

Antti Lammela

ORC-TEKNIIKAN MAHDOLLISUUDET YDINVOIMALAN
LAUHDE-ENERGIAN HYÖDYNTÄMISESSÄ

Energiatekniikan koulutusohjelma
2011

ORC-TEKNIIKAN MAHDOLLISUUDET YDINVOIMALAN LAUHDE-ENERGIAN HYÖDYNTÄMISESSÄ

Lammela, Antti

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Energiatekniikan koulutusohjelma

Huhtikuu 2011

Ohjaaja:

Zenger, Pekka. TkL. Lehtori SAMK.

Talonpoika, Timo. TkT Dos. Turbiinilaitosinsinööri. TVO Oyj.

Sivumäärä: 47

Liitteitä: 9

Asiasanat: ORC, OTEC, Lauhde, Energian talteenotto,

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön aiheena oli ORC-tekniikan mahdollisuuksien selvittäminen ydinvoimalan lauhde-energian hyödyntämisessä.

Tämän insinöörityön lähtökohtana voidaan pitää Länsi-suomen vesioikeuden Teollisuuden Voima Oyj:lle vuonna 1977 myöntämää oikeutta johtaa laitossyöksiköiden lämmin jäähdytysvesi mereen ja päätöksen myötä tulleet lupavelvoitteet. Lupavelvoitteeksi kirjattiin mm. voimalaitoksen hukkalämmön toteuttamiskelpoisten hyödyntämistapojen etsintä.

Työ on rajattu käsittämään ainoastaan ORC-tekniikan ja sen kaksi eri sovellusta, joissa toisessa käytetään lämpönieluna ilmalauhdutusta ja toisessa laitoksen jäähdytysveden tulopuolelta otettua kylmää merivettä.

Työssä on huomioitu myös tulevien laitosten vaikutus laitossyöksiköiltä kokonaisuudessaan vapautuvaan lauhdelämmön määrään ja lämpötilaan.

Työssä havaittiin, että ORC-prosessilla kyetään optimaalisissa olosuhteissa tuottamaan sähköä ydinvoimalan lauhteesta, mutta asia kaipaa vielä lisätutkimuksia. Tässä työssä ei oteta huomioon laitteiston mitoituksia ja laitoshankinnoista aiheutuvia kustannuksia. Lisäksi työssä ei pyritä optimoimaan erilaisia prosessiarvoja suhteessa investoinnille mahdollisesti suunniteltavaan takaisinmaksuaikaan.

POSSIBILITIES OF ORC TECHNOLOGY TO UTILIZE THE CONDENSING ENERGY IN A NUCLEAR POWER PLANT

Lammela Antti

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Energy Technology.

July 2011

Supervisor:

Zenger, Pekka. Lic.Sc. (Tech) SAMK.

Talonpoika, Timo. D.Sc. (Tech.) Doc. Turbine engineer. TVO Oyj.

Number of pages: 47

Appendices: 9

Keywords: ORC, OTEC, Condensate, Energy utilize.

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to fathom out the possibilities to use the ORC technology to utilize condensing energy of a nuclear power plant.

The thesis was made because of the clearance TVO got in 1977 from the Water right court of West-Finland to transmit the cooling water in the sea. One term of this clearance was that TVO has to search for feasible ways to utilize the waste heat.

The topic is limited to cover two different applications of the ORC technology. In one application the air condenser is used as the heat sink and in the other one cold sea water from the entry side of the plant.

Also the effects of upcoming new plant units have been taken into account.

As a conclusion it can be said that it is possible to produce electricity with the OCR process from the condensate of a nuclear power plant when the circumstances are optimal but further study is still needed. Machinery design and the cost of plant procurement were not studied. Besides this study is not trying to optimize the process numbers in relation to the estimated repayment period of an investment.

SYMBOLI- JA TERMILUETTELO

LYHENTEET

OL1,2,3,4	Olkiluoto 1,2,3,4 ydinvoimalaitosyksiköt
TVO	Teollisuuden Voima Oyj
ORC	Organic Rankine Cycle Rankine kiertoprosessi jossa orgaaninen kiertoaine.
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion. (Merilämpövoimala)
NIST	National Institute of Standards and Technology
CFC	Kylmäaine, joka sisältää klooria, fluoria ja hiiltä.
HCFC	Kylmäaine, joka sisältää vetyä, klooria, fluoria ja hiiltä.
HFC	Kylmäaine, joka sisältää vetyä, fluoria ja hiiltä.
HC	Kylmäaine, joka koostuu hiilivedyistä.

TERMIT

Entalpia	Ominaisenergiaa ilmaiseva suure	[kJ/kg]
Entropia	Ominaislämpö määrää ilmaiseva suure	[kJ/kgK]
Isentrooppinen	Häviötön	

KREIKKALAISET KIRJAIMET

ΔT	Lämpötilan muutos	[K, °C]
η	Hyötysuhde	
\bar{v}	Ominaistilavuus	[m ³ /kg]
ρ	Ominaismassa	[kg/m ³]
\emptyset	Lämpövirta	[kJ/s]

LATINALAISET KIRJAIMET

A	Pinta-ala	[m ²]
s	Entropia	[kJ/kgK]
h	Entalpia	[kJ/kg]
T	Lämpötila	[K, °C]
p	Paine	[Bar, kPa]
C	Ominaislämpökapasiteetti.	[kJ/kgK]
v	Virtausnopeus	[m/s]

YLÄ- JA ALAINDEKSIT

T_{in}	Sisäänmeno lämpötila	
T_{out}	Ulostulolämpötila	
T_{min}	Alin lämpötila	
T_{max}	Korkein lämpötila	
T_{lv}	Lämpimän veden lämpötila.	
T_{kv}	Kylmän veden lämpötila-	
ΔT_a	Asteisuus	
ΔP_{sp}	Paine-ero syöttöpumpun yli	[kPa]
ρ_{ilma}	Ilman ominaismassa	[kg/m ³]
$q_{v,ilma}$	Ilman tilavuusvirta	[m ³ /s]
$\dot{Q}_{kiertoaine}$	Kiertoaineen lämpövirta	[kJ/s]
$\dot{Q}_{lauhdutin}$	Lauhduttimen lämpövirta	[kJ/s]
C_{vesi}	Veden ominaislämpökapasiteetti	[4,19 kJ/kgK]
C_{ilma}	Ilman ominaislämpökapasiteetti	[1 kJ/kgK]
q_{mv}	Meriveden massavirta	[kg/s]
$q_{m,kiertoaine}$	Kiertoaineen massavirta	[kg/s]
$q_{m,jäähditysvesi}$	Lauhduttimessa kiertävän jäähdytysveden massavirta	[kg/s]
$P_{turbiini}$	Turbiinin teho	[kW]
P_{pumppu}	Kiertopumpun teho	[kW]
P_{netto}	Hyödyksi saatava teho	[kW]
h_{2s}	Isentrooppisen paisunnan loppuentalpia.	[kJ/kg]
η_s	Turbiinin isentrooppi hyötysuhde	
$\eta_{prosessi}$	Prosessin sisäinen hyötysuhde	

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ.....	8
3	KIERTOPROSESSIEN TEORIA.....	9
3.1	Clausius Rankine.....	9
3.2	Organic Rankine Cycle.....	10
3.3	Ocean Thermal Energy Conversion.....	13
3.4	Kiertoaineet.....	15
3.4.1	CFC-kylmäaineet.....	15
3.4.2	HCFC-kylmäaineet.....	15
3.4.3	HFC-kylmäaineet.....	15
3.4.4	HC-kylmäaineet.....	16
3.4.5	Muut kylmäaineet.....	16
4	ORC-PROSESSIN SOVELLUS TVO:N LAUHDELÄMMÖN HYÖDYNTÄMISEEN.....	17
4.1	Laskentavaihtoehtoja Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.....	17
4.2	Esimerkkilaskelma kiertoaineena NH ₃	17
4.2.1	Prosessin tilapisteiden laskenta.....	18
4.3	TVO:n lähtökohdat ja olosuhteet.....	27
4.3.1	Yleistä.....	27
4.3.2	Lämmönlähde.....	28
4.3.3	Lämpönielu.....	28
4.4	Lämmönvaihtimet.....	29
4.4.1	Lämmön tuonti ORC-prosessiin.....	29
4.4.2	Lämmön vienti ORC-prosessista.....	33
4.4.3	Yhteenveto laskentatuloksista.....	36
4.5	1 MW laitos OL3 -laitosyksikön yhteyteen.....	40
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	44
	LÄHTEET.....	46
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

OL1 ja OL2-laitosyksiköiden nimellinen reaktoriteho on 2500 MW. Laitosten hyötysuhde on n. 34 %. Loppuenergia johdetaan jäähdytysveden mukana mereen 3300 MW teholla. Tulevaisuudessa käynnistyvän OL3-yksikön ja suunnitteilla olevan OL4-yksikön jäähdytysvedet lämmittävät merta vielä lisäksi arviolta 2700 MW teholla kumpikin.

TVO sai vuonna 1977 Länsi-Suomen vesioikeudelta luvan (päättös n:o 25/1977 B) johtaa OL1 ja OL2 jäähdytysvedet Ison Kaalonperän lahteen. Ehdoiksi lupaan kirjattiin mm. voimalaitoksen hukkalämmön toteuttamiskelpoisten hyödyntämistapojen kartoitus. Siitä asti on TVO:lla aktiivisesti etsitty tapoja jolla tämä energia saadaan hyötykäyttöön.

Tässä työssä keskitytään ORC-prosessin mahdollisuuksiin lauhde-energian talteenotossa. Yleisesti ORC-prosessi tarvitsee suuremman lämpötilaeron, mitä Olkiluodon laitosten läpi jäähdytysvedestä on saatavana (Sipilä 1997). Tämän takia työssäni lähestytään ORC-prosessia OTEC:n näkökulmasta.

Työ on rajattu käsittelemään niin että siinä tutkitaan ainoastaan ORC-tekniikkaa ja sen kahta eri sovellusta. Toisessa käytetään lämpönieluna ilmalauhdutusta ja toisessa ydinvoimalaitoksen jäähdytysveden tulopuolelta otettua kylmää merivettä.

Työn alussa käsitellään ORC- ja OTEC-prosessien teoriaa yleisesti. Tämän jälkeen käsitellään TVO:n tilannetta ja esitellään ratkaisuja TVO:n omilla arvoilla.

2 TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ

Teollisuuden Voima Oyj:n (TVO) perusti 16 Suomalaista teollisuus- ja voimayhtiötä vuonna 1969. TVO tilasi laitosyksikön OL1 toimituksen ASEA Atom:lta (nykyinen Westinghouse AB). Laitosyksikön OL2 rakentamisesta TVO vastasi itse, vaikka laitoistoimittaja olikin ASEA Atom. Olkiluoto 1:n (OL1) liitettiin valtakunnan verkkoon 1978 ja Olkiluoto 2:n (OL2) 1980. TVO rekisteröitiin julkiseksi osakeyhtiöksi 31.12.2007. Yhtiö tuottaa sähköä omistajilleen omakustannushintaan. OL1 ja OL2 tuottivat sähköä vuonna 2009 yhteensä 14,5 TWh, joka on runsaat 16 % Suomen vuotuisesta sähkönkulutuksesta. Olkiluoto 1:n nykyinen nimellinen tuotantoteho on 885 MW ja Olkiluoto 2:n 860 MW.

