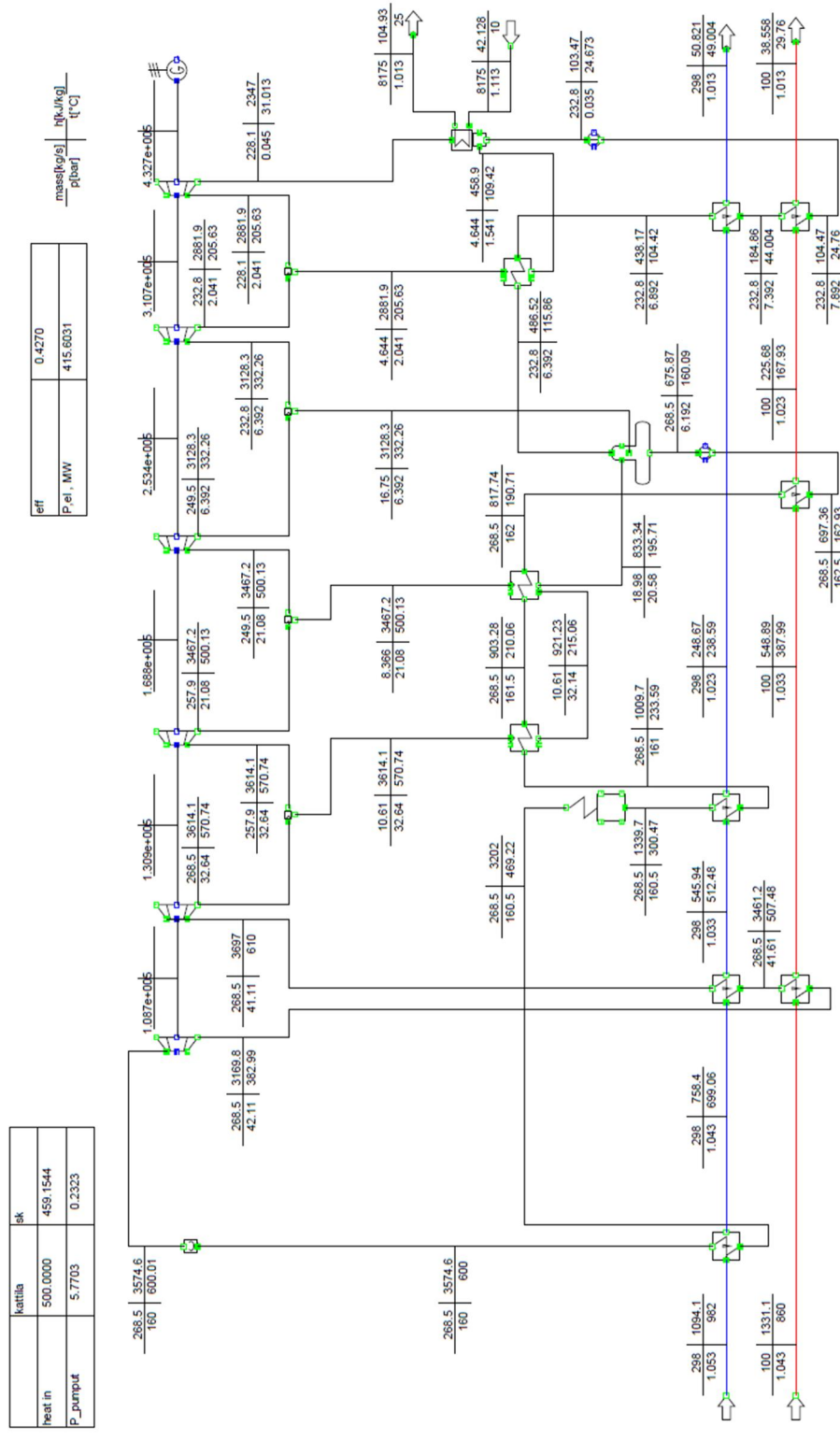
Kaikko, Juha (2013). Tutkimusjohtaja, LUT energia. Lappeenranta. Haastattelu, 18.11.2013.

