



TEKNIikka JA LIIKENNE

Kone- ja tuotantotekniikka

Energia- ja ympäristötekniikka

INSINÖÖRITYÖ

LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILAN SUUNNITTELU

**Työn tekijä: Yves Mujiyambere
Työn ohjaaja: Markku Laukka**

Työ hyväksytty: ____ . ____ . 2012

Lehtori Markku Laukka



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoulun energia- ja ympäristötekniikan osastolla. Tarkoituksena oli suunnitella lämmöntalteenottokattila ja laskea lämpöenergia, joka siirtyy kaasuturbiinilta lähtevistä savukaasuista höyryvesiprosessiin.

Haluan kiittää teitä kaikkia, jotka olette auttaneet minua tämän työn tekemisessä alusta loppuun saakka. Erityisesti tahdon kiittää opettajiani ohjauksesta, neuvoista ja korjauksista.

Kiitän myös teitä, jotka olette kannustaneet minua tähän opiskeluun.

Helsingissä 10.2.2012

Jean Yves Mujiyambere

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Jean Yves Mujiyambere	
Työn nimi: Lämmöntalteenottokattilan suunnittelu	
Päivämäärä: 10.2.2012	Sivumäärä: 33s. + 7 liitettä
Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Energia- ja ympäristötekniikka
Työn ohjaaja: Lehtori Markku Laukka	
Insinööriyön tarkoitus oli suunnitella lämmöntalteenottokattila ja laskea lämpöenergia, joka siirtyy kaasuturbiinilta tulevista savukaasuista vesihöyryprosessiin. Lämmönsiirron laskemisessa käytettiin Helsingin Energian Vuosaari B: n voimalaitoksen kattilaa, joka toimii kahdella painetasolla. Kattila on Foster Wheelerin valmistama. Ennen varsinaisen lämmönsiirron laskemista käytiin läpi teoreettista tietoa liittyen kombiprosessin toimintaan, lämmöntalteenottokattilan pääkomponentteihin, suunnitteluun vaikuttaviin tekijöihin ja lämmöntalteenottokattilan sovelluskohteisiin. Kombiprosessi koostuu kahdesta osasta eli kaasuturbiini- ja vesihöyryprosesseista, jotka on liitetty toisiinsa lämmöntalteenottokattilan kautta. Lämmöntalteenottokattila koostuu mm. ekonomaizerista, lieriöstä, höyrystimestä ja tulistimesta. Lämmöntalteenottokattilan suunnitteluun vaikuttavat mm höyryn lämpötila ja paine, painetasojen lukumäärä, savukaasupuolen painehäviö, lämmöntalteenottokattilan mittausparametrit ja lämmöntalteenottokattilatyypit. Lämmöntalteenottokattilan sovelluskohteet ovat kombiprosessin lisäksi moottorivoimalaitos, teollisuusvoimalaitos ja kaukolämpövoimalaitos. Lämmön siirrosta laskettiin ensin savukaasujen sisältämä lämpöenergia. Sen jälkeen laskettiin lämpöenergia, joka on siirretty korkeapainetason tulistimeen, höyrystimeen ja ekonomaizeriin. Sitten laskettiin lämpöenergia, joka on siirretty matalapainetason tulistimeen, höyrystimeen ja ekonomaizeriin. Lopuksi laskettiin lämpöenergia, joka on siirretty kaukolämmönvaihtimiin.	
Avainsanat: lämmöntalteenottokattila, kombiprosessi, kaasuturbiini, höyryturbiini	

ABSTRACT

Name: Jean Yves Mujiyambere	
Title: Modelling of Heat Recovery Steam Generator	
Date: 10 February 2012	Number of pages: 33 p + 7 appendices
Department:	Study Programme:
Mechanical Engineering	Energy Engineering and Environmental Technology
Instructor: Lecturer Markku Laukka	
Supervisor: Lecturer Markku Laukka	
The objective of this Bachelor's thesis was to model a heat recovery steam generator, HRSG and to calculate the heat energy which is transferred from gas turbine's exhaust gases into water/steam process. The model is made to meet the characteristics of HRSG, and works on two pressure levels at Vuosaari B power plant owned by Helsinki Energy. The HRSG is manufactured by Foster Wheeler. Firstly, before beginning the proper heat transfer calculation the theoretical knowledge about the combine cycle function, the HRSG's major components, the factors affecting modelling and the HRSG's use applications were analysed. A combine process consists of two processes which are a gas turbine- and a water/ steam process. The connection between those two processes is made by the HRSG. The major components of HRSG are an economizer, an evaporator and a superheater. The factors affecting the HRSG's modelling are the temperature and pressure of steam, the number of pressure levels, pressure loss on exhaust gases' side, measurement parameters and the HRSG's different types. In addition to a combined- cycle power station, the HRSG is also used in diesel engine combined- cycle power plant, in cogeneration plants and in industrial power plants. First of all, heat energy contained in exhaust gases was calculated. Then after the transferred heat energy respectively in superheater, evaporator and economiser were calculated both at high- and low pressure levels. And finally, the transferred heat energy in two districts heating shifters was calculated.	
Keywords: Heat Recovery Steam Generator, HRSG, combined cycle, gas turbine, steam turbine	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

MERKINTALUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	KOMBIPROSESSI	2
2.1	Kaasuturbiiniprosessi	3
2.1.1	<i>Kaasuturbiinin polttoaineet</i>	5
2.1.2	<i>Palamisyhtälöt</i>	6
2.2	Höyryvoimaprosessi	6
2.3	Lämmöntalteenottokattila	8
2.3.1	<i>Yhden painetason lämmöntalteenottokattila</i>	9
2.3.2	<i>Kahden painetason lämmöntalteenottokattila</i>	12
2.3.3	<i>Lisäpoltolla varustettu lämmöntalteenottokattila</i>	14
3	LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILAN PÄÄKOMPONENTIT	15
3.1	Ekonomaiseri	15
3.2	Lieriö	16
3.3	Höyrystin	17
3.4	Tulistin	19
4	LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILAN SUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	19
4.1	Lämmöntalteenottokattilatyypin valinta	20
4.2	Lämmöntalteenottokattilan mitoitusparametrit	20
4.3	Höyryn paine ja lämpötila	21
4.4	Painetasojen lukumäärä	22
4.5	Savukaasupuolen painehäviö	22
5	LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILOIDEN KÄYTTÖSOVELLUKSET	23
5.1	Moottorivoimalaitos	23
5.2	Teollisuusvoimalaitos	23
5.3	Kaukolämpövoimalaitos	24

6	LÄMMÖNSIRRON LASKEMINEN	25
6.1	Kattilan toiminta-arvot	25
6.2	Savukaasun analysointi	26
6.3	Kattilassa siirretty lämpöteho	29
6.4	Kattilasta talteenotettu lämpötehon kokonaismäärä	31
7	YHTEENVETO	32
	LÄHTEET	33
	Liite 1. Polttoaineanalyysin ja stökiometrinen palamisen taulukot	
	Liite 2. Savukaasujen ja siirretyn lämpötehon taulukot	
	Liite 3. Lämmöntalteenottokattilan lämpödiagrammi ja savukaasujen lämpötila eri pisteissä.	
	Liite 4. Lämmöntalteenottokaavio korkeapainetasossa	
	Liite 5. Lämmöntalteenottokaavio matalapainetasossa	
	Liite 6. Lämmöntalteenottokaavio kuumassa vaihtimessa	
	Liite 7. Lämmöntalteenottokaavio kylmässä vaihtimessa	

MERKINTALUETTELO

Merkintä	Selitys	Yksikkö
A	pinta-ala	m ²
Δ	ero	-
Δp	painehäviö	bar, kPa
h	entalpia	kJ/kg
H _{mt}	tuntuva entalpia	kJ/kmol
H _u	lämpöarvo	MJ/m ³
L _{min}	teoreettinen palamisilmantarve	m ³ /m ³
λ	ilmankerroin	-
m	massaosuus	kg
M	moolimassa	kg/mol
N	mooli	mol
p	paine	bar, kPa
P	teho	MW
ρ	tiheys	kg/m ³
q _m	massavirta	kg/s
q _n	moolivirta	mol/s
Q	lämpöteho	MW
S	entropia	J/K
T	lämpötila	°C, K
t	aika	s
V _{min} ^{tr}	teoreettinen palamisilman tarve	m ³ /m ³
x	höyrypitoisuus	-
X	mooliosuus	-

Alaindeksi	selitys
CO ₂	hiilidioksidi
eko	ekonomaiseri
HRSG	Heat Recovery Steam Generator
H ₂ O	vesi
g	gas
höyry	höyrystin
i	ilma
kuuma	kuuma vesi
kylmä	kylmä vesi
koko	kokonaismäärä
KL	kaukolämpö
KP	korkeapaine
m	vedyn atomien määrä
mk	maakaasu
MP	matalapaine
n	hiilen atomien määrä
N ₂	typpi
O ₂	happi
Pa	polttoaine
PP	pinch point, jossa höyrystyvän veden ja savukaasujen lämpötilojen ero on pienimmillään
syve	syöttövesi
sv	savukaasu
t	tulistin
th	tuore höyry
tulist	tulistin
v	vesi

1 JOHDANTO

Energiavoimalaitoksessa pyritään savuttamaan paras mahdollinen hyötysuhde ja ottamaan hukkalämpö höytykäyttöön. Lämmöntalteenottokattilan käyttö on paras keino savuttaa näitä tavoitteita.

Tämän työn tarkoitus oli suunnitella lämmöntalteenottokattila ja laskea lämpöenergia, joka siirtyy kaasuturbiinilta lähtevistä savukaasuista höyryvesiprosessiin. Tässä suunnitelmassa pyritään kartoittamaan mahdollisimman monet erilaiset tekijät, jotka vaikuttavat lämmöntalteenottokattiloiden suunnittelussa, rakenteessa ja mitoituksessa. Sen lisäksi tutkitaan lämmöntalteenottokattiloiden eri käyttökohteita. Mitoituksessa käytettiin esimerkkinä Vuosaaren voimalaitoksen lämmöntalteenottokattilaa.

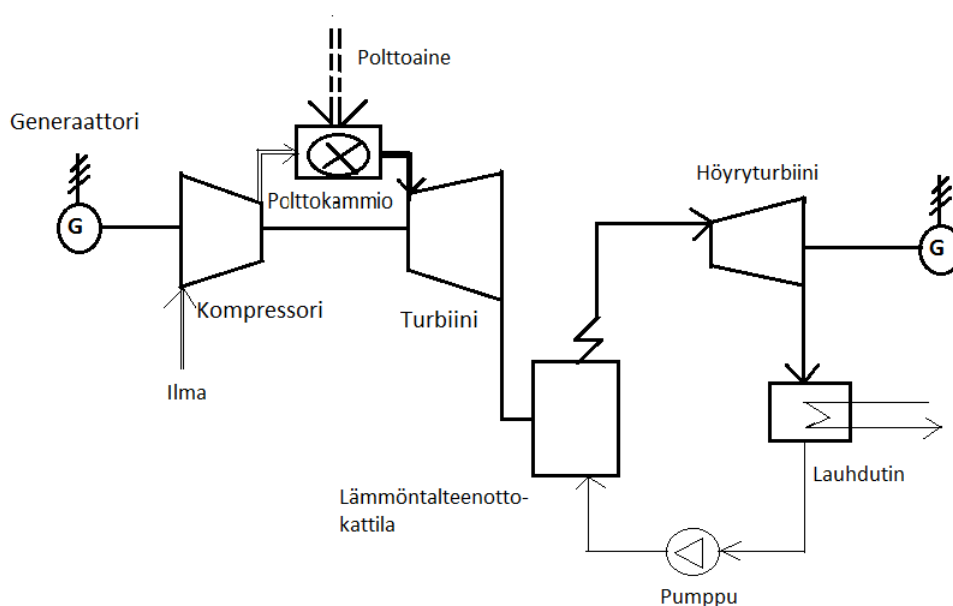
Työssä käydään läpi tärkeimmät lämmöntalteenottokattiloiden suunnitteluun, rakenteeseen ja mitoitukseen vaikuttavat tekijät. Lisäksi tutkitaan lämmöntalteenottokattiloiden eri sovellus-/käyttökohteita, ja lähtökohtaisena esimerkkinä on käytetty Vuosaaren voimalaitoksen lämmöntalteenottokattilan perusmitoitusta.

Tavoitteena oli tarkastella kaasuturbiinien jälkeisten kuumien savukaasujen lämmöntalteenottoon tarkoitettuja kattiloita eli lämmöntalteenottokattiloita. Työssä keskityttiin lämmön siirron toimintaperiaatteeseen lämmöntalteenottokattilan eri osissa: tulistimessa, höyrystimessä ja veden esilämmityksessä. Ennen lämmön siirron laskemista tarkasteltiin kaasuturbiinin polttokammiossa poltettua polttoainetta (maakaasua). Analysoitiin ja laskettiin kaasuturbiinista lähtevien savukaasujen koostumus ja niiden sisältämä lämpöenergia.