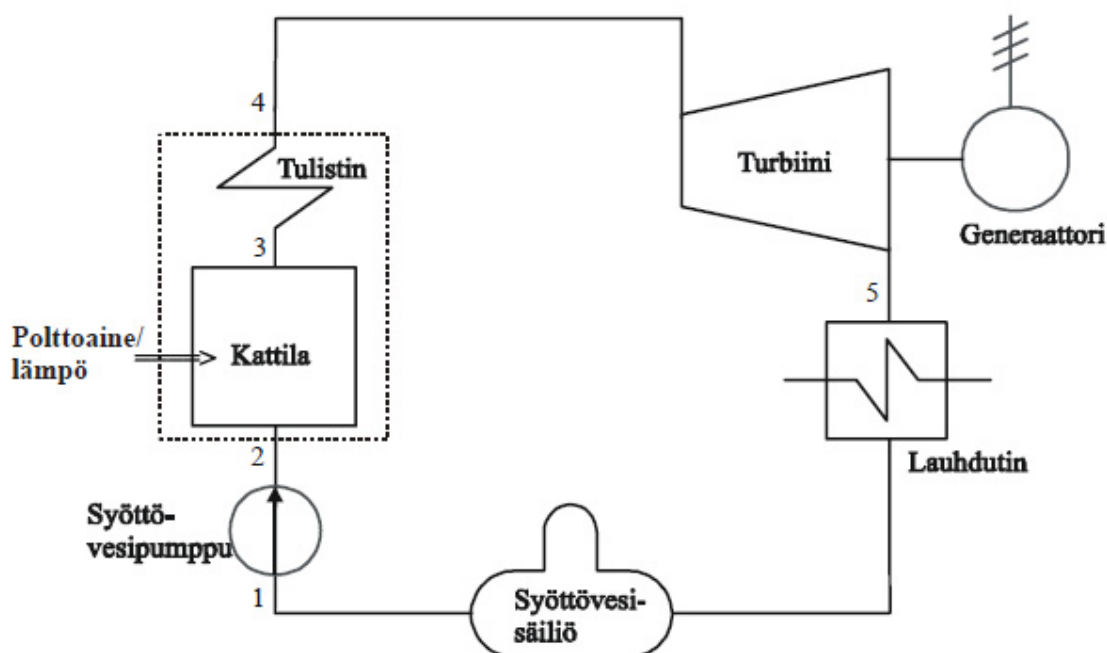
TVO:n tarkoituksena on jatkuvan parantamisen periaatteen mukaisesti pitää laitosyksiköt aina uudenveroisina huoltamalla ja modernisoimalla laitoksia vuosihuolloissa. Tästä syystä laitosten käyttökertoimet ovat maailmanlaajuista huippuluokkaa. Tällä hetkellä TVO rakennuttaa Olkiluotoon kolmatta ydinvoimalalaitosyksikköä (OL3), joka tulee tuplaamaan Olkiluodon sähkötuotannon valmistuttuaan. Heinäkuussa 2010 eduskunta hyväksyi valtioneuvoston päätöksen Olkiluoto 4 ydinvoimalayksikön (OL4) periaatepäätöksestä. TVO omistaa Meri-Porin hiilivoimalaitoksen 565 MW:n tehosta 45 prosenttia sekä Olkiluodossa sijaitsevan 1 MW:n tuulivoimalan. (Teollisuuden Voima Oyj)

3 KIERTOPROSESSIEN TEORIA

Tässä kappaleessa käsitellään ORC- ja OTEC-prosessien teoriaa. Tarkastellaan niiden toimintaperiaatetta sekä kerrotaan kummankin prosessin tekniset vahvuudet ja heikkoudet.

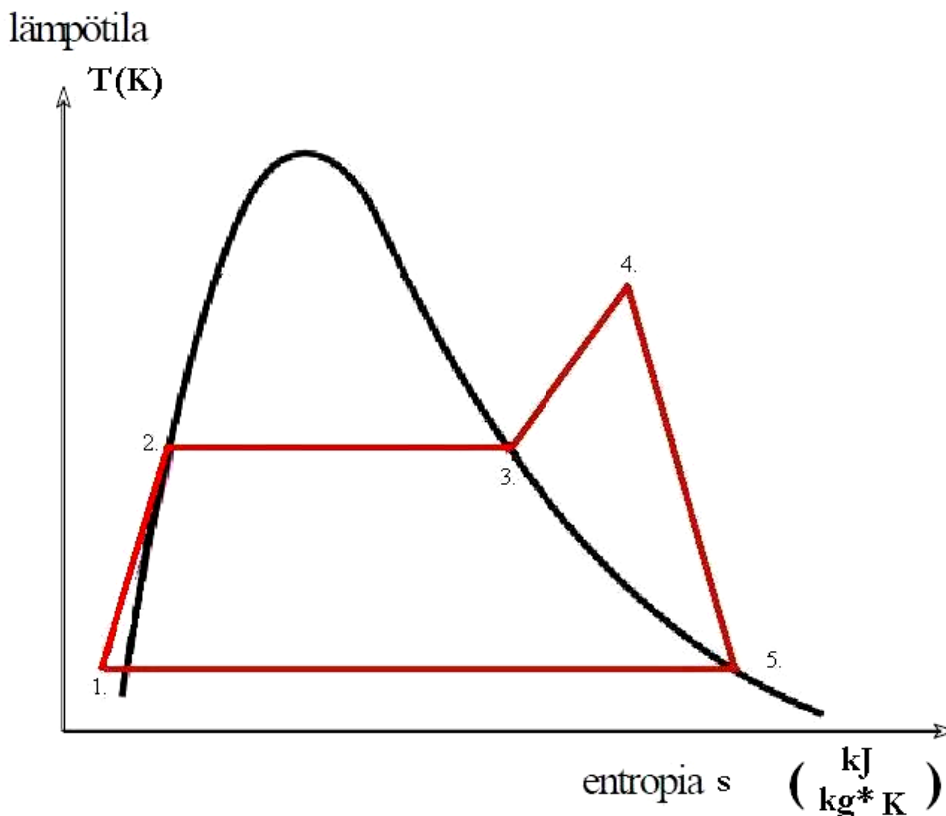
3.1 Clausius Rankine

Clausius Rankine -prosessin toiminta-ajatus on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Yksinkertaistettu höyryvoimalaitoksen prosessi. (Heinimö & Jäppinen 2005)

Höyryvoimalaitosprosessin toimintaperiaate on: (1-2) Syöttövesipumppu pumpkaa veden kattilaan kattilan käyttöpaineisena. (2-3) Kattilassa vesi höyrystyy polttoaineen palamislämmön avulla. (3-4) Tulistimessa höyryn lämpötilaa nostetaan paineen pysyessä vakiona. Turbiinissa höyry paisuu ja höyryn sisältämä lämpöenergia muuttuu mekaaniseksi energiaksi. (4-5) Höyryn paisuessa turbiinissa sen lämpötila ja paine laskevat. Lauhduttimessa höyry lauhdutetaan takaisin nesteeksi ja palautetaan syöttövesisäiliöön. (Heinimö & Jäppinen 2005). Höyryvoima-prosessi on esitetty T,s tasossa kuvassa 2 .



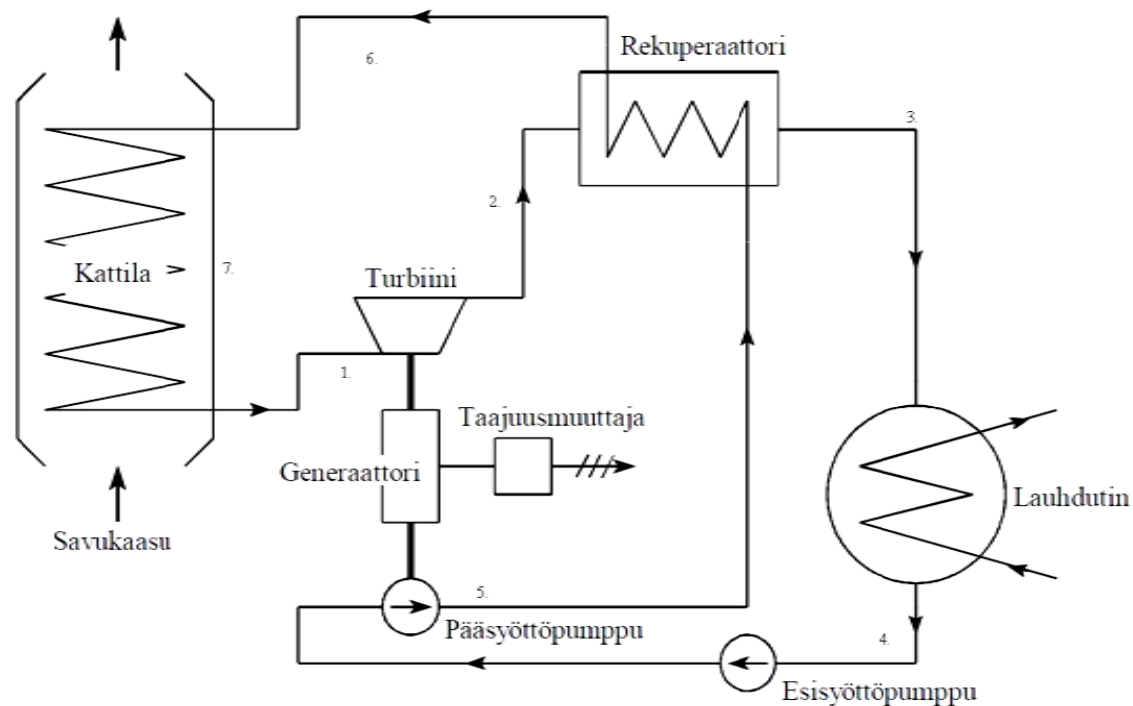
Kuva 2. Höyryvoimaprosessi T,s tasossa

3.2 Organic Rankine Cycle

Organic Rankine Cycle (myöhemmin tässä tekstissä käytetään lyhennettä ORC) on Rankine-prosessi, jossa käytetään kiertoaaineena sopivaa orgaanista nestettä.

ORC-prosessissa kiertoaaineena käytettävän orgaanisen nesteen latenttilämpö on huomattavasti pienempi, kuin yleensä käytössä olevan täyssuolanpoistetun veden, joten sen höyrystyslämpötila on matalampi. Näin ollen höyrystymiseen sitoutuu pienempi energiamäärä ja orgaanisella kiertoaaineella päästään lähemmäksi lämmönlähteen lämpötilaa. Tämän takia ORC soveltuu hyvin matalalle lämpötilatasolle esim. muiden prosessien hukkalämmön hyödyntämiseen. Orgaanisen nesteen ominaisentalpian pudotus jää myös veden vastaavaa pienemmäksi, jolloin pystytään käyttämään pienitehoista yksivaiheista turbiinia, jolla on hyvä hyötysuhde. (Reunanen, Honkatukia, Esa, Pitkänen, Lattu & Larjola 2000,) (Larjola & Nuutila 1995).

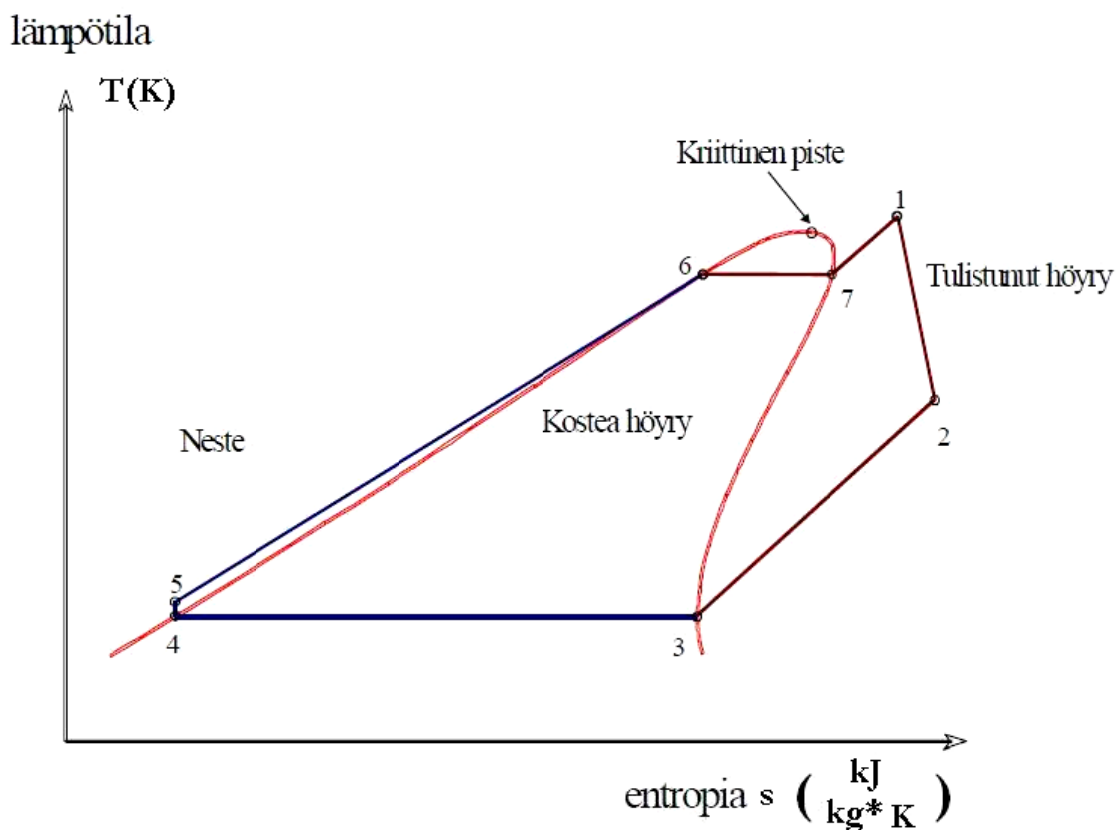
Orgaaniset kiertoaineet, joita käytetään voimalaitosprosesseissa tulistuvat paisuessaan. Tämä tulistus kannattaa poistaa ja ohjata hyödyllisempään kohteeseen, esilämmitykseen, jolloin saavutetaan parempi prosessihiötysuhde. Tähän käytetään lämmönvaihdinta, jota kutsutaan rekuperaattoriksi.