# LIITTEET

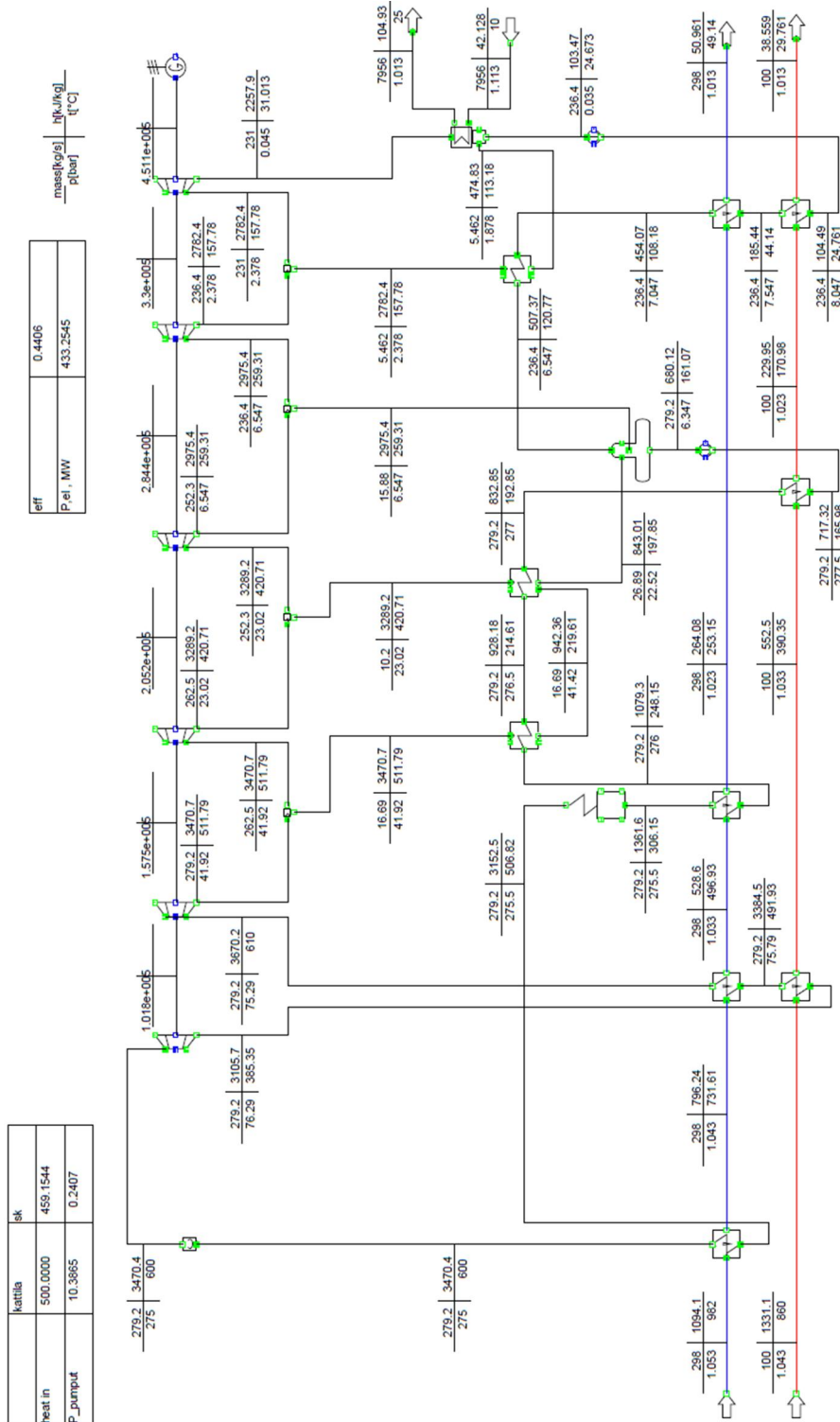
## Liite 1. Alustava IPSEpro- malli



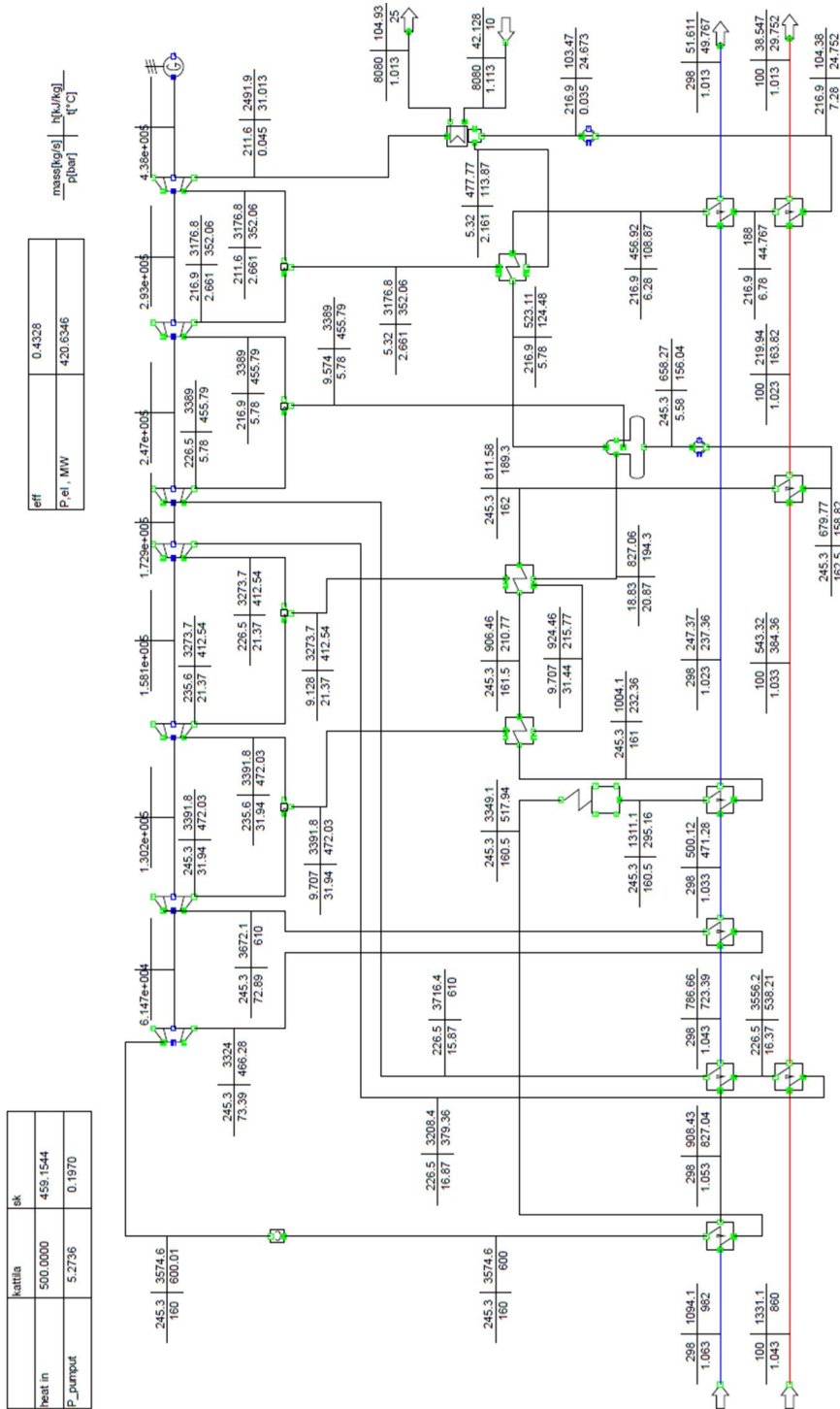
Liite 2a. IPSEpro- prosessikaavio yhden välitulistuksen mallista alikriittisillä höyrynarvoilla.



Liite 2b. IPSEpro- prosessikaavio yhden välitulituksen mallista ylikriittisillä höyrynarvoilla.



Liite 3a. IPSEpro- prosessikaavio kahden välitulistuksen mallista alikriittisillä höyrynarvoilla.





Liite 3b. IPSEpro-prosessikaavio kahden välitulituksen mallista ylikriittisillä höyrynarvoilla.