2 KOMBIPROSESSI

Kombiprosessilla tarkoitetaan prosessia, jossa kaksi- tai useampiterminen prosessi liitetään toisiinsa. Yleisimmin lämpö tuodaan kombiprosessin ensimmäisessä kiertoprosessissa ja syntyvä jätelämpö käytetään hyväksi seuraavissa, matalammissa lämpötilatasoissa toimivissa prosesseissa.

Tässä tapauksessa kombiprosessi koostuu kahdesta osasta: kaasuturbiinista ja siihen lämmöntalteenottokattilan avulla liitetystä höyryvoimaprosessista. Lämmöntalteenottokattilassa käytetään hyväksi kaasuturbiinin jälkeisten kuumien savukaasujen suuri lämpötila. Kaasuturbiiniprosessi toimii korkeammalla lämpötilatasolla kuin höyryvoimaprosessi, joten kombiprosessin lämpötilaero suurenee ja samalla prosessin kokonaishötytsuhde kasvaa. Prosessin periaate on esitetty kuvassa 2-1.



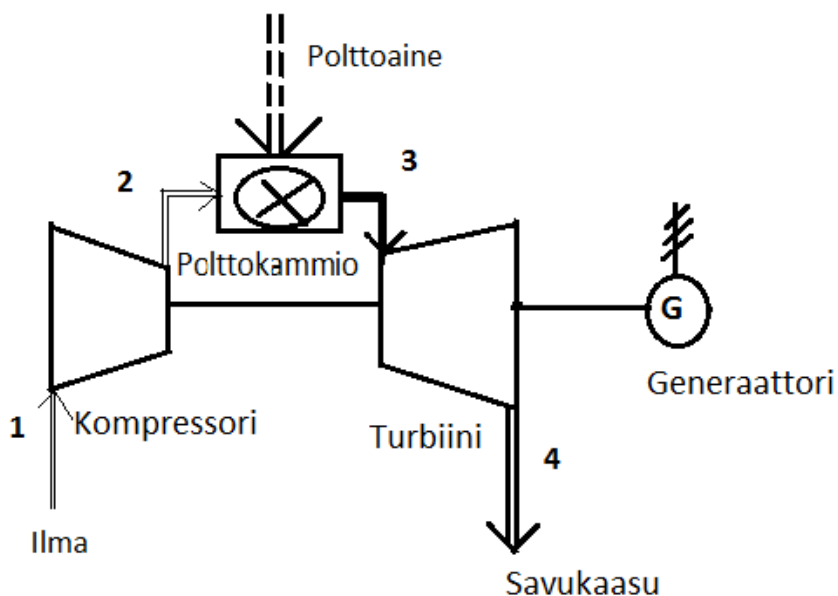
Kuva 2-1. Kombiprosessi.

Kombivoimalaitoksella on useita erilaisia prosessivaihtoehtoja. Laitokset voidaan luokitella esimerkiksi tarkastelemalla höyryprosessia tai sitä, onko kyseessä lauhdutussähköntuotanto, yhdistetty kaukolämmön ja sähköntuotanto vai jokin muu. Laitoksen jaottelua voidaan tarkentaa ottamalla huomioon mm. kaasuturbiiniprosessin polttoaineet, turbiinien määrä kytkennässä tai höyryn välitulistus. /6./

2.1 Kaasuturbiiniprosessi

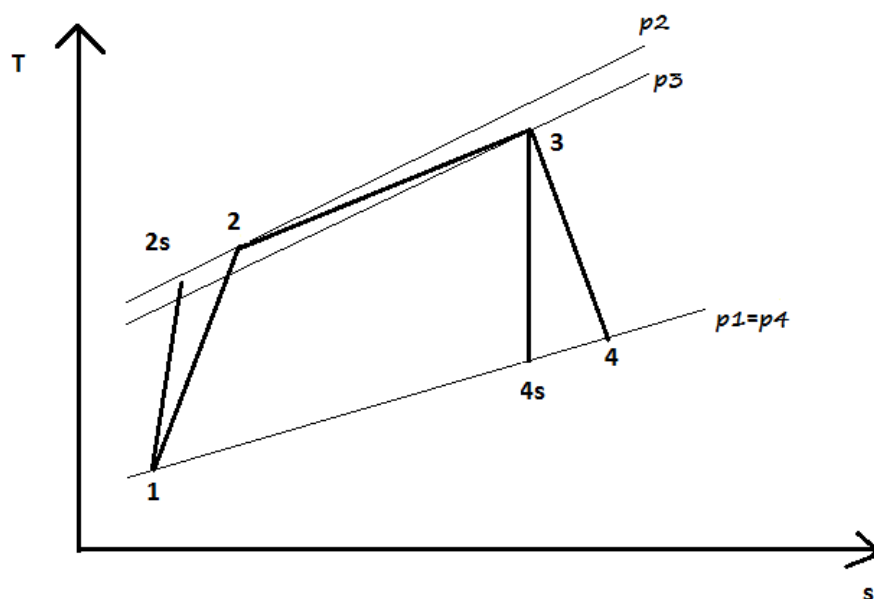
Kaasuturbiinilaitos koostuu kompressorista, polttokammioista, turbiinista ja kompressorista. Kompressorissa palamisilman painetta nostetaan 10–20 kertaiseksi, jolloin kompressorin jälkeinen ylipaine on 10–20 bar. Polttoaine ja paineistettu ilma palavat, ja kuumat savukaasut johdetaan edelleen turbiinille, jossa savukaasun paine ja lämpötila laskevat. Vapautuva energia käytetään turbiinin kanssa samalle akselille asennetun kompressorin ja generaattorin pyörittämiseen.

Kuvan 2-2 mukainen kaasuturbiiniprosessi etenee seuraavasti: Kompressor imee ilmaa ympäristöstä ja puristaa sen korkeaan paineeseen. Paineistettu ilma ja polttoaine sekoitetaan polttokammiossa, jossa palaminen tapahtuu vakioaineessa. Kuuma ja korkeapaineinen savukaasu johdetaan turbiinille, jossa savukaasu paisuu ja sen sisältämä energia muunnetaan turbiinin siipien avulla mekaaniseksi työksi. Suurin osa turbiinin tuottamasta työstä menee kompressorin käyttämiseen, noin kolmannes turbiinin työstä voidaan käyttää esim. generaattorin pyörittämiseen. /1./



Kuva 2-2. Avoin kaasuturbiiniprosessi.

Kaasuturbiiniprosessi on piirretty kuvassa 2-3 T, s -tasoon. Kuvaajassa on otettu huomioon puristus- ja paisuntaprosessien häviöt. Välillä 1–2 kompressor puristaa ilmaa, välillä 2–3 tapahtuu miltei vakiopaineinen palaminen, painehäviö $\Delta p = p_2 - p_3$, polttokammiossa. Välillä 3–4 savukaasu paisuu turbiinissa pyörittäen sitä. Tarkasti ottaen puristusprosessin alkupaine p_1 ja paisunnan loppupaine p_4 eivät ole samoja, koska painehäviöitä tapahtuu myös välillä 4–1. Todellisuudessa prosessia ei voi piirtää yhteen kuvaajan, koska työaine ei ole sama koko prosessissa. /1./



Kuva 2-3. Avoin kaasuturbiiniprosessi T, s -tasossa.

2.1.1 Kaasuturbiinin polttoaineet

Kaasuturbiineissa on käytetty polttoaineena maakaasua tai joissakin tapauksissa polttoöljyä. Maakaasun koostumus vaihtelee tuotantoalueittain. Suomessa käytetään Länsi-Siperiassa tuotettua maakaasua, joka on hyvin puhdasta ja tasalaatuista. Se sisältää 98 %:sesti metaania, loppu 2 % koostuu pääasiassa etaanista ja tyypestä. Suomessa käytetty maakaasu ei käytännössä sisällä lainkaan rikkiä. (taulukko 2-1.)

Kiinteiden polttoaineiden käyttämisestä kaasuturbiinin polttoaineena on tutkittu viime aikoina. Päätapoja kiinteän polttoaineen käyttöön on kaksi: polttaminen paineistetussa kattilassa ja savukaasujen puhdistus tai polttoaineen kaasutus ennen kaasuturbiinin polttokammiota. Kiinteätä polttoainetta voidaan polttaa paineistetussa leijupetikattilassa, jolloin polttoaineena voidaan käyttää mm. hiiltä. Tällaista kattilaa kutsutaan PFBC- kattilaksi (Pressurized Fluidized Bed Combustion). Savukaasut puhdistetaan leijutushiekasta ja muista epäpuhtauksista ennen niiden johtamista turbiiniin.

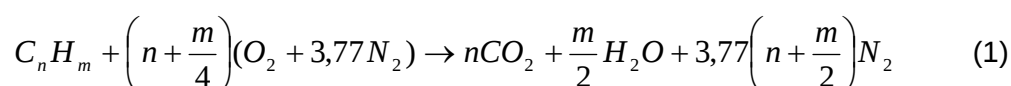
Kiinteäpolttoaineen kaasutuksella tarkoitetaan prosessia, jossa polttoaine muunnetaan palaviksi kaasuiksi, mm vety ja hiilimonoksidi, korkeassa lämpötilassa. Kaasutus poikkeaa palamisesta vähäisen happimäärän osalta, näin polttoaine ei voi palaa kaasutusreaktorissa. Kaasutusreaktorilla varustettua kaasuturbiinia kutsutaan IGCC-voimalaitokseksi (integrated Gasification Combined Cycle). Kaasutustapoja on useita: polttoaine voidaan joko kaasuttaa osittain, jolloin kaasuuntumatta jäänyt osa poltetaan erillisessä kattilassa tai polttoaine kaasutetaan kokonaan. Kummassakin tekniikassa tuotettu kaasu on puhdistettava ennen syöttämistä polttokammioon. Kaasuttimet voivat olla rakenteeltaan leijukerros-, kiinteäkerros- tai pölyreaktoreita. /1./

Taulukko 2-1. Venäjällä Urengoissa tuotetun maakaasun koostumus. /3./

Komponentti	Tilavuusosuus [%]
Metaani CH ₄	97,9
Etaani C ₂ H ₆	0,8
Propani C ₃ H ₈	0,2
Butaani C ₄ H ₁₀	0,1
Typpi N ₂	0,9
Hiilidioksidi CO ₂	0,1

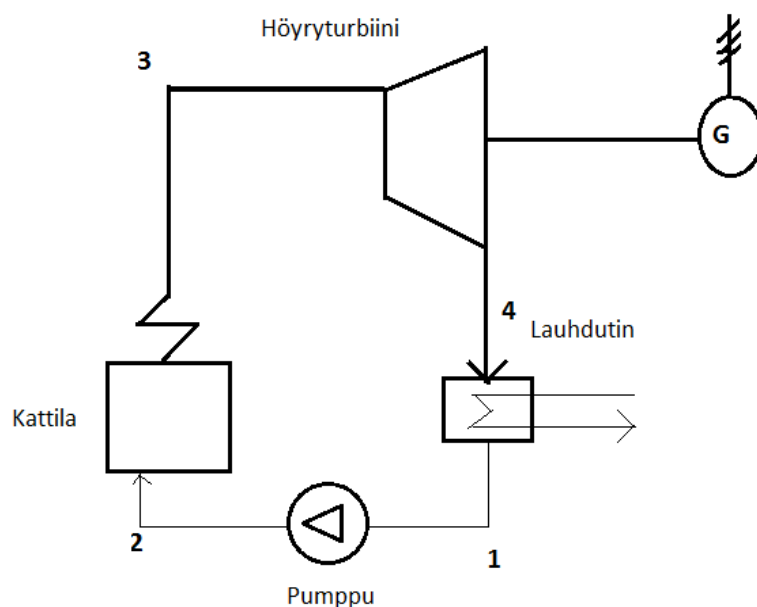
2.1.2 Palamisyhtälöt

Kun polttoaineen koostumus tiedetään, saadaan savukaasujen koostumus laskettua palamisyhtälöiden avulla. Laskennassa voidaan käyttää ideaalikaasuoletusta, eli kaasuseoksen mooliosuudet ovat yhtä suuret kuin tilavuusosuudet. Kaasut ovat pääasiassa tyypeä joten raakatypelle voidaan käyttää typen aineominaisuuksia. /3./