Kuva 3. Suurnopeustekniikkaan perustuvan ORC-pienoisvoimalan periaatekaavio. (Reunanen, Honkatukia, Esa, Pitkänen, Lattu & Larjola 2000)

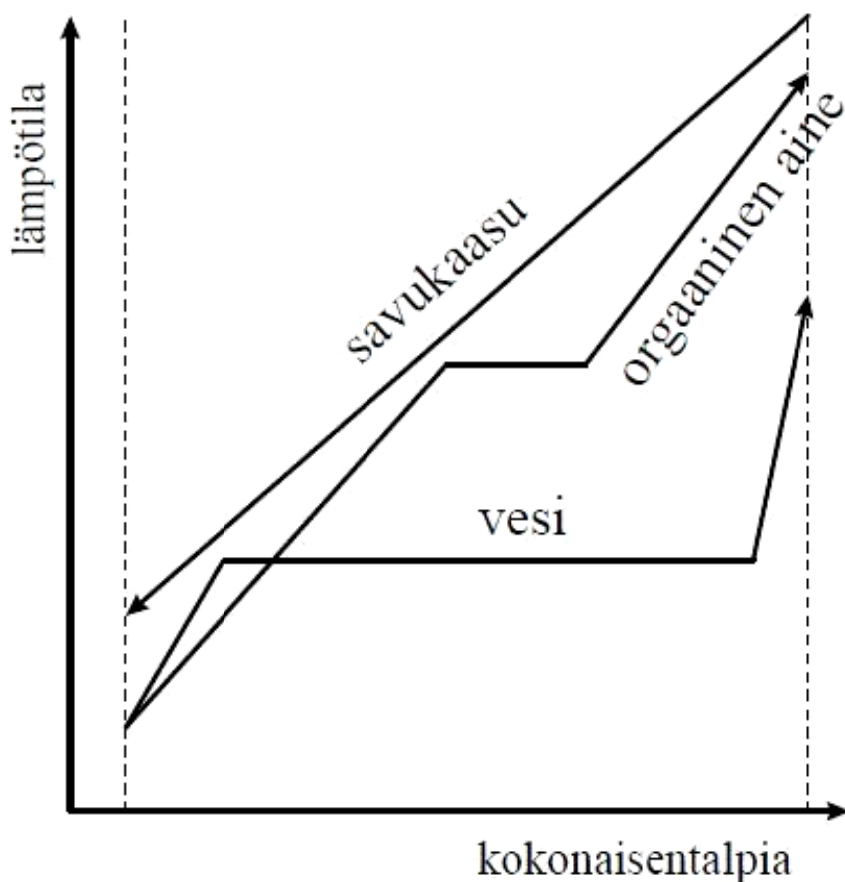
Kuvaan 3 on lisätty toimintapisteet, jotta voidaan samanaikaisesti seurata lämpötilan ja entropian suhdetta kuvasta 4.

Väli (1-2) Tulistunut höyry paisuu turbiinissa. (2-3) Jäljelle jäänyt tulistus poistetaan Rekuperaattorissa. (3-4) Kiertoaine lauhtuu takaisin nesteeksi. (4-5) Kiertoaineen paine nostetaan syöttövesipumpulla. (5-6) Kiertoaine esilämmitetään Rekuperaattorissa. (6-7) Neste höyrystyy. (7-1) Tulistuminen.



Kuva 4. ORC-Prosessi T,s piirros (Heinimö & Jäppinen 2005)

ORC- ja vesihöyryprosessien kattilan lämpötiladiagrammeja vertailtaessa voidaan havaita selvä ero. Veden höyrystyslämpötila on suuri käytettäessä alhaista paine- ja lämpötila tasoa. Tästä aiheutuu vesihöyryn pitkä vaakasuoran osan, joka vaikuttaa tuorehöyryn lämpötilaan. Orgaanisella kiertoineella samalla lämpötilatasolla, painetaso voidaan valita lähemmäs kriittistä painetta. Tällä saavutetaan suhteellisen alhainen höyrystyslämpö. Kuvassa 5 on esitetty ORC- ja vesihöyryprosessien kattilan lämpötiladiagrammien vertailu.

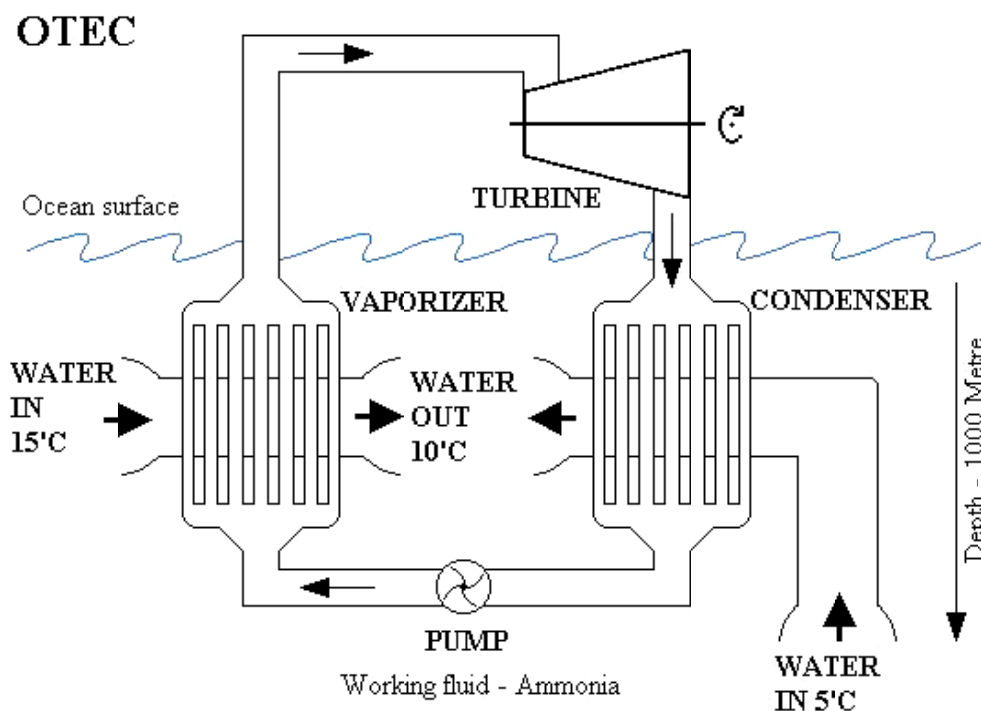


Kuva 5. ORC- ja vesihöyryprosessien kattilan lämpötiladiagrammien vertailu. (Reunanen, Honkatukia, Esa, Pitkänen, Lattu & Larjola 2000)

3.3 Ocean Thermal Energy Conversion

Ocean Thermal Energy Conversion (myöhemmin tekstissä käytetään lyhennettä OTEC). Toiminta perustuu meren eri kerroksissa oleviin lämpötilaeroihin. Päivän-tasaajan seudulla meren eri kerrosten lämpötila ero voi olla yli 20 astetta. Pintavettä käytetään höyrystimessä kiertoineen höyrystämiseksi ja syvältä merestä pumpattu kylmä vesi toimii lauhduttimessa jäähdytteenä. OTEC ei sinänsä eroa periaatteeltaan juuri ORC-prosessista muuta, kuin kiertoineen osalta. OTEC-prosessin lämpötila-erot ovat huomattavasti pienemmät kuin yleisesti ORC-prosesseissa on totuttu. OTEC-prosesseissa kiertoineina käytetään yleisesti ammoniakki, R134A tai jotain muuta vastaavaa kylmäainetta. ORC-prosessissa turbiinin tuotosta häviää n. 20–30 % pumppaus- sekä lämmönsiirtohäviöihin. Ihanteellisesti prosessi toimii, kun on saata-

villa lämmönlähteenä 26 °C sekä jäähdytteenä 4 °C kylmää vettä. On todettu, että 1 MW(netto) tuottamiseen vaaditaan 4 m³/s lämmintä sekä 2 m³/s kylmää vettä. Kyseisillä arvoilla laskentaohjelma antaa 1,8 MW tehon. Siitä vähentämällä 30 % häviöihin saadaan n. 1,2 MW teho. OTEC tarvitsee minimissään 10 asteen lämpötilaeron tuottaakseen sähköä. Kuvassa 6 on esitetty periaatteellisella tasolla OTEC:n karkea toimintaperiaate.



Kuva 6. OTEC-toimintakaavio. (cosmosfrontier:in www-sivut.2011)

Jotta OTEC prosessin häviöt pysyisivät 20–30 % tasossa, pitää pumpattavan veden keskinopeus pitää alle 2 m/s. Tästä johtuen käytännössä laitosten koot rajoittuvat alle 100 MW tehoihin. 100 MW laitos käyttää 400 m³/s, 26 °C merivettä. Sitä on pumpattava sisähalkaisijaltaan 16 metrin putkella, 20 metrin syvyydestä. 4 °C vettä tarvitaan 200 m³/s. Sitä pumpataan 1000 metrin syvyydestä 11 metriä sisähalkaisijaltaan olevalla putkella. (OTEC- December 1999)

3.4 Kiertoaineet

Kyseisen ORC-prosessin lämpötiloilla kiertoaineena voidaan käyttää lähes mitä tahansa kylmäkoneista tuttua kylmäainetta. Lainsäädäntö kuitenkin rajoittaa eräiden kylmäaineiden käyttöä. Tässä kappaleessa käsitellään kiertoaineiksi soveltuvia kylmäaineita ja niiden rajoituksia.

3.4.1 CFC-kylmäaineet

CFC-lyhenne tulee englanninkielisistä sanoista: chlorine-fluorine-carbon, jotka viittaavat kylmäaineen sisältämiin kemikaaleihin. CFC-kylmäaineet aiheuttavat otsonikatoa ja ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Yleisimpiä CFC-aineita ovat R11, R12, R500 ja R503. Aineiden valmistus- ja maahantuontikielto on ollut Euroopassa voimassa 1995 alusta lähtien. Edellä mainituista syistä CFC-aineet jätetään pois tutkimuksesta. (EY N:o 3093/94)

3.4.2 HCFC-kylmäaineet

HCFC sisältää samat aineet kuin CFC, mutta mukana on myös vetyä. HCFC-kylmäaineet eivät ole niin vaarallisia otsonikadolle, kuin CFC-aineet, mutta nekin ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Yleisin HCFC-kylmäaine on R22. HCFC-aineiden käyttö on jo rajoitettu ja ne tullaan kieltämään vuodesta 2015 eteenpäin. Näin ollen HCFC-aineet rajataan myös tutkimuksen ulkopuolelle. (EY N:o 2037/2000)

3.4.3 HFC-kylmäaineet

HFC-kylmäaine sisältää vetyä, fluoria ja hiiltä. HFC-kylmäaine ei itsessään aiheuta otsonikatoa, mutta se reagoi kloorin ja bromin kanssa muodostaen otsonikatoa aiheuttavia yhdisteitä. HFC-kylmäaineet ovat myös voimakkaita kasvihuonekaasuja. Yleisimmät HFC-kylmäaineet ovat R134a, R404A, R407C, R410A ja R507. HFC-kylmäaineiden käyttöä säätelee asetus: (EY) N:o 842/2006. HFC-kylmäaineista yritetään koko ajan päästä eroon, joten nekin rajataan tutkimuksen ulkopuolelle.