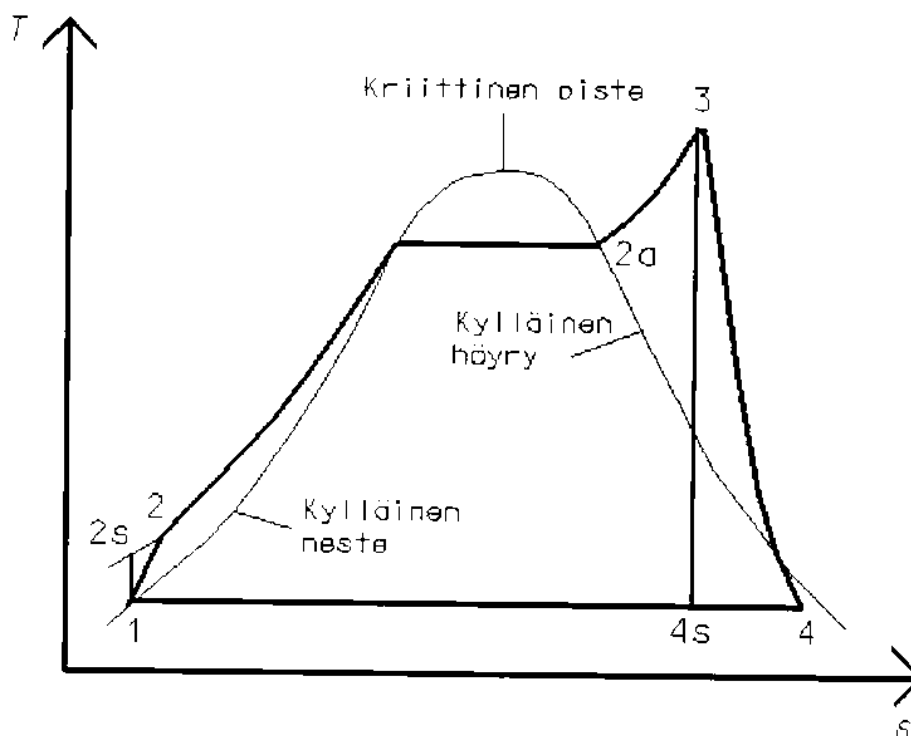
2.2 Höyryvoimaprosessi

Ideaalinen höyryvoimaprosessi koostuu neljästä osaprosessista: aluksi kylläisen nesteen isentrooppisesta puristamisesta suurempaan paineeseen, lämmöntuonnista vakiopaineessa, kunnes prosessiaine on kylläistä höyryä, isentrooppisesta paisunnasta kostean höyryn tilaan ja lämmönpoistosta vakiopaineessa. Todellisuudessa puristuksessa ja paisunnassa on häviöitä, joita kuvataan isentrooppihyötysuhteella. Lämmönsiirtimissä on aina myös painehäviöitä. Puristus toteutetaan pumpulla, kombiprosessin ollessa kyseessä lämmöntuonti kiertoaineeseen tapahtuu lämmöntalteenottokattilassa, paisunta ja lämmönpoisto lauhduttimessa. /1./



Kuva 2-4. Höyryvoimaprosessi.

Haluttaessa kasvattaa keskimääräistä lämmöntuontilämpötilaa, ja samalla prosessin kokonaishyötysuhdetta, tulistetaan höyry ennen sen johtamista turbiinille. Höyryvoimaprosessi, jossa käytetään tulistusta, on esitetty kuvassa 2-3 T, s-tasossa. Kuvaajassa välillä 1–2 pumppu nostaa veden painetta, välillä 2–2a vesi lämpiää lämmöntalteenottokattilassa vakioaineessa kylläiseksi höyryksi, välillä 2a–3 höyry tulistetaan vakioaineessa, välillä 3–4 tulistettu höyry paisuu kosteaksi höyryksi turbiinissa ja välillä 4–1 kostea höyry lauhtuu kylläiseksi vedeksi vakioaineessa lauhtuttimessa. Kuvaan 2-5 on myös merkitty kylläisen höyryn ja kylläisen veden käyrät lukemisen helpottamiseksi.



Kuva 2-5. Höyryvoimaprosessi tulistuksella T, s -tasossa.

2.3 Lämmöntalteenottokattila

Lämmöntalteenottokattila (HRSG, Heat Recovery Steam Generator) on lämmönsiirrin kuumien savukaasujen ja vesihöyryä tuottavan höyrypiirin välillä, kun ei käytetä lisäpolttoa. Kattilan rakenteesta riippuen savukaasut kulkevat joko vaakasuoraan, jolloin lämmönsiirrinputket ovat vaakasuorassa tai pystysuoraan. Vaakamallisen kattilan etuna on pienempien tukirakenteiden tarve, ja esimerkiksi savupiippu voidaan rakentaa maanpinnalta alkavaksi. Pystymallisen kattilan etuna on pieni tarvittava maanpinta-ala. Kattiloissa käytetään erilaisia kytkentävaihtoehtoja prosessivaatimusten ja taloudellisten näkökohtien perusteella. Kattilat jaotellaan lisäpolton ja käytössä olevien painetasojen perusteella. /6./

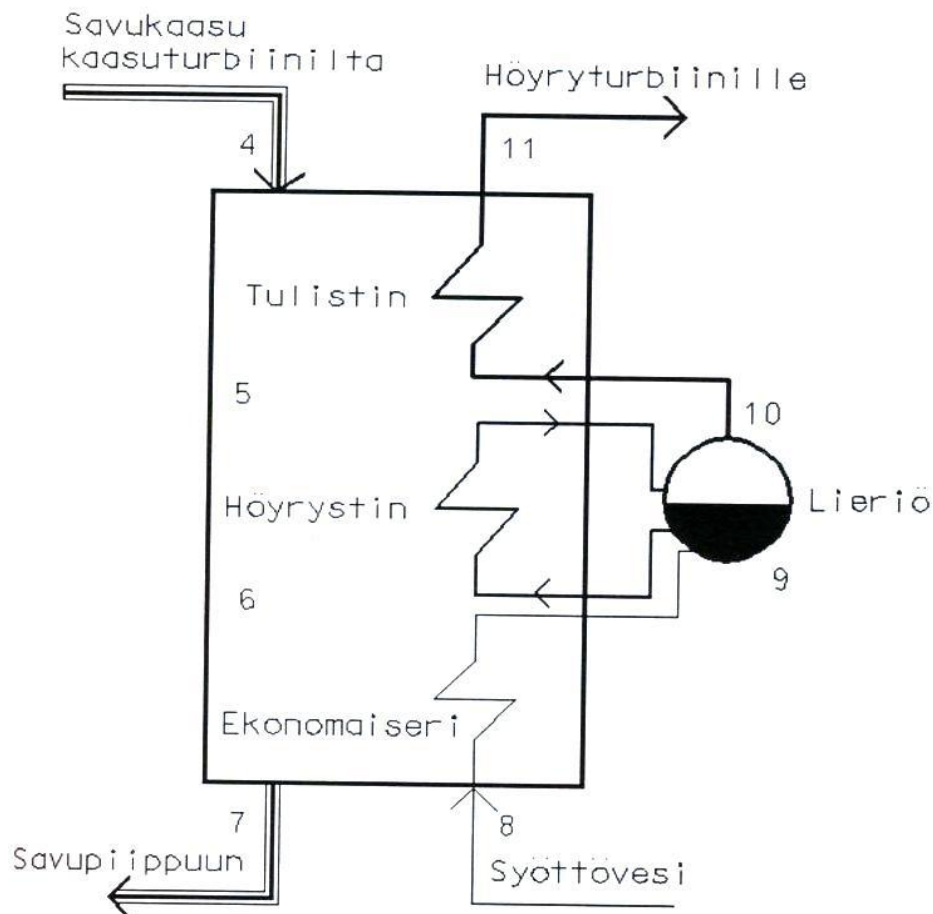
Lämmönsiirritimet sijoitetaan savukaasukanavaan vastavirtaperiaatteen mukaisesti, eli savukaasut kohtaavat ensin tulistimen, sitten höyrystimen ja viimeisenä syöttöveden esilämmittimen. Lämmöntalteenottokattilassa käytetään huomattavasti matalampaa tuorehöyryn painetta kuin tavallisessa höyryvoimaprosessissa. Höyryvoimaproessin sähkötuotannon hötyysuhde

kasvaa tuorehöyryn paineen kasvaessa, mutta lämmöntalteenottokattilan höytysuhde pienenee paineen kasvaessa. Korkeaa painetta käytettäessä savukaasun lämpötila jää suureksi ja höytysuhde huonoksi. Tyypillinen lämmöntalteenottokattilan tuorehöyryn paine on välillä 30–60 bar. Kombivoimalaitoksissa ei myöskään käytetä turbiinin väliottohöyryä syöttöveden lämmitämiseen, sillä syöttövesi tulee syöttää kattilaan mahdollisimman pienessä lämpötilassa, jotta savukaasujen loppulämpötila saadaan mahdollisimman pieneksi. Savukaasujen loppulämpötila voi olla alle 100 °C käytettäessä rikiöntä maakaasua kaasuturbiinin polttoaineena, koska tällöin ei ole matalalämpötilakorroosiovaaraa.

Lämmöntalteenottokattila on rakennettava siten, että savukaasuvirtauksen painehäviöt ovat mahdollisimman pienet, koska painehäviö vaikuttaa kaasuturbiinin tehoon ja höytysuhteeseen. Lämpö siirtyy kattilassa pelkästään konvektiolla, kun tavallisessa kattilassa lämpö siirtyy sekä konvektiolla että säteilemällä. Lämmönsiirtoa lämmöntalteenottokattilassa ei voida kuitenkaan tehostaa savukaasun virtausnopeutta kasvattamalla, koska tällöin myös painehäviöt kasvavat. /4./

2.3.1 *Yhden painetason lämmöntalteenottokattila*

Kaikissa yhdellä painetasolla toimivan kattilan lämmönsiirtimissä vallitsee syöttövesipumpulla tuotettu paine, kun painehäviöitä ei oteta huomioon. Kattilassa on syöttöveden esilämmitin, höyrystin, tulistin ja lieriö. Kuvassa 2-6 on esitetty yhdellä painetasolla toimivan kattilan periaatepiirros.



Kuva 2-6. Yhdellä painetasolla toimiva lämmöntalteenottokattila.

Kattilassa kaasuturbiinin tuottaman savukaasun lämpötila pienenee lämpötilasta T_4 lämpötilaan T_7 (kuvan 2-7 merkinnöin) savukaasun massavirran ollessa q_{msk} . Syöttövesi, massavirta q_{msyve} , syötetään lämpötilassa T_8 syöttöveden esilämmittimeen, jossa se lämpiää kylläisen nesteen tilaan T_{9-10} . Esilämmittimeltä vesi johdetaan lieriöön. Lieriöstä vesi poistuu höyrystimeen, jossa vesi muuttuu kylläiseksi höyryksi, ja johdetaan takaisin lieriöön. Lieriöstä kylläinen höyry poistuu lämpötilassa T_{9-10} . Tulistimessa höyry tulistuu lämpötilassa T_{11} . Todellisuudessa kylläinen lämpötila T_{9-10} on muutaman asteen kylläisen pisteen alapuolella.

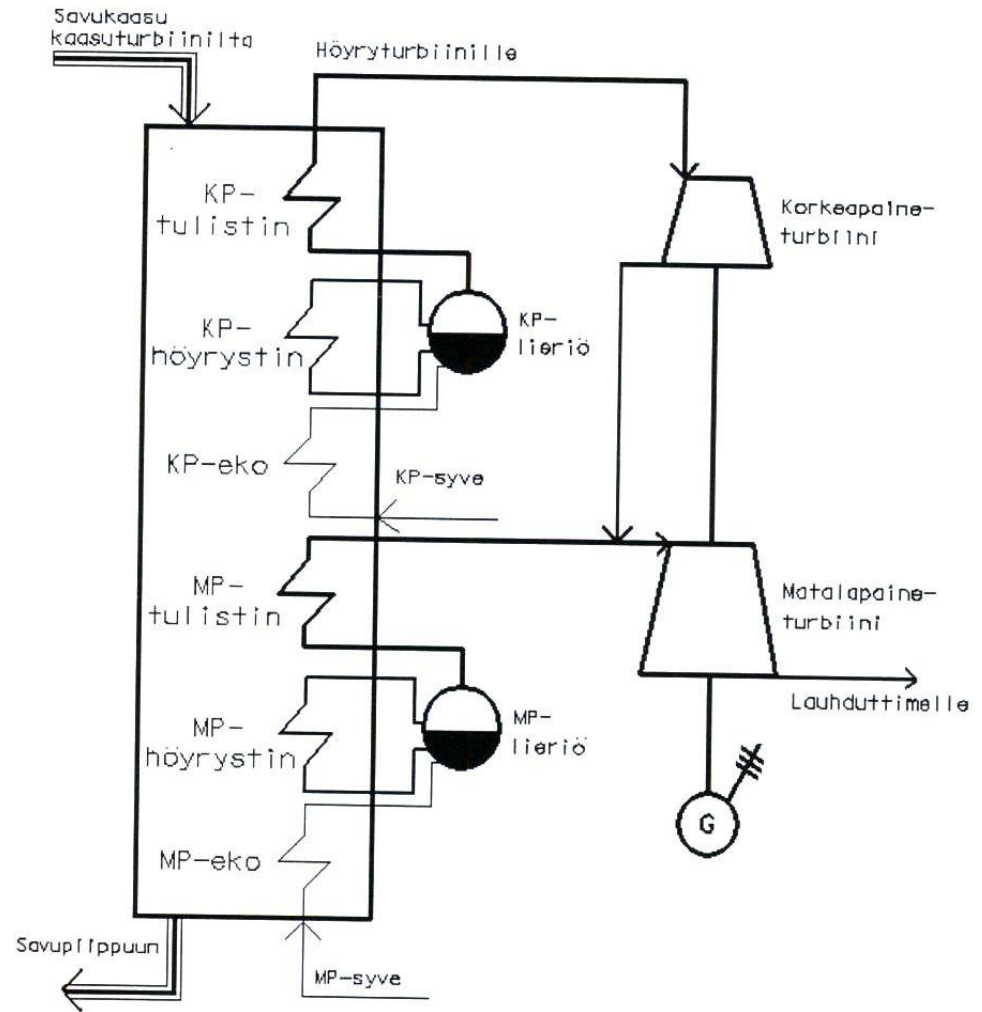
Kattilan lämpötiladiagrammi on esitetty kuvassa 2-7. Kuvassa höyryn ja veden lämpötilat on piirretty kaasusta poistuneen lämpötehon funktiona. Kuvasta nähdään myös tulistimen ja ekonomaiserin osuudet lämmönsiirrossa.

2.3.2 Kahden painetason lämmöntalteenottokattila

Kahden painetason kattila poikkeaa yhden painetason kattilasta siten, että siinä on kaksi tulistinta, höyrystintä ja lieriötä. Kattila voidaan kytkeä toimimaan kahdella eri tavalla käytettäessä kahta painetasoa. Ensimmäisessä tavassa vesi pumpataan syöttövesisäiliöstä matalapaine-ekonomaiserin kautta lieriöön, kylläinen vesi johdetaan edelleen höyrystimeen ja kylläinen höyry edelleen tulistimeen. Tulistunut höyry ohjataan turbiiniin, jossa höyry paisuessaan lisää sähkötehon tuotantoa. Osa matalapainehöyrystä voidaan käyttää syöttövesisäiliön lämmityksessä. Matalapaineosassa höyrystymättä jäänyt vesi johdetaan paineenostopumppujen kautta korkeapaine-ekonomaiseriin. Sieltä vesi johdetaan edelleen korkeapainelieriöön. Kylläinen vesi höyrytetään korkeapainehöyrystimestä ja höyry tulistetaan korkeapainetulistimesta, minkä jälkeen höyry johdetaan turbiinin korkeapaineosaan. /1./

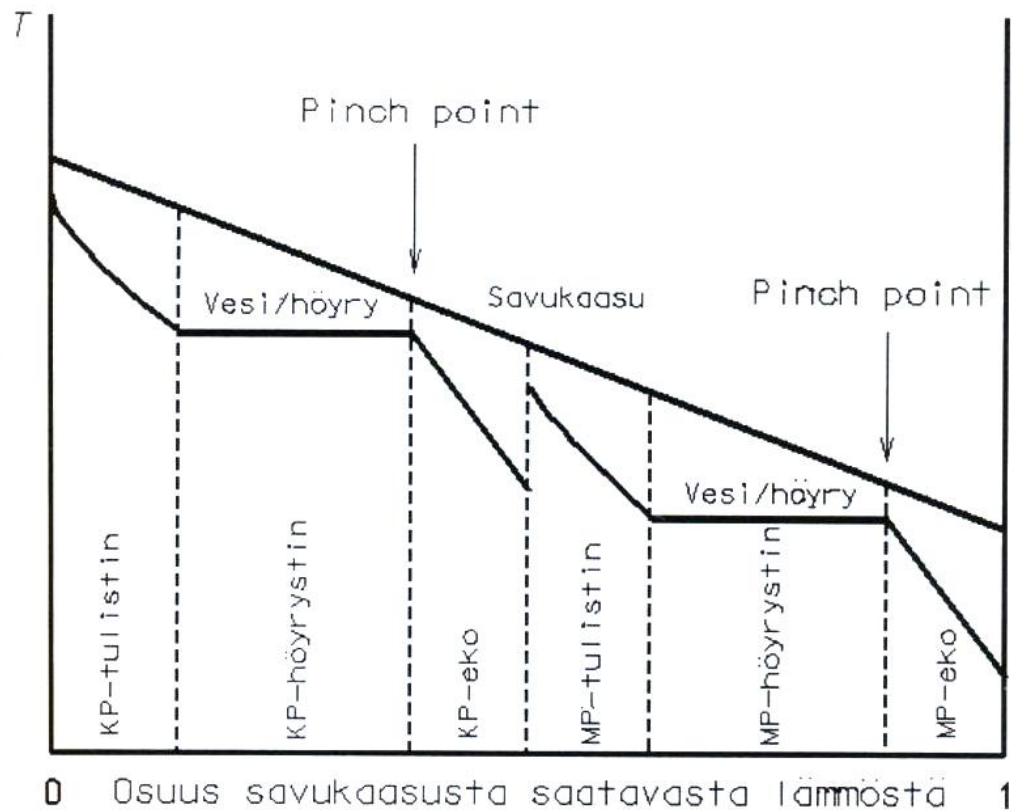
Toisessa kattilan kytkentätavassa korkeapaine- ja matalapainepuoli ovat toisistaan erotettuja osia. Tällöin korkeapainepiiriin syöttövesi tuodaan syöttövesipumpun kautta syöttövesisäiliöstä. Korkea- ja matalapainepiirit toimivat irrallisina kiertopiireinä, tulistunut höyry johdetaan korkeapainepuolelta turbiinin korkeapaineosaan ja vastaavasti matalapainepuolelta turbiinin matalapaineosaan. Erillinen kytkentä on käytettävyydeltään parempi kuin yhdistetty kierto, tällöin matalapainepuolen häviöt eivät vaikuta korkeapainepuolen toimintaan.

Toisistaan erotettujen matalapaine- ja korkeapainepiirien toimintaperiaate on sama kuin yhdellä painetasolla toimivassa kattilassa. Lämmönsiirtimet sijoitellaan savukanavaan siten, että kuumimmat savukaasut kohtaavat ensin korkeapainepiiriin lämmönsiirtimet ja seuraavana matalapainepiiriin lämmönsiirtimet. Työssä esimerkkinä otettu kattila on lisäksi varustettu kuumalla ja kylmällä kaukolämpöekonomaiserilla. Kuvassa 2-8 on esitelty kahdella toisistaan erotetulla painetasolla toimivan kattilan periaatepiirros. /6./



Kuva 2-8. Kahdella painetasolla toimiva lämmöntalteenottokattila.

Kahdella painetasolla toimivan kattilan korkeapainepuolen pinch point- lämpötilaero voi olla suurempi kuin yhden painetason kattilassa, koska lämpö, jota ei saada talteen korkeapainepuolella, voidaan käyttää hyväksi matalapainepuolella. Kuvassa 2-9 on esitetty kahdella painetasolla toimivan kattilan lämpötiladiagrammi.



Kuva 2-9. Kahdella painetasolla toimivan lämmöntalteenottokattilan lämpödiagrammi. /6./

2.3.3 Lisäpoltolla varustettu lämmöntalteenottokattila

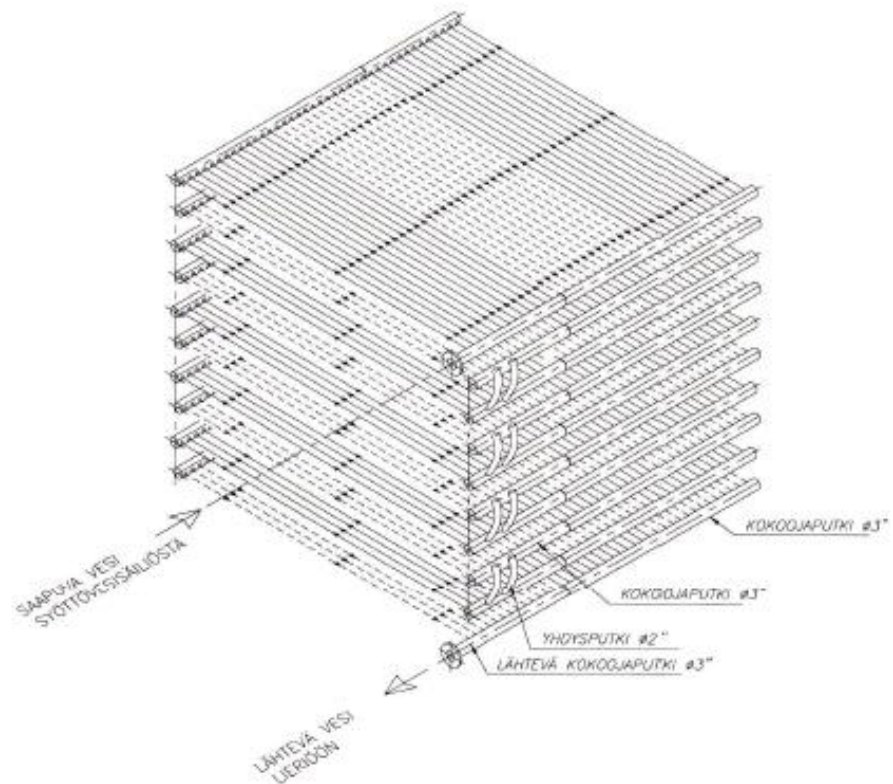
Konventionaaliseen höyrykattilaan voidaan lämmittävää kaasua syöttää 700–760°C:n lämpötilassa. Kaasuturbiinilta tulevan savukaasun lämpötila on 500–550 °C. Tarvittava lämpötilan lisäys saadaan aikaan lisäpolttimien avulla, jolloin höyryntuotannon määrä kaksinkertaistuu. Kaasuturbiinilta tulevissa savukaasuissa on vielä happea 15–16 %, jolloin sitä voidaan käyttää polttimen palamisilmana. Lisäpoltto jaotellaan sen mukaan, kuinka suuri osa savukaasujen hapesta poistetaan polttamalla ja kuinka suuri savukaasun lopullinen lämpötila on. Jaottelun perusteella puhutaan rajoitetusta tai täydellisestä lisäpoltosta. /1./

3 LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILAN PÄÄKOMPONENTIT

3.1 Ekonomaiseri

Ekonomaiseriassa syöttövettä lämmitetään ennen sen johtamista lieriöön. Syöttöveden lämpötila ei vaikuta kattilan höyryntuottoon, minkä vuoksi vesi syötetään ekonomaiseriin mahdollisimman kylmänä, jotta savukaasusta saataisiin mahdollisimman paljon lämpöä talteen. Rajoittavana tekijänä on kuitenkin savukaasun kastepiste, jonka ylläpuolella on pysyttävä korroosio-ongelmien välttämiseksi. Syöttövesisäiliö pidetään yleensä hieman ylipaineen puolella, jolloin kaasunpoisto on yksinkertainen ja kaasuvuotojen mahdollisuus syöttövesisäiliöön poistuu. Tällöin syöttöveden lämpötila on noin 105 °C, mutta sitä voidaan edelleen jäähdyttää lämmönsiirtimessä ennen kattilaan syöttämistä lauhteella tai lisävedellä. Syöttöveden lämpötilaa ei kuitenkaan lasketa alle 60 °C. Kaasuturbiineilla ja kaasumootoreilla lämpötila voi olla niinkin korkea kuin 140 °C, jotta kaasumootorista karkaavat voiteluöljyt eivät lauhtuisi ekonomaiserin pinnalle.

Ekonomaiseriassa tarvitaan paljon lämmönsiirtopintaa, sillä savukaasut ovat jo luovuttaneet suuren osan lämmöstään ennen ekonomaiseria. Suuri lämmönsiirtopinta-ala tarkoittaa samalla suurta putkimäärää, mikä johtaa hitaaseen virtausnopeuteen. Virtausnopeus on kuitenkin pidettävä veden puhtaudesta riippuen yli 0,6 m/s, jotta lämmönsiirto olisi tehokasta ja vedessä olevat lauhtumattomat kaasut eivät erottuisi. Syöttövedeen lisätään nimittäin jäännöshapen poistamiseksi kemikaaleja, esimerkiksi hydratsiinia, jonka hajoamistuotteena syntyy typpikaasua, joka erottuessaan voi häiritä veden kiertoa ja lämmönsiirtoa. Veden virtausnopeus ekonomaiseriassa on tyypillisesti välillä 0,6–1,8 m/s. Tätä suuremmilla nopeuksilla sisäpuolinen painehäviö kasvaa merkittäväksi, mikä samalla lisää tarvittavaa pumppaustehoa kuluttaen kattilasta saatavaa nettotehoa. Virtausnopeuden pitämiseksi riittävän suurena käytetään kahta keinoa, pientä putkikokoa ja jakotukin osastoinnista. Osastoinnissa jakotukkiin sijoitetaan levyjä joilla virtaus ohjataan kulkemaan eri osissa ekonomaiserin putkia eri suuntaan. Käytetty ratkaisu on esitetty kuvassa 3-1.