3.4.4 HC-kylmäaineet

HC-yhdisteet ovat hiilivetyjä. Hiilivedyt ovat palavia kaasuja, jotka eivät aiheuta otsonikatoa. Niiden vaikutus kasvihuoneilmiöön on verrattain pieni. Yleisimmät kylmäaineina käytetyt aineet ovat isoputaani ja propaani. Propaanin käyttöä tutkitaan vielä Euroopassa.

3.4.5 Muut kylmäaineet

On olemassa muitakin kylmäaineiksi soveltuvia aineita, joita ei suoranaisesti voida liittää edellä mainittuihin ryhmiin. Esimerkiksi Ammoniakki (NH_3) ja Hiilidioksidi (CO_2). Ammoniakki ei ole kasvihuonekaasu eikä se ole haitallinen otsonikerrokselle. Ammoniakki on myös palava neste. Hiilidioksidi on hyvin kauan käytössä ollut kylmäaine. Hiilidioksidi on palamaton ja hyvin yleinen kaasu ilmakehässä.

Tässä tutkimuksessa rajataan pois kaikki CFC-, HCFC- ja HFC-yhdisteet niiden tulevaisuudessa kyseenalaisen käytettävyyden takia. HC-aineista propaani on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen ammoniakkin kanssa. Kahta samankaltaista kiertoainetta ei haluttu ottaa tutkimukseen, joten propaanin ja ammoniakkin väliltä valittiin ammoniakki. Ammoniakki on hyvin yleinen kylmäaine, joten sen saatavuus on hyvä. Tästä syystä ammoniakki on hyvä ottaa mukaan tutkimukseen. Hiilidioksidin ominaisuudet ovat hyvin erilaiset kuin ammoniakilla. Hiilidioksidi tekee uutta tulemistaan kylmäainesaralla sekä sen saatavuus on hyvä. Myös hiilidioksidin käyttöä tarkastellaan tutkimuksessa.

4 ORC-PROSESSIN SOVELLUS TVO:N LAUHDELÄMMÖN HYÖDYNTÄMISEEN

Tässä kappaleessa käydään läpi prosessin toiminta TVO:lla vallitsevissa olosuhteissa. Tehdään esimerkkilaskelma ja käsitellään prosessia eri kiertoaineella sekä eri lämpönieluilla.

4.1 Laskentavaihtoehtoja Excel-taulukkolaskentaohjelmalla

Excel-ohjelma, jolla tämän työn prosessin toiminta on laskettu, on peräisin Lappeenrannan teknillisestä yliopistosta. Tästä ohjelmasta on lähdetty kehittämään varsinaista laskentaohjelmaa. Ohjelma oli alun perin kehitetty oppilaiden käyttöön harjoitustöissä. Toimintaperiaatteena tässä ohjelmassa oli ottaa energiaa talteen kattilan savukaasuista ORC-prosessin avulla. Laskentaohjelmassa oli otettu myös huomioon turbiinin jälkeisen tulistuneisuuden poisto rekuperaattorilla. Ohjelmassa oli mahdollisuus tarkastella vain yksiä lämpötila-arvoja kerrallaan. Ohjelmaa muutettiin niin, että se kykenee laskemaan prosessin tilapisteen ja sitä kautta tehot kokonaiselle vuodelle trendin mukaan. Ohjelmaan pitää ainoastaan siirtää koko vuoden lämpötilatiedot, joiden mukaan ohjelma laskee saavutettavat tehot. Ohjelmaan liitettiin myös NIST:in (National institute of standards and technology) kokoaman Refprop kirjastotietokannan. Kirjastotietokannan avulla Excel kykenee etsimään eri kiertoaineilla paineet, lämpötilat, entropian ja entalpian eri lähtötietojen perusteella. Tämä nopeuttaa laskentaprosessia huomattavasti.

4.2 Esimerkkilaskelma kiertoaineena NH₃

Esimerkkilaskelmassa on valittu olosuhteiksi lämmönlähteeseen 14,47 °C sekä lauhduttimen jäähdytysvedeksi 0,0 °C merivesi. Kieroaineeksi on valittu Ammoniakki. Olosuhde on edullisin ammoniakille Excel-laskentaohjelman mukaan. Lämpimän meriveden virtaus höyrystimenä toimivan lämmönvaihtimeen on valittu 100 kg/s. Lämmönvaihtimien, jotka toimivat höyrystimenä sekä lauhduttimena, ominaisuudet on valittu Excel-laskentaohjelmalla optimoimalla. Lämmönvaihtimien lämpötilamuutokseksi on valittu 3 K sekä asteisuudeksi 0,8 K. Asteisuuden valintaan vaikutti

se, että saadaan kiertoaineen virtaus mahdollisimman pieneksi. Tässä tutkimuksessa asteisuudella tarkoitetaan lämmönvaihtimilta lähtevien virtausten lämpötilaeroa.

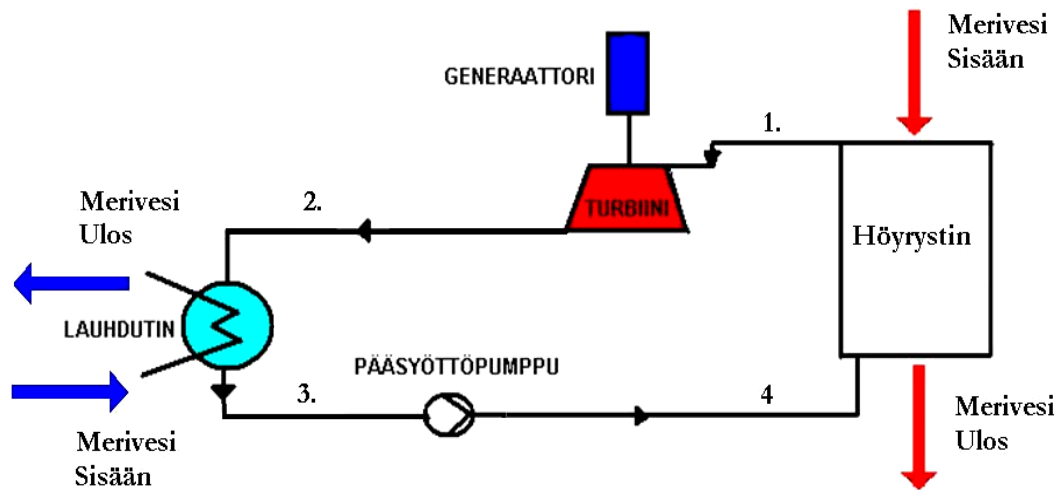
Laskelmissa ei oteta huomioon rekuperaattorin vaikutusta, koska turbiinin jälkeinen tilapiste on päätetty sijaitsemaan kylläisen höyryn käyrällä. Näin ollen turbiinin jälkeistä tulistusta ei tarvitse poistaa. Laskelmissa ei oteta huomioon putkiston ja lauhduttimen painehäviöitä. Oletuksena on, ettei lauhduttimessa tapahdu alijäähtymistä ja lämpötila ei nouse pääsyöttöpumpussa sekä kiertoaineen massavirta pysyy samana kaikissa tilapisteissä. Laskelmissa otetaan tarkat tilapisteiden arvot Excel-laskentaohjelmasta, mutta asian selkeyttämiseksi tilapisteet esitetään myös T, s ja p, h tasoissa.

Laskelmissa selvitetään:

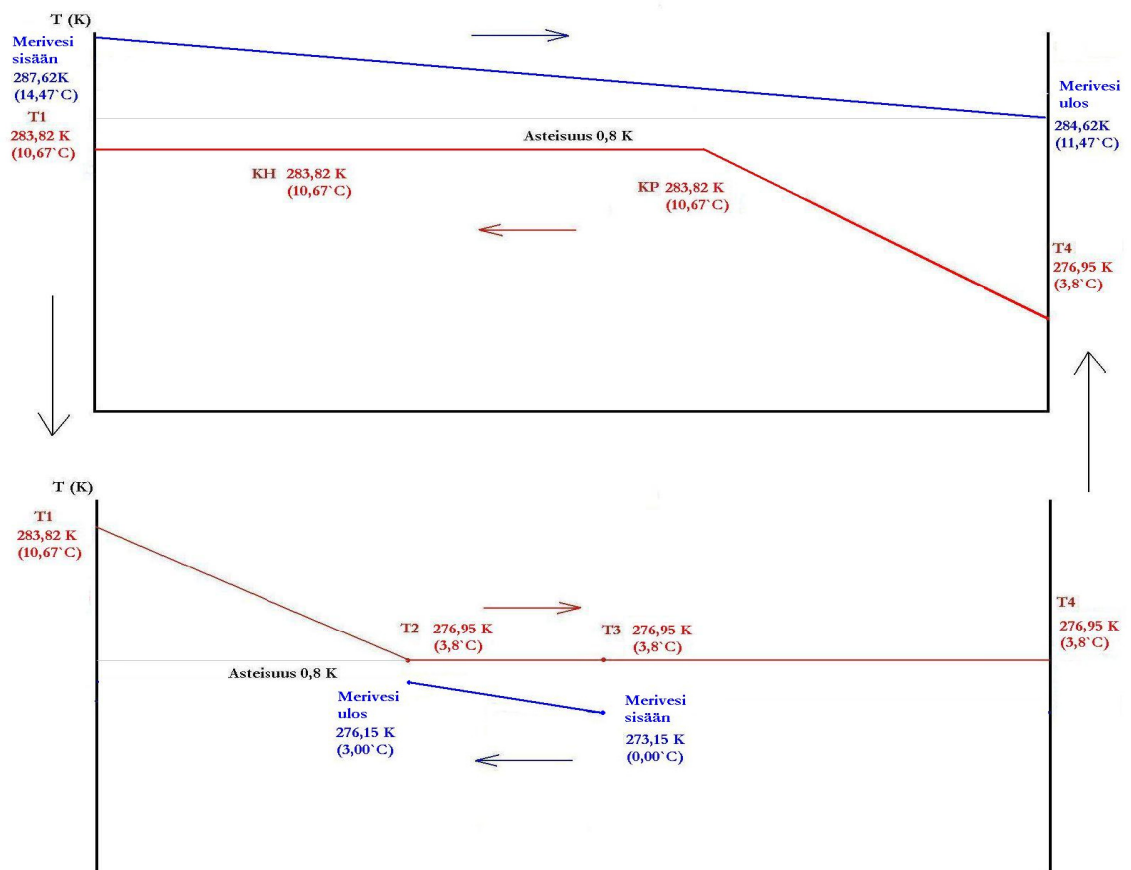
- prosessin tilapisteet
- kiertoaineen massavirta
- jäähdytysveden massavirta
- turbiineista saatava teho
- prosessihyötysuhde
- kokonaishyötysuhde
- nettosähköteho

4.2.1 Prosessin tilapisteiden laskenta

Tilapisteitä ei lasketa järjestyksessä vaan ensiksi lasketaan höyrystimen jälkeinen tila ennen turbiinia (1). Tämän jälkeen lasketaan lauhduttimen jälkeinen tilapiste ennen syöttöpumppua (3). Tämän jälkeen lasketaan turbiinin jälkeinen tilapiste ennen lauhdutinta (2), jonka jälkeen lasketaan syöttöpumpun jälkeinen tilapiste ennen kattilaa (4). Kuvassa 7 on esitetty pisteiden sijainnit prosessissa. Vastaavat pisteet löytyvät myös kuvasta 8, jossa esitetään veden ja kiertoaineiden lämpötilataso ja niiden ero prosessin eri vaiheissa.



Kuva 7. Tilapisteet prosessipiirroksessa



Kuva 8. Meriveden (sinisellä) ja kiertoaineen (punaisella) lämpötilat eri tilapisteissä

4.2.1.1 Piste 1. höyrystimen jälkeinen tila ennen turbiinia

Pisteen 1 arvot riippuvat höyrystimeltä siirtyvän höyryn lämpötilasta. Höyrystimenä toimivan lämmönvaihtimen asteisuus sekä lävitse virtaavan meriveden ΔT tunnetaan. Näistä arvoista saadaan kiertoaineen lämpötila joka on kuvassa 9 esitetty pisteenä T4.