Kuva 3-1. Syöttövesivirtaus ekonomaiserissa. /7./

3.2 Lieriö

Lieriön tarkoitus on erottaa kattilan höyrystinputkissa höyrystynyt kylläinen höyry kylläisestä vedestä. Erotustason on oltava mahdollisimman hyvä, koska lieriön veteen on liuenneina haitallisia suoloja, jotka joutessaan veden mukana tulistimeen ja veden höyrystyessä siellä muodostavat turbiiniin tai tulistimen sisäpintoihin haitallisia kerrostumia.

Lieriössä veden ja höyryn erotuksen toimintaperiaate perustuu erotettavien aineiden painovoimaiseen tiheyseroon. Jotta vesi erottuisi mahdollisimman täydellisesti, on höyry- vesiseos tuotava lieriöön mahdollisimman tasaisena virtana. Painovoimainen erottuminen on sitä tehokkaampaa, mitä suurempi on lieriön halkaisija eli mitä hitaammin ja mitä pidemmän aikaa vedestä erotunut höyry virtaa lieriössä matkalla tulistinputkiin.

Kokemusten mukaan kuormituslukujen perusteella voidaan arvioida lieriön oikeaa kokoa. Esimerkiksi tilavuuskuormitus eli tuotettu höyrymäärä (m^3/h) jaettuna lieriön höyrytilavuudella (m^3) on yleensä n. 200 tuorehöyryn paineen ollessa yli 80 bar. Tässä tilavuuskuormituksessa höyryn viipymäaika eli höy-

ryn ja veden erottumisaika lieriössä on lähes 20 sekuntia. Pienimmissä tuorehöyryn paineissa, jolloin veden ja höyryn tiheysero on suurempi, käytetään jonkin verran suurempia tilavuuskuormituksia (suurimmillaan n. 800). Sallittu tilavuuskuormitus riippuu myös siitä, miten nopeasti höyryvesiseos johdetaan lieriöön, sekä siitä millaisia painovoimaista erotusta parantavia rakenteita lieriössä on. /1./

3.3 Höyrystin

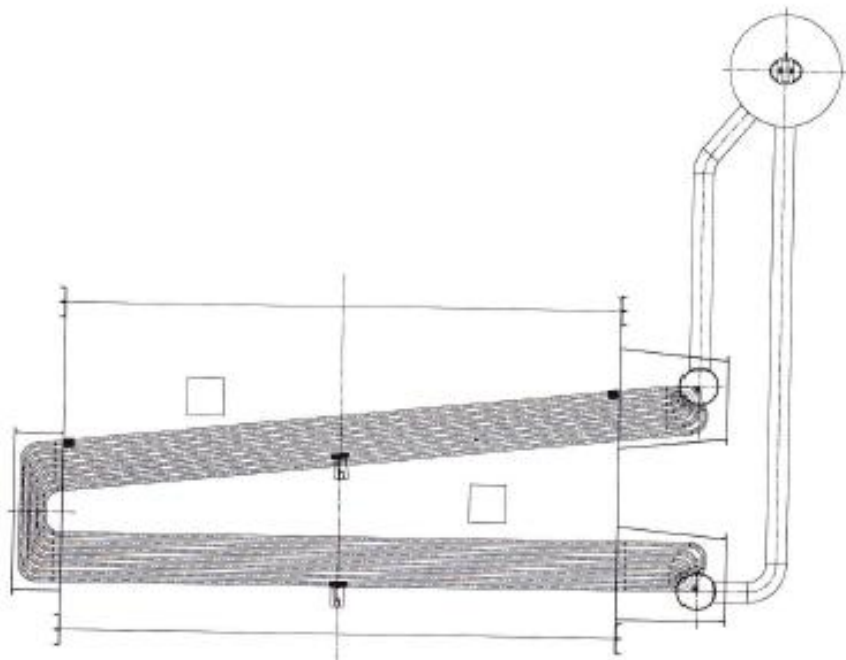
Lieriöstä vesi johdetaan laskuputkia pitkin höyrystimen jakoputkiin, josta se jaetaan tasaisesti höyrystinputkiin. Savukaasut luovuttavat lämpöään putkien sisällä virtaavaan veteen, joka alkaa höyrystyä. Höyrystymisen määrää kuvataan kiertoluvulla, jolla tarkoitetaan höyrystimessä virtaavan vesivirran suhdetta höyrystyvään vesivirtaan. Luku on sitä suurempi, mitä pienempi osa höyrystimessä perustuu paine-eroon, joka vallitsee laskuputkessa olevan ja höyrystinputkien vesi-höyryseoksen välillä, eli tiheyseron lisäksi siihen vaikuttaa lieriön korkeus. Lisäksi kierto on vaikuttaa höyrystimessä syntyvä dynaaminen painehäviö.

Höyrystinkierron on toimittava kaikissa ajotilanteissa. Ongelmallisin tilanne on kattilan käynnistys, jolloin pitää nopeasti saada kattilasta täysi höyryntuotto. Tällöin vaarana ovat höyrystinkierron häiriintyessä putkiin muodostuvat höyrytulpat. Mikäli putkiin muodostuu tulppia, virtaus voi pysähtyä tai jopa kääntyä väärään suuntaan. Tällöin putkien jäähdytys estyy ja putkimateriaali voi ylikuumentua.

Kierto on pyritty varmistamaan sijoittamalla lieriö korkealle ja pitämällä kiertoluku suurena, noin 30–40. Suuri kiertoluku takaa höyrypitoisuuden pysymisen alhaisena, mikä vähentää höyrytulppien syntymisen riskiä. Höyrystimessä kiertävän veden tiheydessä vallitsee ero laskuputkien ja nousuputkien välillä, jolloin korkealle sijoitetun lieriön ansiosta syntyy tarvittava paine-ero veden ajamiseksi höyrystimen läpi.

Rakenteellisilla ratkaisuilla helpotetaan höyrystimessä syntyvän höyryn virtausta ylöspäin, esimerkiksi kallistamalla höyrystintä hieman yläviistoon. Lisäksi höyrystimen jakotukki on asetettu niin, että putkiyhteet ovat tukin yläpinnalla ja kokoojatukki on vastaavasti sellainen, että yhteet ovat tukin ala-

pinnalla. Näillä ratkaisuilla estetään höyrytulppien muodostuminen, sillä kevyempi höyry nousee aina ylöspäin vettä helpommin. Kuvassa 3-2 on esitetty höyrystimen rakennepiirustus, jossa on hyvin nähtävissä kierron takaamiseksi tehdyt ratkaisut.



Kuva 3-2.Höyrystin.

Luonnonkierron toiminnan takaamiseksi pitää höyrystimen virtausvastuksien, jotka koostuvat lasku- ja nousuputkien sekä höyrystinputkien kitkavastuksista ja putkiyhteiden kertavastuksista, olla mahdollisimman vähäisiä. Tämän vuoksi höyrystinputkina käytetään ekonomaiseria ja tulistimia suurempia putkikokoja, joilla saavutetaan suuri virtauspoikkipinta-ala. Höyryn osuus on pieni. Painehäviöitä voidaan vielä minimoida pitämällä veden nopeus nousu- ja laskuputkissa alhaisena. /7./

3.4 Tulistin

Tulistimessa nostetaan höyrystimessä syntyneen höyryn lämpötila prosessin vaatimusten mukaiseksi tai höyryturbiinia varten. Useamman painetason kattilassa kaikilla painetasoilla on oma tulistin. Korkeimman painetason tulistin, joka on kattilan ensimmäinen lämpöpinta, voi olla sijoitettu pystysuoraan ennen kattilaa olevaan kanavaan muiden ollessa kattilassa vaakasuorassa.

Tulistimen höyrypuolen painehäviö pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. Tämän vuoksi turbiinille tai prosessiin on yleensä määrätty tarvittava paine. Tähän on lisättävä tulistimen painehäviö, jotta saadaan lieriön paine. Korkeampi lieriön paine vähentää talteen saatavan lämmön määrää, kuten aiemmin on jo todettu, Näin ollen tulistimen suuri painehäviö heikentää kattilan höytysuhdetta.

Tulistimissa voidaan käyttää erilaisia rakenteellisia ja säätöratkaisuja, jotka vaikuttavat mm. kattilan höyryntuottoon. /7./

4 LÄMMÖNTALTEENOTTOKATTILAN SUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kombivoimalaitosprosesseissa käytetyt lämmöntalteenottokattiloiden tyypit ovat luonnonkierto-, pakkokierto- tai läpivirtauskattiloita. Luonnonkiertokattilassa vesihöyry ja veden kierto höyrystimen ja lieriön välillä perustuu höyryn veden ja tiheyseroon. Syöttövesisäiliöstä vesi johdetaan syöttövesiesilämmittimeen ja lämmitetään lähelle kylläistä lämpötilaa. Lämmennyt vesi johdetaan lieriöön ja siitä edelleen höyrystimeen, jossa osa vedestä höyrystyy. Vesihöyryn ja veden seos palaa takaisin lieriöön, jossa vesihöyryn ja veden seos erotetaan toisistaan. Höyry virtaa tulistimeen tulistettavaksi. Höyrystymättä jäänyt vesi sekoittuu lieriöön syötettävään uuteen syöttövedeen ja johdetaan uudelleen höyrystimeen. Pakkokiertokattilassa höyrystimen vesihöyrykierto ylläpidetään pakkokiertopumpun avulla. Sen sijaan läpivirtauskattiloissa ei ole veden ja höyryn erotukseen tarkoitettua lieriötä, vaan kattilaan syötettävä vesi ensin lämpenee putkissa, sitten höyrystyy ja lopuksi tulistuu. /5./

4.1 Lämmöntalteenottokattilatyypin valinta

Lämmöntalteenottokattilan suunnittelussa on useita erilaisia ratkaisuja. Pääasiallisesti pystymalliset kattilat rakennetaan pakkokierrolle ja vaakamalliset luonnonkierrolle. Nykyään laskennan kehittyessä myös pystymallinen lämmöntalteenottokattila voidaan rakentaa luonnonkiertoiseksi.

Pystymallinen kattila vaatii vähemmän pinta-alaa verrattuna vaakamalliseen kattilaan. Erityisesti, jos vaakamallisessa kattilassa otetaan käyttöön typenoksidipäästöjen kontrollointiyksikkö, niin tarvittava pinta-ala kasvaa entisestään. Vaakamallisen kattilan etuja ovat yksinkertainen rakenne sekä nopeampi ja yksinkertaisempi pystytysprosessi kuin pystymallisessa, koska sillä on tiukemmat vaatimukset kattilan tuennalle.

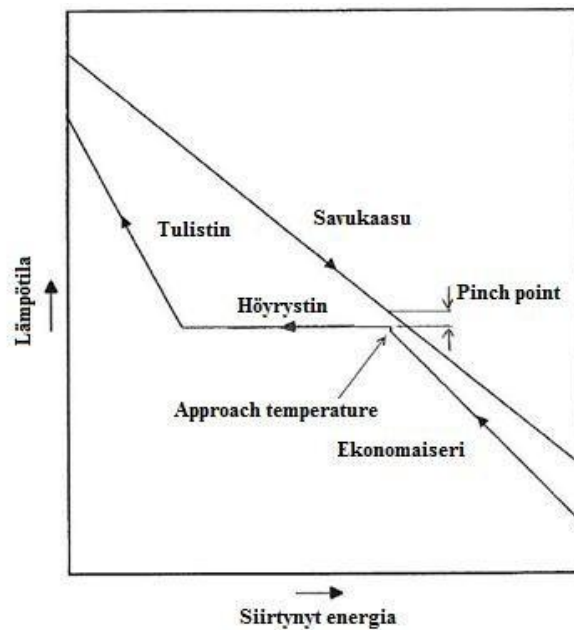
Vesihöyrypiirin mitoitus on kohta, johon täytyy kiinnittää tarkemmin huomiota luonnonkiertoisen kattilan suunnittelussa, koska siinä ei ole pakkokierto-pumppua takaamassa varmaa ja tasaista virtausta. Sen sijaan pakkokierto-pumppu on käytettävissä pakkokiertoisessa kattilassa, joten virtaus on siellä varma ja tasaista. Pakkokiertokattilan etuja suunnittelussa ovat lämpöpintojen laakerin vapaampi sijoittelu sekä vedenkierron luotettavuus käyntivaiheessa. Pakkokiertokattila käynnistyy nopeammin kuin luonnonkiertokattila. Luonnonkiertoisen kattilan käyttö ei vaadi pakkokiertopumppua, mikä vähentää investointi-, käyttö- ja huoltokustannuksia. /1./

4.2 Lämmöntalteenottokattilan mitoitusparametrit

Pinch point -lämpötilaero ja approach temperature -lämpötilaero ovat kaksi tärkeintä tekijää lämmöntalteenottokattilan toiminnan kannalta. Approach temperature eli syöttöveden lämpötilavajaus on lämpötilaero syöttöveden esilämmittimestä tulevan veden lämpötilan ja höyrystymislämpötilan välillä. Pinch point -lämpötilaero on savukaasun ja vesi-höyrypiirin välinen pienin lämpötilaero.