Lämpimän meriveden lämpö $T_{lv} = 287,62 \text{ K}$ ($14,47 \text{ °C}$)

Lämmönvaihtimen asteisuus $\Delta T_a = 0,8 \text{ K}$

Meriveden lämpötilamuutos lämmönvaihtimessa $\Delta T = 3,0 \text{ K}$

Kiertoaineen lämpötila höyrystyneenä. $T_1 = 283,82 \text{ K}$

$$T_1 = T_{lv} - \Delta T - \Delta T_a \quad (1)$$

$$T_1 = 287,62 \text{ K} - 3,0 \text{ K} - 0,8 \text{ K} = 283,82 \text{ K}$$

Lämpötilaviiva on piirretty liitteessä 1 olevaan ammoniakkin T,s tasoon.

Piirretystä viivasta voimme havaita $p_1 = 6,29 \text{ bar}$ kylläisen höyryn käyrällä. Samalla näemme entalpian olevan noin $h_1 = 1615,87 \text{ kJ/kg}$ ja entropian $s_1 = 5,96 \text{ kJ/kgK}$.

Kun tiedetään paine ja lämpötila, niin entalpian voimme varmistaa liitteenä 2 olevasta ammoniakkin p,h tasosta.

4.2.1.2 Piste 3. Lauhduttimen jälkeinen tila ennen syöttöpumppua

Tämän pisteen arvot saadaan kun tiedetään lauhtumislämpötila T_3 .

Kylmän meriveden lämpö $T_{kv} = 273,15 \text{ K}$

$$T_3 = T_{kv} + \Delta T_{out} + \Delta T \quad (2)$$

$$T_3 = 273,15 \text{ K} + 0,8 \text{ K} + 3 \text{ K} = 276,95 \text{ K}$$

Liitteenä 3 olevasta ammoniakkin T,s tasosta näemme paineen lauhtumislämpötilassa, $p_3 = 4,94 \text{ bar}$.

Kun paine ja lämpötila on tiedossa saadaan entalpia selville liitteenä 4 olevasta ammoniakkin p,h tasosta $h_3 = 360,78 \text{ kJ/kg}$

4.2.1.3 Piste 2. Turbiinin jälkeinen tila ennen lauhdutinta

Ennen varsinaisia tilapisteiden arvoja pitää selvittää todellinen entalpia turbiinin jälkeen h_2 .

h_2 saadaan kaavasta:

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (3)$$

$$h_2 = h_1 - \eta_s * (h_1 - h_{2s}) \quad (4)$$

Jossa oletettu turbiinin isentrooppi hyötysuhde $\eta_s = 0,82$.

Isentrooppisen paisunnan loppuentalpia h_{2s} saadaan p,h tasosta kulkemalla pisteestä $h_1 = 1615,87 \text{ kJ/kg}$ käyrän $s_1 = 5,96 \text{ kJ/kgK}$ suuntaisesti lauhtumispaineeseen

$p_3 = p_2 = 4,94 \text{ bar}$ asti. Liitteestä 5 näemme $h_{2s} = 1585,64 \text{ kJ/kg}$

T_2 on sama kuin lauhtumislämpötila.

Näillä tiedoin voidaan laskea h_2

$$h_2 = 1615,87 \text{ kJ/kg} - 0,82 * (1615,87 \text{ kJ/kg} - 1585,64 \text{ kJ/kg})$$

$$= 1591,09 \text{ kJ/kg}$$

4.2.1.4 Piste 4. Syöttöpumpun jälkeinen tilapiste ennen höyrystintä

Syöttöpumpun jälkeisen tilapisteen laskemiseen tarvitaan kiertoaineen ominaistilavuus. Ominaistilavuus saadaan laskettua T,s tasosta saatavasta ominaismassasta. Liitteestä 6 nähdään ominaismassan olevan $\rho = 636 \text{ kg/m}^3$. Näin ollen ominaistilavuus \bar{v} kyetään laskemaan kaavalla:

$$\bar{v} = \frac{1}{\rho} \tag{5}$$

$$\bar{v} = \frac{1}{636 \text{ kg/m}^3} = 0,001572 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Pisteen 4 lämpötila on sama kuin pisteessä 3, sekä paine on sama kuin pisteessä 1.

$$T_4 = T_3$$

$$p_4 = p_1$$

Pisteen 4 entalpia h_4 saadaan kaavalla:

$$h_4 = h_3 + \bar{v} * \Delta P_{sp} \tag{6}$$

$$\Delta P_{sp} = p_4 - p_3 = \text{kPa} \tag{7}$$

$$h_4 = 360,78 \text{ kJ/kg} + (0,001572 \text{ m}^3/\text{kg} * (629 \text{ kPa} - 494 \text{ kPa}))$$

$$= 360,99 \text{ kJ/kg}$$

Liitteessä 7 on piirretty koko prosessi T,s tasoon. Liitteessä 8 on sama esitettynä p,h tasossa.

4.2.1.5 Kiertoaineeseen höyrystimessä siirtynyt teho

Tässä kappaleessa lasketaan teho joka saadaan siirrettyä kiertoaineeseen merivedestä. Teho saadaan kaavalla:

$$\dot{\Phi}_{kiertoaine} = q_{mv} * C * (T_{in} - T_{out}) \quad (8)$$

Jossa:

meriveden virtaus lämmönvaihtimen lävitse	q_{mv}	= 100 kg/s
Veden ominaislämpö kapasiteetti	C_v	= 4,19 kJ/kgK
Veden sisään menolämpötila lämmönvaihtimeen	T_{in}	= 287,62 K (14,47 °C)
Veden ulostulolämpötila lämmönvaihtimesta	T_{out}	= 284,62 K (11,47 °C)

$$100 \text{ kg/s} * 4,19 \text{ kJ/kgK} * (287,62 \text{ K} - 284,62 \text{ K}) = 1257 \text{ kJ/s}$$

4.2.1.6 Kiertoaineen massavirta.

Kiertoaineen massavirran laskemiseen tarvitaan kiertoaineeseen siirtynyt teho sekä entalpia ero höyrystimen yli. Sijoitetaan ne kaavaan:

$$q_{m.kiertoaine} = \frac{\dot{\Phi}_{kiertoaine}}{(h_1 - h_4)} \quad (9)$$

$$q_{m.kiertoaine} = \frac{1257 \text{ kJ/s}}{(1615,87 \text{ kJ/kg} - 360,99 \text{ kJ/kg})} = 1,00 \text{ kg/s}$$

4.2.1.7 Turbiineista saatava teho

Turbiineista saatavan tehon laskemiseen tarvitaan kiertoaineen massavirta, sekä entalpia ero turbiinin yli.

$$P_{turbiini} = q_{m.kiertoaine} * (h_1 - h_2) \quad (10)$$

$$P_{turbiini} = 1,00 \text{ kg/s} * (1615,87 \text{ kJ/kg} - 1591,09 \text{ kJ/kg}) = 24,78 \text{ kW}$$

4.2.1.8 Syöttöpumpun teho

Pumpun vaatima tehon laskemiseen tarvitaan kiertoaineen virtaus sekä entalpia ero syöttöpumpun yli.

$$P_{pumppu} = q_{m.kiertoaine} * (h_4 - h_3) \quad (11)$$

$$P_{pumppu} = 1,00 \text{ kg/s} * (360,99 \text{ kJ/kg} - 360,78 \text{ kJ/kg}) = 0,21 \text{ kW}$$

4.2.1.9 Jäähdytysveden tarve lauhduttimessa

Jäähdytysveden massavirran laskemiseen tarvitaan lauhduttimessa mereen siirtynyt teho ja meriveden lämpötilaero.

Meriveden sisäänmeno lämpötila $T_{in} = 273,15 \text{ K} (0,00 \text{ °C})$

Meriveden ulostulo lämpötila $T_{out} = 276,15 \text{ K} (3,00 \text{ °C})$

$$q_{m.\text{jäähdytysvesi}} = \frac{q_{m.\text{kiertoaine}}(h_2 - h_3)}{C_{\text{vesi}}(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})} \quad (12)$$

$$q_{m.\text{jäähdytysvesi}} = \frac{1,00 \text{ kg/s} * (1591,09 \text{ kJ/kg} - 360,78 \text{ kJ/kg})}{4,19 \text{ kJ/kgK} * (276,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K})} = 97,88 \text{ kg/s}$$

4.2.1.10 Lauhduttimen lämpövirta

Lauhduttimen lämpövirta $\Phi_{\text{lauhdutin}}$ saadaan laskettua kaavalla:

$$\Phi_{\text{lauhdutin}} = q_{m.\text{jäähdytysvesi}} * C_{\text{vesi}}(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (13)$$

$$\Phi_{\text{lauhdutin}} = 97,88 \text{ kg/s} * 4,19 \text{ kJ/kgK} * (276,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K}) = 1230,35 \text{ kJ/s}$$

4.2.1.11 Nettosähköteho

Nettosähköteho saadaan vähentämällä turbiinin antamasta tehosta syöttöpumpun vaatima teho. Laskelmissa ei ole huomioitu generaattorin hyötysuhdetta eikä syöttöpumpun vetotapaa. Nettosähköteho laskussa on jätetty pois myös mahdollinen kiertovesipumppu, jolla saadaan merivesivirtaus lämmönvaihtimien lävitse.

$$P_{\text{netto}} = P_{\text{turbiini}} - P_{\text{pumppu}} \quad (14)$$

$$P_{\text{netto}} = 24,78 \text{ kW} - 0,21 \text{ kW} = 24,57 \text{ kW}$$

4.2.1.12 Prosessi hyötysuhde

Prosessin hyötysuhde kertoo, paljonko kiertoineeseen siirtyneestä tehosta saadaan hyödynnettyä sähkötehoksi. Se saadaan laskemalla kaavasta:

$$\eta_{\text{prosessi}} = \frac{P_{\text{turbiini}} - P_{\text{pumppu}}}{\Phi_{\text{kiertoaine}}} \quad (15)$$

$$\eta_{\text{prosessi}} = \frac{24,78 \text{ kW} - 0,21 \text{ kW}}{1257 \text{ kW}} * 100 \% = 1,95 \%$$

4.2.1.13 Carnot-hyötysuhde

Carnot-hyötysuhde kertoo suurimman mahdollisen hyötysuhteen, joka tietyllä lämpötilaerolla on saatavilla. Carnot-prosessi on täysin häviötön.

Carnot hyötysuhde saadaan laskettua kaavalla:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \quad (16)$$

$$\eta_C = 1 - \frac{273,15 \text{ K}}{287,62 \text{ K}} * 100 \% = 5 \%$$

4.3 TVO:n lähtökohdat ja olosuhteet

Tässä kappaleessa käsitellään lämmön lähdettä, lämmön määrää sekä lämpönielua. Mitä mahdollisuuksia olosuhteet antavat ORC-tekniikalle ja sen eri sovelluksille.

4.3.1 Yleistä

Ydinvoimalan valvomossa seurataan jatkuvasti eri mittausarvoja niin laitoksen sisällä kuin laitoksen ulkopuolellakin. Laitoksen prosessitietokoneelta on saatu seuraavat mittausarvot:

- Laitoksen jäähdytysveden tuloaukon lämpötila. Mittapiste 112K501
- Laitoksen jäähdytysveden poistoaukon lämpötila. Mittapiste 434K575
- Ulkoilman lämpötila kahdessa metrissä. Mittapiste 141K511
- Turbiinin päähöyryventtiilin asento. Mittapiste 431K551

Laitoksen jäähdytysveden tuloaukon lämpötilaa tarvitaan laskelmissa lauhduttimen tulolämpötilana. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa käytetään lauhduttimessa kylmää merivettä. Mittapisteen 112K501 arvo kuvaa mitä parhaiten saatavilla olevan meriveden lämpötilaa. Jäähdytysvesi lämpenee jonkin verran kulkiessaan ydinvoimalan lauhduttimen lävitse. Tämä energia on jätelämpöä, jonka talteenottoa tutkimuksessa selvitetään. Mittapiste 434K575 kertoo minkä lämpöistä merivettä on käytettävissä ORC-voimalan höyrytimen lämmönlähteenä.