Lämmönsiirtimet sijoitetaan lämmöntalteenottokattilassa savukaasuvirtaan vastavirtaperiaatteen mukaisesti siten, että ensin kuumimmat savukaasut kohtaavat tulistimen, sitten höyrystimen ja viimeiseksi ekonomaiserin. Tämän järjestyksen mukaan pinch-point -lämpötilaero sijaitsee lämmöntalteenottokattilassa heti höyrystimen jälkeen. /10;1./

Pinch point vaikuttaa suoraan tuotetun höyryn määrään kuvasta 4-2 huomataan, että pienentämällä lämpötilaeroa saadaan höyryturbiinista suurempi sähköteho muiden parametrien pysyessä vakaina. Mitä pienempi lämpötilaero valitaan, sitä suurempi on kattilan höyrystysteho, mutta samalla tarvittava lämpöpinta kasvaa ja kattilan investointikustannukset sen mukana.



Kuva 4-2. Lämmöntalteenottokattilan lämpötiladiagrammi.

Samalla tavalla, pienempi syöttöveden lämpötilavajaus johtaa parempaan lämmön höyrykäyttöön, mutta kasvattaa myös tarvittavaa lämmönsiirtopinta-alaa. Optimaalisessa tilanteessa syöttöveden lämpötilavajaus on 0 °C, jolloin syöttövesi lämmitetään kylläiseksi ja kattilan kokonaispinta-ala saavuttaa minimiarvonsa suhteessa kattilan tehoon. Kombilaitoksen ajoon liittyvistä syistä johtuen syöttöveden lämpötilavajaus voidaan harvoin asettaa optimiarvoonsa. Esimerkiksi kaasuturbiinia ajettaessa osakuormalla savukaasujen lämpötila laskee kaasuturbiinin jälkeen, jolloin lämmönsiirron painopiste siirtyy kattilassa kohti loppua ja höyrystyminen tapahtuu ekonomaiseriissa. Tämän vuoksi kattila pitää mitoittaa siten, että höyrystymistä ei tapahdu ekonomaiseriissa heti siirryttäessä osakuormille.

4.3 Höyryn paine ja lämpötila

Höyryprosessiin vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa höyryn paine sekä lämpötila ja lauhduttimen paine. Kombivoimalaitosta suunniteltaessa vapaat

muuttajat liittyvät höyryprosessiin, koska kaasuturbiini on standardikone, johon ei pysty kovin paljon vaikuttamaan.

Lämmöntalteenottokattilassa kannattaa höyryn paine ja lämpötila valita keskenään sopiviksi. Näillä valinnoilla saavutetaan mahdollisimman taloudellinen tulos. Korkeammat höyryn paineet yleensä parantavat prosessin kokonaishöytysuhdetta, mutta niiden haittana on, että ne rajoittavat savukaasun lämmöntalteenottoa yhdellä painetasolla varustetussa kattilassa korkeamman höyrystymislämpötilan vuoksi. Tästä johtuen käytetään useamman painetason kattiloita. /10./

4.4 Painetasojen lukumäärä

Lämmöntalteenottokattilan painetasojen lukumäärä vaihtelee yhdestä neljään riippuen laitoksen kokoonpanosta. Nämä painetasot ovat korkeapainetaso, kaksi keskipainetasoa ja matalapainetaso. Yleensä lämmöntalteenottokattiloissa käytetään vähintään kahta eri painetasoa lukuun ottamatta pieniä kattiloita.

Ottamalla käyttöön useita painetasoja lämmöntalteenottokattilassa, saadaan korkean ja matalan painetason höydyt yhdistettyä. Silloin korkein painetaso voidaan asettaa mahdollisimman korkeaksi höyryprosessin höytysuhteen maksimoimiseksi. Matalapainetason ansiosta yritetään saada talteenotetun lämmön määrä mahdollisimman suureksi. Käyttämällä kahta painetasoa saavutetaan keskimäärin 13 % parempi höytysuhde kuin käyttämällä yhtä painetasoa. Lisäämällä kolmas painetaso hyötysuhde paranee aika vähän, joten enempää kuin kolme painetasoa ei yleensä kannata käyttää, koska investointikustannus kasvaa sen mukaisesti. /10./

4.5 Savukaasupuolen painehäviö

Kun lämmöntalteenottokattila liitetään kaasuturbiiniin, savukaasupuolen painehäviö kasvaa ja turbiinin painesuhde pienenee. Painesuhteen pienentyminen heikentää kaasuturbiinin hyötysuhdetta sekä saatavaa sähkötehoa. Kaasuturbiini menettää kapasiteetistaan 0,5 % jokaista 1 kPa:n painehäviötä kohti. Kaasuturbiinin korkea hyötysuhde säilytetään suunnittelemalla lämmöntalteenottokattilan aiheuttama painehäviö mahdollisimman pieneksi.

Pitämällä savukaasun virtausnopeus lämmöntalteenottokattilassa pienenä, saavutetaan pieni savukaasupuolen painehäviö, mutta tämä heikentää lämmönsiirtoa ja kasvattaa tarvittavaa lämpöpinta-alaa. Käyttämällä savukaasupuolelta rivoitettuja putkia, voidaan parantaa lämmönsiirtoa. Savukaasupuolen painehäviö on suuruusluokkaa 2,0–3,5 kPa. /10./

5 LÄMMÖNTÄLTEENOTTOKATTILOIDEN KÄYTTÖSOVELLUKSET

Lämmöntalteenottokattiloiden käyttösovellukset ovat hyvin erilaisia. Parhaiten tunnettu sovelluskohde on kombivoimalaitos. Siinä kaasuturbiinista lähtevien savukaasujen sisältämää lämpöä otetaan talteen ja käytetään höyryvoimaprosessissa. Kombivoimalaitoksen lisäksi lämmöntalteenottokattiloita käytetään myös kemialaitoksissa ja öljynjalostamoissa.

5.1 Moottorivoimalaitos

Moottorivoimalaitoksella tarkoitetaan voimalaa, jossa otto- tai dieselmoottori pyörittää generaattoria. Yleensä moottorivoimalaitoksia käytetään sellaisissa paikoissa, joissa energiahuolto on vaikeaa. Tällaisia paikkoja ovat öljynporauslautat, napamantereiden tutkimusasemat ja saaret. Moottorivoimalaitoksia voidaan myös käyttää varavoimana teollisuudessa, sairaaloissa ja lentokentillä.

Perinteisen tyyppisissä moottorivoimalaratkaisuissa päästään nykyisin noin 47 %:n höytysuhteeseen sähköntuotannossa. Kun kytkentään lisätään lämmöntalteenottokattilat ja höyryturbiini, on mahdollista päästä jopa yli 55 %:n höytysuhteeseen sähköntuotannossa. Kokonaishyötysuhde voi olla jopa yli 90 %, kun sähkön lisäksi kaikki moottorin lämpö otetaan talteen. /2./

5.2 Teollisuusvoimalaitos

Teollisuusvoimalaitoksen hyötysuhde on tuotetun sähkön ja prosessihöyryn suhde käytettyyn polttoaine-energiaan. Tämä hyötysuhde on tyypillisesti 80 % - 85 %, joka on selvästi korkeampi kuin lauhdelaitoksen hyötysuhde.

Yleensä teollisuuslaitokset käyttävät omasta tuotannostaan peräisin olevia polttoaineita, kuten puunkäsittelystä syntyvää kuori- ja puujätettä, sekä lisäksi ostopolttoaineita, kuten hiiltä ja turvetta. Teollisuusvoimalaitoksissa sähkön ja lämpötuotantoa kuvataan usein rakennussuhteella, jolla tarkoite-

taan tuotetun sähkön ja prosessilämmön suhdetta. Tyypillisesti rakennussuhde teollisuusvoimalaitoksilla on luokkaa 0,2–0,3. Rakennussuhteeseen vaikuttavat tuorehöyryn arvot sekä turbiinin hyötysuhde. /8./

5.3 Kaukolämpövoimalaitos

Kaukolämpövoimalaitoksen höytysuhde on hyvä, luokkaa 85–90 %. Rakennussuhde on luokka 0,45–0,55, joka on noin kaksinkertainen teollisuusvoimalaitoksiin verrattuna.

Yleensä kaukolämpövoimalaitokset ovat blokkikytkentäisiä, eli voimalaitoksen muodostavat yksi tai useampi kattila- ja turbiiniyhdistelmä. Kattiloissa voidaan polttaa samaa tai eri polttoainetta. Yleisesti käytetyt polttoaineet ovat hiili, turve ja puu. Niiden käyttö on jakaantunut maantieteellisesti siten, että rannikolla sijaitsevat laitokset käyttävät enemmän hiiltä ja sisämaamaassa sijaitsevat enemmän turvetta ja puuta.

Kaukolämpövoimalaitoksessa höyryturbiini voi olla puhdas vastapaineturbiini, jolloin kaukolämpövettä lämmitetään turbiinin ulostulohöyryllä, tai turbiini voi olla väliotto-lauhdeturbiini, jolloin kaukolämpövettä lämmitetään väliottohöyryllä. Silloin ylimääräisen höyryn voidaan antaa paisua lauhduttimen paineeseen asti. Puhtaassa vastapainekäytössä saatava sähköteho riippuu kaukolämpöverkkoon syötettävän veden lämpötilasta. Mitä kuumempaa kaukolämpövettä syötetään, sitä korkeampi on vastapaine ja lyhyempi turbiinipaisunta sekä pienempi sähköteho. Vastapaine vaihtelee tällöin välillä 0,2–0,6 bar, kun vastaavasti lauhduttimen paine on yleensä 0,02–0,05 bar. /8./

6 LÄMMÖNSIRRON LASKEMINEN

6.1 Kattilan toiminta-arvot

Vuosaari B:n voimalaitoksen lämmöntalteenottokattilat ovat Foster Wheelerin valmistamia. Kattila on vaakamallinen, pohjasta tuettu, jolloin savukaasut kulkevat vaakasuoraan kattilan läpi, lämmönsiirtimet on sijoitettu savukaasukanavaan pystysuoraan. Kattila toimii kahdella painetasolla, joten kattilassa on kaksi ekonomaiseria, höyrystintä, lieriötä ja tulistinta. Lisäksi viimeisinä lämmönsiirtiminä ovat kuuma ja kylmä kaukolämmönvaihdin. Ensimmäisenä savukaasut kulkevat korkeapainepuolen, sitten matalapainepuolen ja viimeisenä kaukolämmönvaihtimen läpi. Savukaasujen tulolämpötila kattilaan on noin 550 °C, ja poistumislämpötila on noin 52 °C, massavirtaus on 530 kg/s. Syöttöveden mitoitus lämpötila on 73 °C ja alin sallittu lämpötila on 40 °C.

Taulukko 6-1. Lämmöntalteenkattilan höyryntuotanto.

	Paine [bar]	Massavirta [kg/s]	Lämpötila [°C]
Korkeapainetaso	74	68	510
Matalapainetaso	6,5	14	220

Kaukolämmönvaihtimien ominaisuudet on esitetty taulukossa 6-2-

Taulukko 6-2. Kaukolämmönvaihtimien ominaisuudet.

	Kuuma vaihdin	Kylmä vaihdin
Teho [MW]	15	20
KI-vesi sisään[°C]	81,4	45
KI-vesi ulos [°C]	85	71,5
KI-vedenmassavirta [kg/s]	1380	180

6.2 Savukaasun analysointi

Polttoaineena käytettiin maakaasua, jonka koostumus on esitetty taulukossa 2-1. Täydellä teholla savukaasun happipitoisuus on 14,5 %. Maakaasun koostumus on esitetty tilavuusprosentteina, joten meidän täytyy ilmoittaa ne painoprosentteina seuraavaan kaavan mukaan:

$$p\% := \frac{T\% \cdot M}{\sum T_{1\%} \cdot M_1} \cdot 100 \quad (2)$$

missä

T % on jokaisen maakaasun komponentin tilavuusprosentti.

M on jokaisen maakaasun komponentin moolimassa.

$\sum T_1$ %. M_1 on komponenttien tilavuusprosentin ja moolimassojen tulojen summa.

Jokaisen maakaasun komponentin massaosuus lasketaan jakamalla painoprosentti sadalla.

$$m = \frac{p\%}{100} \quad (3)$$

Kun massaosuus on tiedossa, lasketaan jokaisen maakaasun komponentin mooli, jakamalla massaosuus moolimassalla.

$$N := \frac{m}{M} \quad (4)$$

Palamisreaktioyhtälön (1) mukaan yhden metaanimoolin (CH_4) palamiseen tarvitaan kahta happimoolia. Yhden etaanimoolin (C_2H_6) palamiseen tarvitaan kolme ja puoli happimoolia. Yhden propaanimoolin (C_3H_8) palamiseen tarvitaan viittä happimoolia. Yhden butaanimoolin (C_4H_{10}) palamiseen tarvitaan neljää happimoolia.