Tutkimuksen toisessa vaiheessa tutkitaan mahdollisuutta käyttää ORC-voimalan lauhduttimessa lämpönieluna ilmaa. Mittapiste 141K511 kertoo käytettävissä olevan ilman lämpötilan. Jotta olosuhdetaulukosta tiedettäisiin ydinvoimalan tila sekä sen aikaansaaman meren lämpenemisen pysyvyys on arvoihin lisätty turbiinin päähöyryventtiilin asentotieto. Tämä arvo kertoo suoraan milloin höyryä on menossa turbiinille aiheuttaen lämpökuormaa jäähdytysveteen. Mittausarvot ovat Olkiluoto 1:n arvoja vuodelta 2009 eli ennen vuonna 2010 tehtyjä mittavia turbiini- ja jäähdytysvesimuu- toksia. Ennen modernisointeja meriveden lämpenemä oli hieman lähempänä OL3:sen tulevia arvoja kuin nykyään modernisointien jälkeen. Kaikki arvot ovat 8 tunnin keskiarvoja.

4.3.2 Lämmönlähde

Lämmönlähde muodostuu meriveden lämpötilasta sekä siihen lisätystä lämpökuormasta, jonka ydinvoimala aiheuttaa tuottaessaan sähköä. Saatavilla oleva lämpötila-
taso on pienimmillään 13,55 °C ja suurimmillaan 34,99 °C. Arvoista on karsittu pois
pidemmät ydinvoimalan seisokit. Vuonna 2009 vuosihuolto alkoi 3.5 ja päättyi 15.5.
Tuona aikana saadut tulokset pyyhitään pois lopullisista tuloksista niiden tuloksia
vääristävästä vaikutuksesta johtuen. OL1:llä alkoi 14.11.2009 alasajoon johtanut häi-
riö, joka kesti hieman yli vuorokauden. Tuo ajankohta karsitaan myös pois tuloksista.
Vuoden aikana on sattunut muitakin lyhyempiä häiriötilanteita, mutta niiden lyhyeh-
kön luonteen takia niitä ei ole tarpeellista erottaa tuloksista.

4.3.3 Lämpönielu

Tutkimuksessa käytetään kahta eri lämpönielua, merivettä sekä ilmaa. Meriveden
lämpötila vaihtelee -0,22 °C ja 22,07 °C välillä. Virtaavan meriveden lämpötila voi
laskea jonkin verran pakkasen puolelle jäätyttä. Tutkimuksessa kaikki alle nolla
asteen menevät arvot korjataan nolaksi. Liiaksi pakkasen puolelle menevä merivesi
todennäköisesti jäätyisi tullessaan lauhduttimelle aiheuttaen tukkeutumisen. ORC-
prosessin lauhduttimen tulovesi todennäköisesti otettaisiin ydinvoimalan tulo-
vesikanavasta puhdistuslinjojen jälkeen, jolloin meriveden ollessa kylmimmillään
sekin olisi jo hieman lämmitettyä. Ilman lämpötilan mittausasemassa oli poissa käy-
töstä 2.9.2009 ja 28.9.2009 välisenä aikana. Tuona aikana saamatta jääneet mittaus-
arvot on lisätty käsin. Kasinsyötössä arvoiksi syötettiin lämpötilat jotka seuraavat
meriveden lämpötilakäyrää. Lämpötiloista piirrettyssä trendistä (Liite 9) voidaan ha-
vaita ilman lämpötilan seuraavan keskiarvoisesti hyvin lähellä meriveden lämpötilaa.

4.4 Lämmönvaihtimet

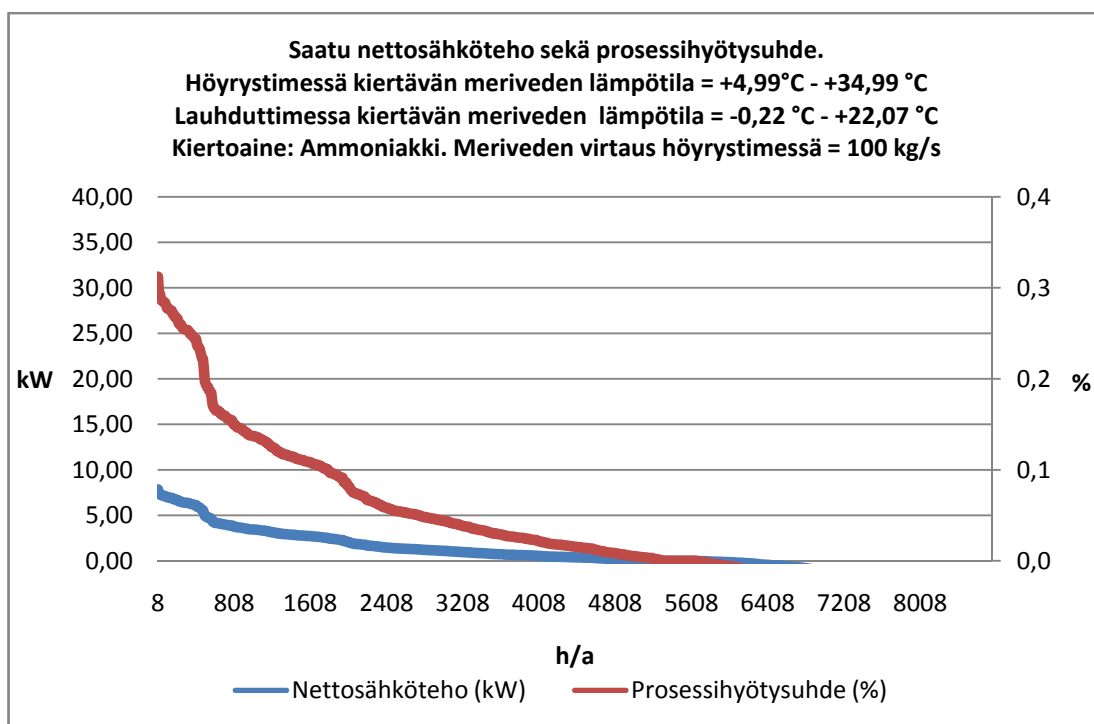
Tässä kappaleessa käsitellään lämmönvaihtimen ominaisuuksia ja lämmönvaihtimen lämmönsiirtoon vaadittavia tehoja.

4.4.1 Lämmön tuonti ORC-prosessiin

Lämpimän meriveden otto ORC-prosessia varten pitää järjestää ydinvoimalan ulostulotunneliin, jotta lämpötilataso olisi mahdollisimman korkea. Ulostulotunneli sijaitsee lauhduttimen ja aaltoilualtaan välissä. Tässä tutkimuksessa käytetty lämpötilamittaus sijaitsee juuri ulostulotunnelissa. Ulostulotunnelin jälkeen on pinta-alaltaan 600 m² avoin aaltoiluallas. Aaltoilualtaan jälkeen vesi menee 220 metriä pitkään poistotunneliin, joka kulkee useita metrejä maanpinnan alapuolella. Poistotunnelista vesi poistuu poistokanavaan purkuaukon kautta. Purkuaukko on yhteinen molemmilla käynnissä olevilla laitoksilla. Veden lämpötilataso putoaa ulostulotunnelin ja poistokanavan välissä keskimäärin 0,5 - 1,0 °C. Poistokanavan pituus on noin 470 metriä. Poistokanavan päässä on neljä lämpömittausta, jotka sijaitsevat 0,5 metriä meren pohjasta. Purkuaukosta edellä mainittuihin mittauksiin veden lämpötila laskee virtauksista riippuen 5,0–10,0 °C. OL3:n purkuaukko tulee hieman eri kohtaan. (Asiakirjatunnus 107721. 3.2.2011)

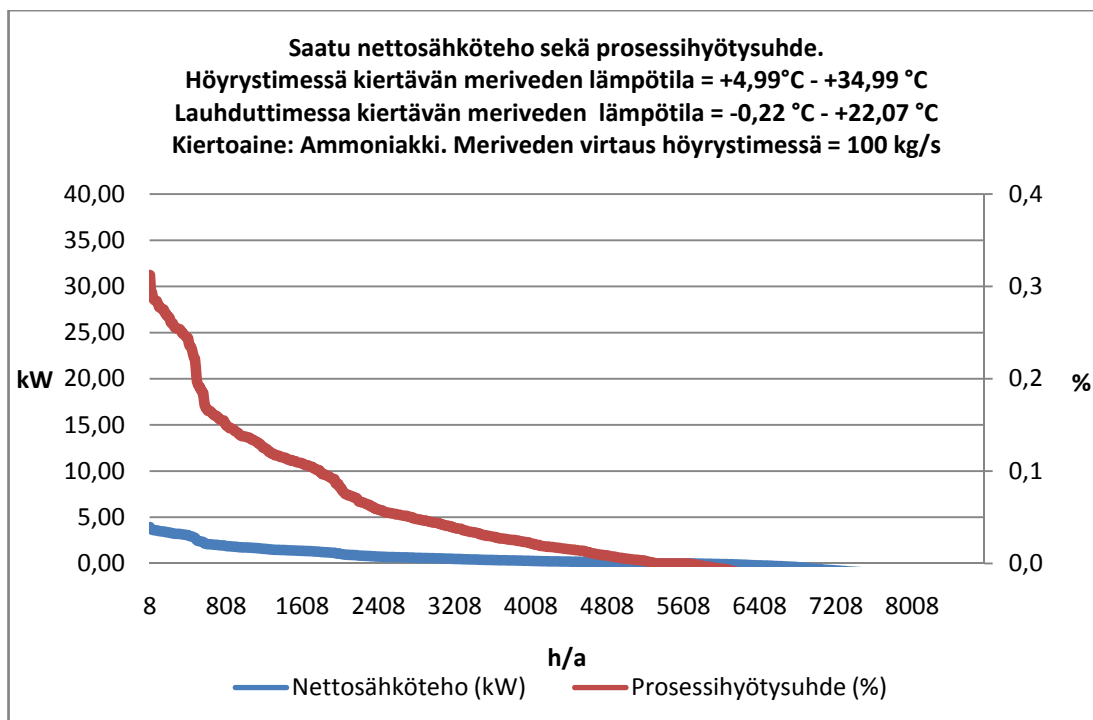
Lämmönvaihtimen sijoittamisessa on otettava huomioon mahdollisimman pieni pumppaustarve. Tutkimuksen teholaskelmissa ei ole missään vaiheessa huomioitu veden siirtämiseen tarvittavien pumppujen tehotarvetta. Edullisinta olisi sijoittaa jonkinlainen putkilämmönvaihdin suoraan ulostulotunneliin jolloin ei välttämättä tarvittaisi minkäänlaista pumppua veden siirtämiseen. Lämmönvaihtimen virtausvastuksen voittamiseksi voi mahdollisesti joutua lisäämään pienitehoisen potkuripumpun. Tämänkaltaisessa lämmönvaihtimen sijoituksessa on ongelmansa. Lämmönvaihdin altistuu jatkuvasti meriveden syövyttävälle vaikutukselle. Lämmönvaihtimen huoltaminen vaikeutuu huomattavasti, mikäli se on upotettuna ulostulotunneliin. Jos lämmönvaihtimeen tulee vuoto, niin se on helposti havaittavissa prosessista suhteellisen pienestä kiertoainemäärästä johtuen.

Lämmönvaihtimen valinnassa on huomioitava pienen virtausvastuksen lisäksi asteisuus sekä minkälaiseksi säädetään meriveden lämpötilanmuutos lämmönvaihtimen lävitse. Tässä tutkimuksessa käytetyllä Excel-ohjelmalla on helppo vertailla lämpötilamuutoksen ja asteisuuden vaikutusta prosessiin. Asteisuuden ja ΔT suhde pitää optimoida, jotta ORC-prosessin hyötysuhde pysyy hyvänä. ΔT ollessa 6 K asteisuus ei saisi mennä yli 0,7 K, jotta ORC-prosessin vuosituotto pysyisi plussan puolella. Näillä lämmönvaihtimen arvoilla vuosituotto on 10,5 MWh. Kuvassa 9 on piirretty nettosähkötehon sekä prosessihyötysuhteen pysyvyyskäyrät.