Ilmakerroin määritettiin hapenpitoisuuden avulla seuraavasti:

$$\lambda_{O_2} := 1 + \left(\frac{O_2}{21 - O_2} \cdot \frac{V_{\min}^{tr}}{L_{\min}} \right) \quad (5)$$

missä

λ_{O_2} on ilmakerroin.

O_2 on hapenpitoisuus.

$V_{\min}^{tr}$ on kuivien savukaasujen teoreettinen määrä (stökiometrinen palaminen).

$L_{\min}$ on teoreettinen palamisilman tarve.

Ilmakertoimen määrittäminen O_2 -pitoisuuden avulla. /9./

Maakaasun massavirtaus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$q_{m.mk} := \frac{\rho_{mk} \cdot Q_{Pa}}{H_u} \quad (6)$$

missä ρ_{mk} on maakaasun tiheys, Q_{Pa} on kombivoimalaitoksen polttoaineen-teho ja H_u on maakaasun alempi lämpöarvo.

Ilman massavirtaus lasketaan seuraavasti:

$$q_{m.i} := q_{mk.i} N_i \cdot M_i \quad (7)$$

Savukaasun massavirtaus ja moolivirtaus lasketaan seuraavilla kaavoilla:

$$q_{m.sk} := q_{m.mk} + q_{m.i} \quad (8)$$

$$q_{n.sk} := N_{sk} \cdot q_{m.sk} \quad (9)$$

Taulukko 6-3. Savukaasujen tuntuva entalpia.

Lämpötila [°C]	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
	tuntuva entalpia [kJ/kmol]	tuntuva entalpia [kJ/kmol]	tuntuva entalpia [kJ/kmol]	tuntuva entalpia [kJ/kmol]
25	917	832	733	728
100	3 840	3 360	2 950	2 900
200	8 080	6 800	5 980	5 850
300	12 650	10 320	9 110	8 790
400	17 410	13 960	12 360	11 820
500	22 500	17 730	15 680	14 900
600	27 700	21 600	19 070	18 050
700	33 060	25 610	22 520	21 220
800	38 490	29 770	26 030	24 520
900	44 080	34 060	29 570	27 850
1000	49 690	38 340	33 150	31 230
1 100	55 470	42 910	36 750	34 640
1 200	61 240	47 470	40 390	38 090
1 300	67 060	52 100	44 040	41 560
1 400	72 920	56 970	47 720	45 080
1 500	78 870	61 790	51 450	48 570
1 750	93 730	74 340	60 870	57 480
2 000	108 800	87 150	70 410	–
2 250	123 900	100 400	80 080	–
2 500	139 100	113 700	89 880	–
2 750	154 400	127 400	99 840	–
3 000	169 700	141 000	109 900	–

Haetaan taulukosta 6-3 jokaisen savukaasujen komponenttien tuntuva entalpia lämpötilaan mukaan. (savukaasun lämpötila on 550 °C). Savukaasujen komponentit ovat CO₂, H₂O, N₂ ja O₂.

$$H_{mt_{sk}} := X_{CO_2} \cdot H_{mt_{CO_2}} + X_{H_2O} \cdot H_{mt_{H_2O}} + X_{N_2} \cdot H_{mt_{N_2}} + X_{O_2} \cdot H_{mt_{O_2}} \quad (10)$$

missä

X on kosteiden savukaasujen komponenttien mooliosuus.

H_{mt} on savukaasujen komponenttien tuntuva entalpia lämpötilan mukaan.

Savukaasun lämpöteho kaasuturbiinin jälkeen lasketaan seuraavasti:

$$Q_{sk.550} := H_{mt_{sk.550}} q_{n.sk} \quad (11)$$

6.3 Kattilassa siirretty lämpöteho

Kattilassa on kaksi painetasoa ja kaksi kaukolämpövaihdinta. Ennen laske-
mista kysyttiin Vuosaaren B:n voimalaitoksen henkilökunnalta lämmöntal-
teenottokattilan perustiedot. Tietojen perusteella laskettiin EES:n avulla en-
talpia eri pisteissä. Tulistimen jälkeen lämpötilan ja paineen avulla laskettiin
tulistetun höyryn entalpia. Lieriön paineen ja höyrypitoisuuden ($x=1$) perus-
teella laskettiin kylläisen höyryn entalpia ja lämpötila sekä kylläisen veden
entalpia, kun höyrypitoisuus on nolla. Ekonomaiserilta lähtevä vesi on 10 °C
alijäähtynyttä eli 10 °C vähemmän kuin höyryn lämpötila. Olettamalla, että
lieriössä paine pysyy samana, voidaan laskea veden entalpia ekonomaiserin
jälkeen. Syöttöveden lämpötilan ja paineen perusteella, laskettiin syöttöve-
den entalpia. Kuumen ja kylmän kaukolämmön vaihtimien ulko- ja sisäläm-
pötilojen perusteella laskettiin kaukolämpöveden entalpia sisään ja ulos mo-
lemmissa vaihtimissa. Näin saatiin entalpiat eri pisteissä ja voidaan nyt las-
kea lämmön siirto eri kohdissa.

$$Q_{tulistin} := q_{m_{th}} \cdot (h_{th} - h_{höyry}) \quad (12)$$

$$Q_{höyrystin} := q_{m_{th}} \cdot (h_{höyry} - h_{eko}) \quad (13)$$

$$Q_{sk_{ennen.höyrystin}} := Q_{sk.550} - Q_{tulistin} \quad (14)$$

$$H_{mt_{sk_{ennen.höyrystin}}} := \frac{Q_{sk_{ennen.höyrystin}}}{q_{n.sk}} \quad (15)$$

$$Q_{sk_{ennen.ekoa}} := Q_{sk_{ennen.höyrystin}} - Q_{höyrystin} \quad (16)$$

$$Hmt_{sk.ennen.ekoa} := \frac{Q_{sk.ennen.ekoa}}{q_{n.sk}} \quad (17)$$

$$Q_{eko} := q_{m_{th}} \cdot (h_{eko} - h_{syve}) \quad (18)$$

$$Q_{sk.eko.jälkeen} := Q_{sk.ennen.ekoa} - Q_{eko} \quad (19)$$

$$Hmt_{sk.ekon.jälkeen} := \frac{Q_{sk.eko.jälkeen}}{q_{n.sk}} \quad (20)$$

$$Q_{KL.kylmä} := q_{m_{kylmä.vesi}} \cdot (h_{72.5} - h_{45}) \quad (21)$$

$$Q_{sk.KL.vaihdin1.jälkeen} := Q_{sk.eko.jälkeen} - Q_{KL.kylmä} \quad (22)$$

$$Hmt_{sk.vaihdin1.jälkeen} := \frac{Q_{sk.KL.vaihdin1.jälkeen}}{q_{n.sk}} \quad (23)$$

$$Q_{KL.Kuuma} := q_{m_{kuuma.vesi}} \cdot (h_{85} - h_{82.5}) \quad (24)$$

$$Q_{sk.KL.vaihdin2.jälkeen} := Q_{sk.KL.vaihdin1.jälkeen} - Q_{KL.Kuuma} \quad (25)$$

$$Hmt_{sk.KL.vaihdin2.jälkeen} := \frac{Q_{sk.KL.vaihdin2.jälkeen}}{q_{n.sk}} \quad (26)$$

6.4 Kattilasta talteenotettu lämpötehon kokonaismäärä

Koko kattilassa talteenotettu lämpöteho laskettiin summamalla yhteensä talteenotettu lämpöteho jokaisesta lämmönsiirtimestä. Käytetyt lämmönsiirtimet ovat: korkeapainetasossa ja matalapainetasossa oleva tulistin, höyrystin ja ekonomaiseri. Sen lisäksi kaukolämpöveden kuumen ja kylmän vaihtimet.

$$Q_{\text{koko}} := Q_{\text{tulistin}} + Q_{\text{höyrystin}} + Q_{\text{eko}} + Q_{\text{KLkylmä}} + Q_{\text{KLKuuma}} \quad (27)$$

$$\% := \frac{Q_{\text{koko}}}{Q_{\text{sk.550}}} \quad (28)$$

7 YHTEENVETO

Lämmöntalteenottokattiloiden sovelluskohteita on runsaasti ja erilaisia. Lämmöntalteenottokattilan tehtävä on kiertoprosessissa syntyvän jätelämmön talteenotto ja sen hyväksikäyttö toisessa kiertoprosessissa. Koko prosessin hyötysuhde paranee huomattavasti, kun lämmöntalteenottokattila otetaan käyttöön.

Tämän työn ydinosa oli lämmönsiirron laskeminen eri lämmönsiirtimissä eli tulistimissa, höyrystymissä, ekonomaiserissa ja kaukolämpöveden vaihtimisissa. Laskussa käytetty menetelmä antaa likimäärin lämpöenergian, joka on talteenotettu kussakin lämmönsiirtimessä. Saadut tulokset poikkeavat todennäköisesti todellisuudesta tapauksesta. Tämä johtuu siitä, että laskussa käytettiin jossakin vaiheessa oletusarvoja, kun ei ollut tarkkaa tietoa, mitä tapahtuu käytännössä.

Saadut tulokset antavat yleiskäsitystä lämmönsiirron toimintaperiaatteesta, joka perustuu siihen että lämpöä siirtyy aina kuumasta aineesta kylmään aineeseen. Käytetty menetelmä ei kuitenkaan antanut tarkkaa tietoa lämmön siirrosta. Lämpöä siirtyy kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiolla eli kulkeutumalla ja säteilemällä. Lisäksi käytetty laskumenetelmä ei ottanut huomioon kussakin lämmönsiirtimessä tarvittavaa lämmönsiirtopinta-alaa. Tämä johtuu osittain siitä, että laskussa käytetyistä voimalaitoksen perus- ja teknisistä tiedoista ei selviä tarkasti esimerkiksi, mitä putkia ja minkä kokoisia ja kuinka paljon käytetään kussakin lämmönsiirtimessä.

Kuitenkin tämän työn haluttu lopputulos saavutettiin nimittäin lämmönsiirron laskeminen. Saadut tulokset riippuvat käytetystä menetelmästä ja alkutiedoista. Jatkossa voidaan laatia tarkempaa lämmönsiirtimen mitoitus, jossa otettaisiin huomioon kaikki yksityiskohdat todellisessa tilanteessa ja verrattaisiin eri laskentamenetelmiä.

LÄHTEET

- /1/ Huhtinen,M.,Kettunen,A.,Nurminen,P.,Pakkanen,H.,Höyrykattilatekniikka, 2. painos, Helsinki 1997, Oy Edita Ab .
- /2/ Huhtinen,M.,Korhonen,R.,Pimiä,T.,Urpalainen,T.,Voimalaitostekniikka,1. painos, Keuruu 2008, Otavan Kirjapaino OY.
- /3/ Raiko,R.,Saastomoinen,J.,Hupa,M.,Kurki-Suonio,I.,Poltto ja palaminen,2. painos, Jyväskylä 2002,Gummerus Kirjapaino OY.
- /4/ Dewitt,D.P., Incropera,F.P.,Fundamental of heat and mass transfer,4th edition,1996,USA, John Wiley & Sons, Inc.
- /5/ Joronen,T.,Kováč,J.,Majanne,Y.,Voimalaitosautomaatio,2.painos, Helsinki 2007, Copy-Set Oy.
- /6/ Koskelainen,L.,Kombivoimalaitokset-seminaari.Opetusmoniste. Lappeenranta 2000,LTKK.
- /7/ Ouvinen,E.,Lämmöntalteenottokattilan optimaalinen mitoitus. Diplomityö, Lappeenranta 1990, LTKK.
- /8/ Jalovaara,J.,Aho,J.,Hietämäki,E,Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT)5-50 MW polttolaitoksissa suomessa , Helsinki,2003. Verkkodokumentti saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=23847&lan=fi> Luettu 12.12.2011. Päivitetty 28.04.2011.
- /9/ Maakaasu. Verkkodokumentti saatavissa: <http://www.maakaasu.fi/kirjat/maakaasukasikirja/palaminen> Luette 14.12.2011. Päivitetty 11.2010.
- /10/ Virtanen, T.,Lämmöntalteenottokattilan kehittäminen kaasumoottoreille ja teollisuuskaasuturbiineille. Diplomityö;Lappeenranta 2000,LTKK.

Polttoaineanalyysin ja stökiometrisen palamisen taulukot*Taulukko 1. Polttoaineanalyysi.*

Kaasu	Tilavuusprosentti	Moolimassa	Mooli xTila %	Paino %
CH ₄	0,979	16	15,664	95,8
C ₂ H ₆	0,008	30	0,24	1,5
C ₃ H ₈	0,002	44	0,088	0,54
C ₄ H ₁₀	0,001	58	0,058	0,35
N ₂	0,009	28	0,252	1,54
CO ₂	0,001	44	0,044	0,27
Yhteensä	1		16,346	100,0

Taulukko 2. Stökiometrinen palaminen.

Polttoaine				Hapentarve	Savukaasut		
Komponentti	M	m	N	O ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂
	[Kg/ kmol]	[kg/ kgPA]	[kmol/kgPA]	[kmol/ KgPA]	[kmol/ KgPA]	[kmol/ KgPA]	[kmol/ KgPA]
CH ₄	16	0,958	0,0599	0,1198	0,0599	0,1198	
C ₂ H ₆	30	0,015	0,0005	0,0017	0,00098	0,0015	
C ₃ H ₈	44	0,005	0,00012	0,00061	0,00037	0,00049	
C ₄ H ₁₀	58	0,004	0,00006	0,00040	0,00024	0,00031	
CO ₂	44	0,003	0,00006		0,000061		0,00055
N ₂	28	0,015	0,00055				0,4609
Yhteensä		1,000	0,0612	0,1225	0,0615	0,1220	0,4614

Savukaasujen ja siirretyn lämpötehon taulukot

Taulukko 1. Savukaasut.

Komponentti	Mooleja	Kuivien savukaasu	Kosteiden savukaasu	Prosentteina
	[kmol/kgPA]	[kmol/kmolSK]	[kmol/kmolSK]	[%]
CO ₂	0,0615	0,036	0,034	3,40
O ₂	0,245	0,145	0,135	13,51
N ₂	1,3835	0,819	0,764	76,4
H ₂ O	0,1220		0,067	6,7
kuivat SK	1,6899			
kosteat SK	1,8119			
		1,000	1,000	100,00

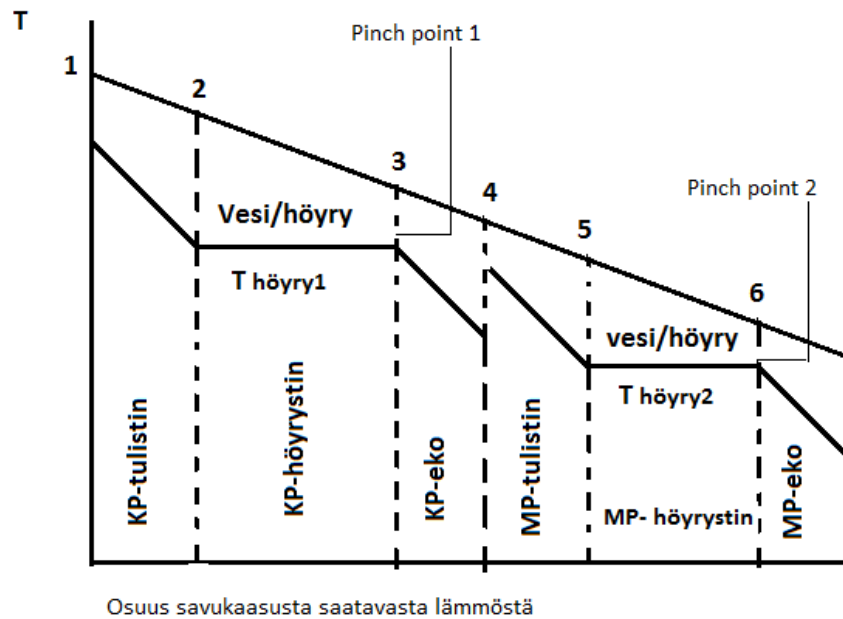
Taulukko 2. Siirretty lämpöteho korkeapaine- ja matalapainetasoon.

	Tulistimeen siirretty lämpöteho [MW]	Höyrystimeen siirretty lämpöteho [MW]	Ekomaiseriin siirretty lämpöteho [MW]
Korkeapainetaso	45,5	102	52,5
Matalapainetaso	2	29	5

Taulukko 3. Kaukolämpöön siirretty lämpöteho.

	Siirretty lämpöteho [MW]
Kylmä vaihdin	20
Kuuma vaihdin	15

Lämmöntalteenottokattilan lämpödiagrammi ja savukaasujen lämpötila eri pisteissä.



Kuva 1. Lämmöntalteenottokattilan lämpötiladiagrammi.

Korkeapainetasen höyrystyslämpötila on $T_{\text{höyry1}}$: 291 °C ja Matalapainetasen höyrystyslämpötila on $T_{\text{höyry2}}$ on 165 °C.

Taulukko 1. Savukaasujen lämpötila eri pisteissä.

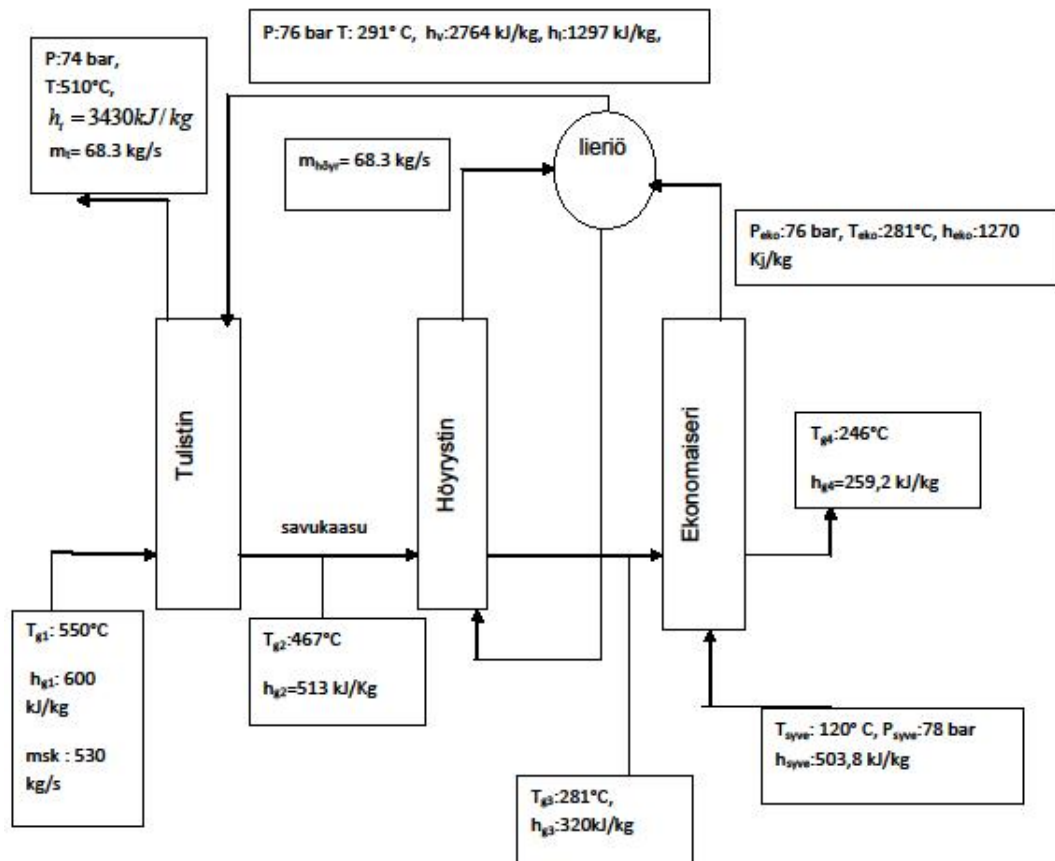
Piste	1	2	3	4	5	6
Savukaasun lämpötila [°C]	550	467	302	206	203	181

$$T_{\text{pinchpoint1}} := T_{\text{sk3}} - T_{\text{höyry1}} \quad T_{\text{pinchpoint1}} := 11^{\circ}\text{C}$$

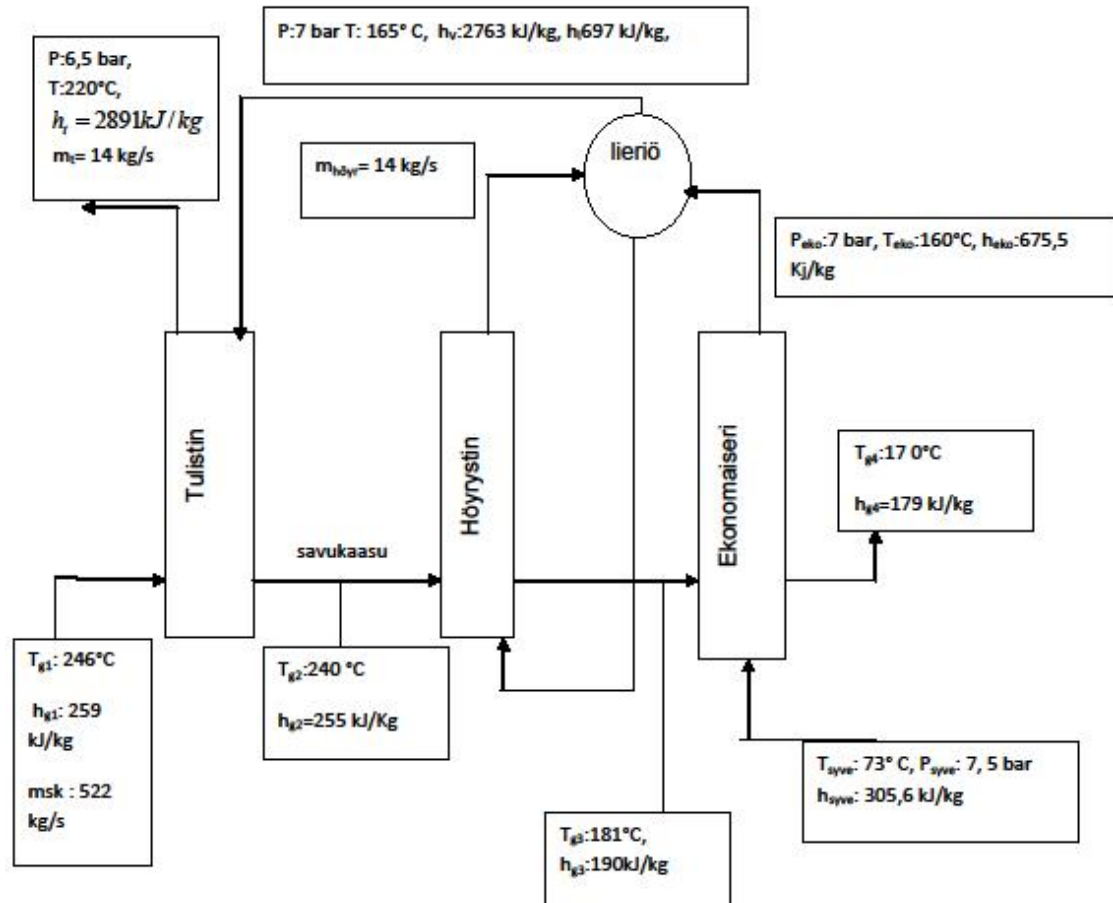
$$T_{\text{pinchpoint2}} := T_{\text{sk6}} - T_{\text{höyry2}} \quad T_{\text{pinchpoint2}} := 16^{\circ}\text{C}$$

Savukaasun lämpöteho Kaasuturbiinin jälkeen on 316 MW. Koko kattilassa talteenotettu lämpöteho on 217 MW eli noin 86 %.

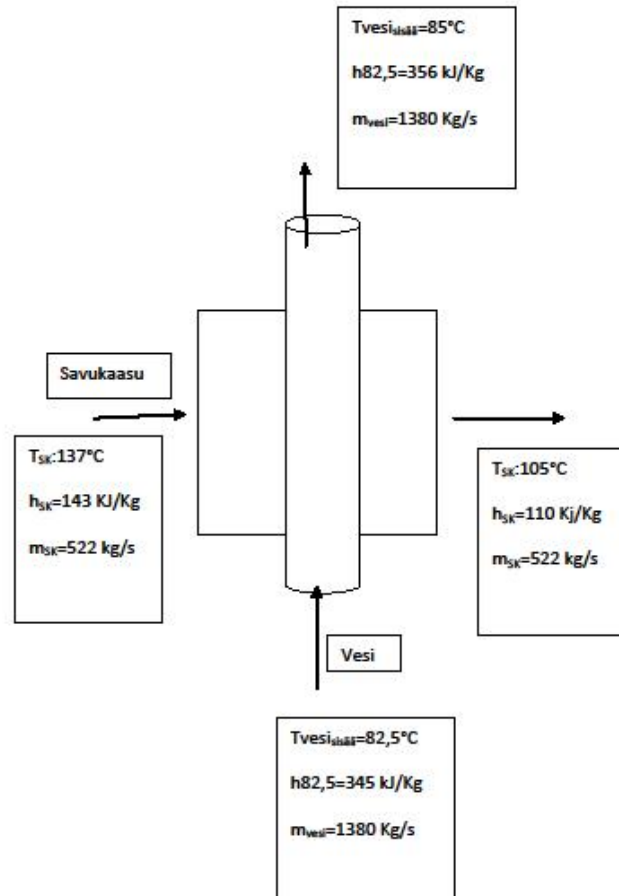
Lämmöntalteenottokaavio korkeapainetasossa



Lämmöntalteenottokaavio matalapainetasossa



Lämmöntalteenottokaavio kuumassa vaihtimessa



Lämmöntalteenottokaavio kylmässä vaihtimessa