Kuva 9. Nettosähkötehon ja prosessihyötysuhteen pysyvyyskäyrä ΔT ollessa 6 K ja asteisuus 0,7 K.

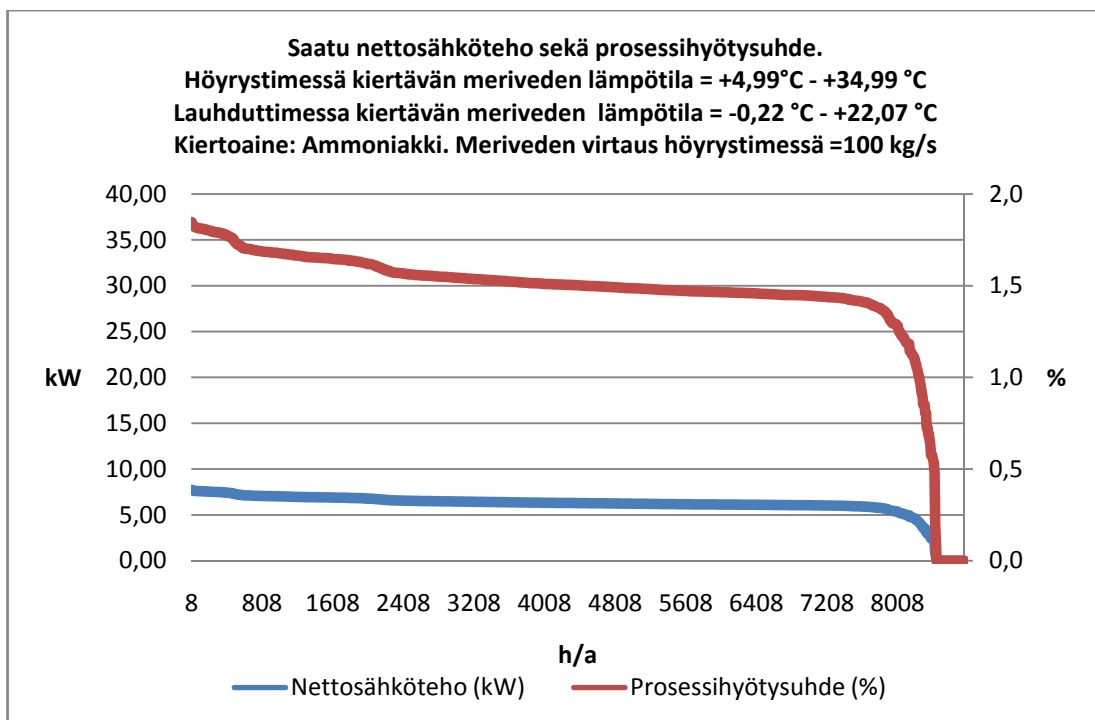
Alentaessa lämmönvaihtimen ΔT 3 K tasolle saadaan asteisuudelle huomattavasti enemmän pelivaraa. Asteisuus saa nousta 3,7 K tasolle jolloin vuosituotto on vielä 5,27 MWh vuodessa. Säädön vaikutus nähdään kuvasta 10.



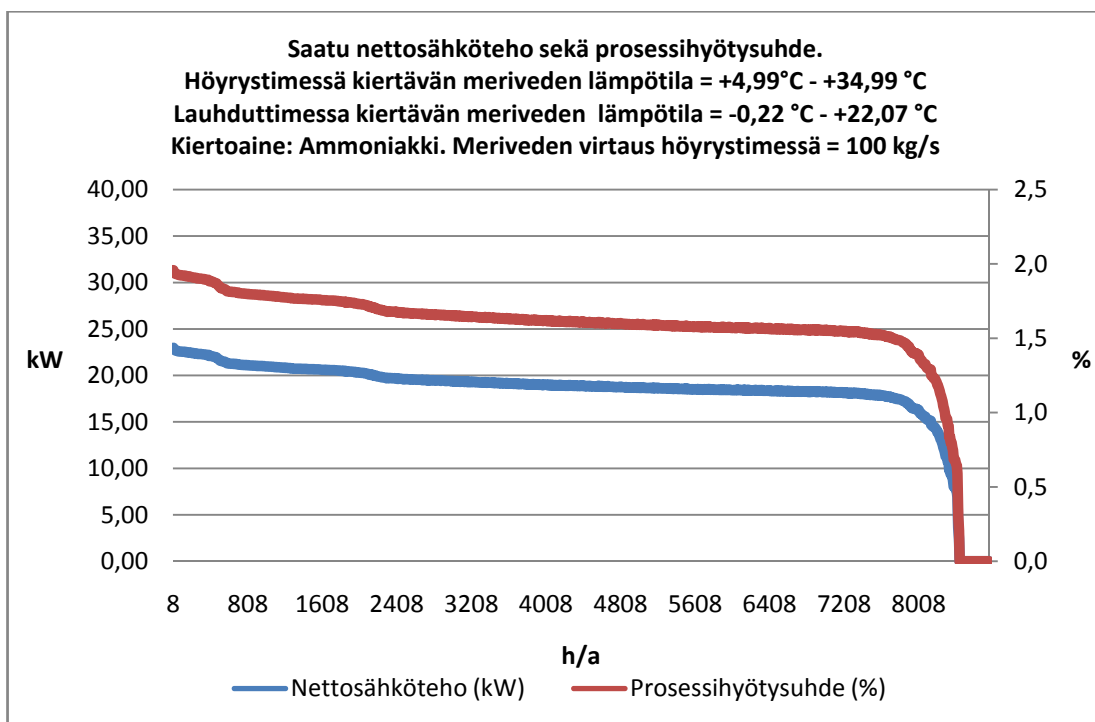
Kuva 10. Nettosähkötehon ja prosessihyötysuhteen pysyvyyskäyrä ΔT ollessa 3 K ja asteisuus 3,7 K.

Normaalisti lämmönvaihtimen likaantuessa ΔT laskee ja asteisuus nousee. Äärimmäisessä tapauksessa ΔT laskiessa 1 K tasolle ja asteisuuden noustessa esimerkiksi 3 K tasolle vuosituotto on vielä 53,3 MWh. Kuvassa 11 on esitetty pysyvyyskäyrä kyseisestä tilanteesta. Realistisesti tarkasteltuna asteisuus puhtaalla lämmönvaihtimella voisi olla noin 1 aste. Tällöin paras tuotto saadaan ΔT ollessa 2,8 astetta. Tällä yhdistelmällä päästään 160 MWh tuottoon vuodessa. Kuvassa 12 on esitetty pysyvyyskäyrä edellä mainituilla arvoilla.

Prosessin hyötysuhde ei muutu kuin vähän, mutta laitoksen tehossa tapahtuu suuri muutos kuvien 11 ja 12 välillä.



Kuva 11. Nettosähkötehon ja prosessihyötysuhteen pysyvyyskäyrä ΔT ollessa 1 K ja asteisuus 3 K.

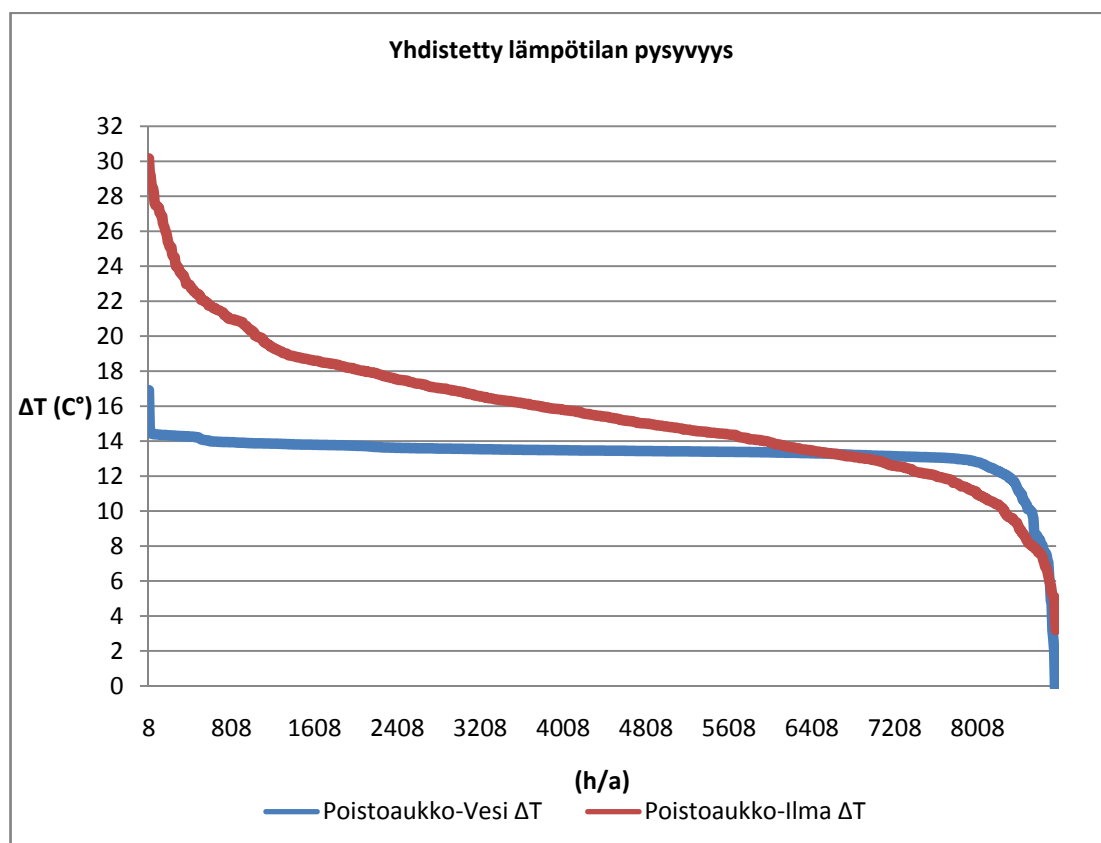


Kuva 12. Nettosähkötehon ja prosessihyötysuhteen pysyvyyskäyrä ΔT ollessa 2,8 K ja asteisuus 1 K.

4.4.2 Lämmön vienti ORC-prosessista

ORC-prosessin lauhdutin voidaan TVO:n olosuhteissa toteuttaa kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on käyttää lauhduttimessa kylmää merivettä, jota saadaan ydinvoimalan tulovesikanavasta puhdistuslinjojen jälkeen. Kyseinen tapa on käsitelty edellisissä kohdissa, niin että lauhduttimena toimivan lämmönvaihtimen arvot olivat samat kuin höyrystimenä olevan lämmönvaihtimen. Tämä siksi että molemmat lämmönvaihtimet voivat toimia samalla periaatteella.

Toisena tapana on käyttää lauhduttimen jäähdytteenä kylmää ilmaa. Kylmän ilman ansiosta on mahdollista saada aikaan suurempi lämpötilaero prosessiin. Suurempi lämpötilaero tarkoittaa parempaa Carnot-hyötysuhdetta. Kuvassa 13 on esitetty lämpötilaerojen pysyvyys vesijäähdytteisen ja ilmajäähdytteisen prosessin välillä.

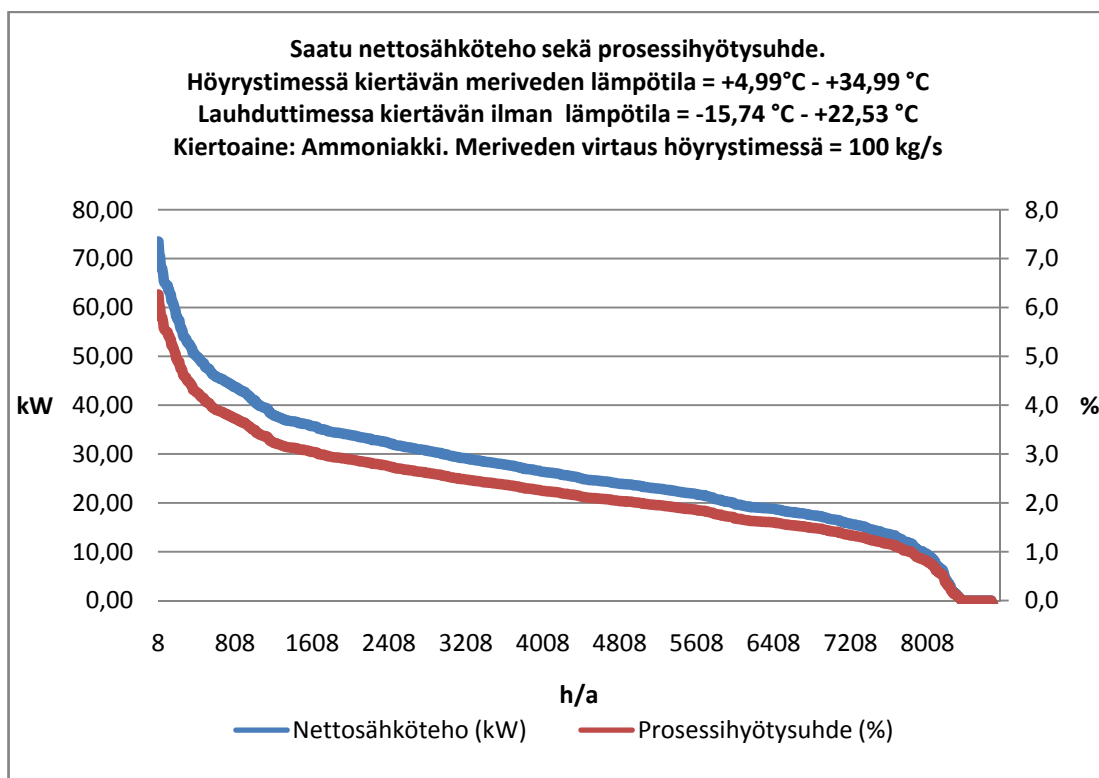


Kuva 13. Lämpötilaerojen pysyvyyskäyrä

Ilmajäähdytyksellä on kuitenkin omat vaikeutensa. Ilman ominaislämpökapasiteetti on huomattavasti veden vastaavaa pienempi, joka yhdistettynä pienempää ominais-

massaan aiheuttaa sen, että lauhduttimen läpi on puhallettava todella suuria määriä ilmaa. Suuren ilmamäärän siirtämiseen tarvitaan isoja puhaltimia, joiden sähkönkulutus nousee huomattavan korkeaksi.

Kuvassa 14 on esitetty tehon ja prosessihyötysuhteen käyttäytyminen kun lauhduttimessa käytetään ilmaa ja lauhduttimen arvot ovat: ΔT ollessa 2,8 K ja asteisuus 1 K. Vuosituotto on 227 MWh/a.



Kuva 14. ΔT on 2,8 K sekä asteisuus 1 K molemmissa lämmönvaihtimissa. Pysyvyyskäyrässä on esitetty prosessihyötysuhde ja nettosähköteho

Lauhduuttimessa jäähdytteenä oleva ilma ei korkeimmillaan käy kuin noin puoli astetta merivettä korkeammalla, joten ei ole juuri olosuhdetta, jossa ilma olisi lämpötilatasoiltaan huonompi jäähdyte kuin merivesi. Parhaimmillaan ilman lämpötila voi olla kymmeniä asteita veden lämpötilaa alhaisempi, joka edistää kiertoprosessin höyryn paisuntaa turbiinilla. Edellä kuvatussa prosessissa lauhduuttimessa tarvittava jäähdytteen virtaus on 419,7 kg/s ja lauhduuttimen lämpövirta on korkeimmillaan 1175 kW. Tämä saadaan laskettua kaavalla 17.

$$q_{m.jäähdytysilma} = \frac{q_{m.kiertoaine} * (h_2 - h_3)}{C_{ilma}(T_{out} - T_{in})} \quad (17)$$

Kiertoaineen massavirta	$q_{m.kiertoaine}$	= 0,98 kg/s
Pisteen 2 entalpia	h_2	= 1620,39 kJ/kg
Pisteen 3 entalpia	h_3	= 421,28 kJ/kg
Ilman ominaislämpökapasiteetti	C_{ilma}	= 1 kJ/kg K
Lauhduttimen jäähdytteen sisäänmeno lämpötila	T_{in}	= 286,05 K
Lauhduttimen jäähdytteen ulostulo lämpötila	T_{out}	= 288,85 K

$$q_{m.jäähdytysilma} = \frac{0,98 \text{ kg/s} * (1620,39 \text{ kJ/kg} - 421,28 \text{ kJ/kg})}{1 \text{ kJ/kgK} (288,85 \text{ K} - 286,05 \text{ K})} = 419,7 \text{ kg/s}$$

Tästä saadaan laskettua lauhduttimen lämpövirta $\Phi_{lauhdutin}$ kaavalla 18.

$$\Phi_{lauhdutin} = q_{m.jäähdytysilma} * C_{ilma}(T_{out} - T_{in}) \quad (18)$$

$$\Phi_{lauhdutin} = 419,7 \text{ kg/s} * 1 \text{ kJ/kgK} (288,85 \text{ K} - 286,05 \text{ K}) = 1175 \text{ kW}$$

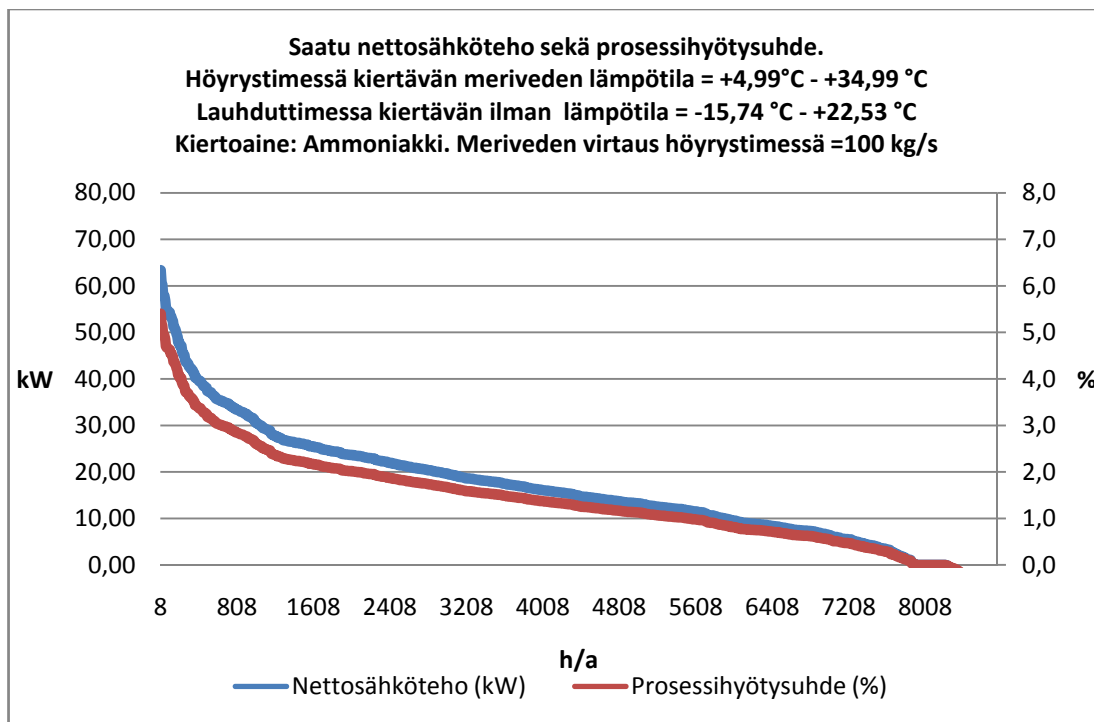
Ilman tilavuusvirran voidaan laskea kaavalla 19.

$$\frac{q_{jäähdytysilma}}{\rho_{ilma}} = q_{v.ilma} \quad (19)$$

$$q_{v.ilma} = \frac{419,7 \text{ kg/s}}{1,2 \text{ kg/m}^3} = 349,75 \text{ m}^3/\text{s}$$

Koko vuoden aikana alin jäähdytysilman tarve oli 327 m³/s, jolloin lauhduttimen lämpövirta on 1099 kW. Vastaavan ilmavirran tuottamiseen ilmajäähdytteisen lauhduttimen läpi tarvitaan 4kpl 2,85 kW tehoista puhallinta.(Fincoil).

Lauhduttimen läpi puhaltavan ilman lämpötilanmuutosta nostamalla saadaan puhallusmäärät huomattavasti pienemmäksi, mutta tämä saa aikaan huomattavan prosessin hyötysuhteen ja tehon putoamisen. Kuvassa 15 näemme tehon ja prosessihyötysuhteen pysyvyyskäyränä, ΔT ollessa 6 K.



Kuva 15. ΔT on 6 K sekä asteisuus 1 K molemmissa lämmönvaihtimissa. Pysyvyyskäyrässä on esitetty prosessihyötysuhde ja nettosähköteho

4.4.3 Yhteenveto laskentatuloksista

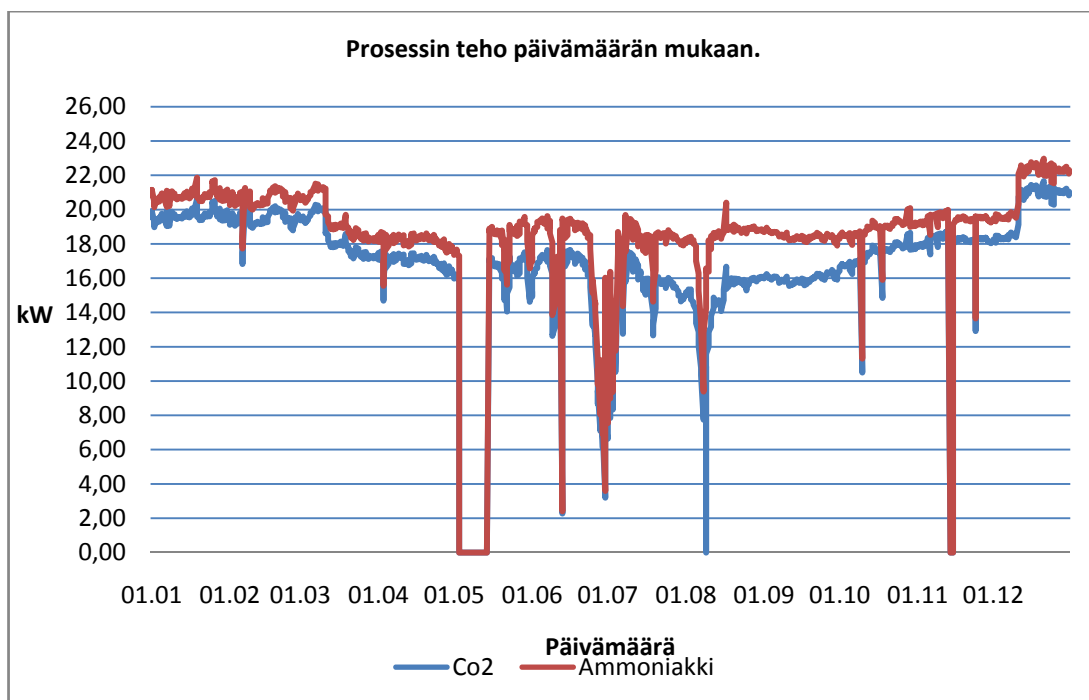
Työssä oli rajattu tukimusta niin, että kiertoaineista otetaan huomioon ainoastaan ammoniakki ja hiilidioksidi. Lämmönlähteenä toimii pelkästään ydinvoimalan lauhduttimelta poistuva merivesi sekä ORC-prosessin lauhduttimen jäähdytteenä toimii joko kylmä merivesi tai ilma.

Höyrystimenä toimii vesi jolloin lämmönvaihtimen asteisuus on 1 K ja lämpötilan muutos 2,8 K. Kiertoaineiden osalta ammoniakki osoittautui paremmaksi. Hiilidioksidia käyttäessä prosessin kiertoaineen mennessä yli 304 K (30,85 °C) ohjelma ei kykene laskemaan prosessin arvoja, koska tilapiste menee ns. kriittiselle alueelle, jossa kiertoaineen olomuotojen muutokselle ei ole tarkkoja rajoja höyrystyslämmön poistuessa. Turbiinien tuottama teho on kutakuinkin sama ammoniakilla ja hiilidiok-

sidilla, mutta hiilidioksidin kiertoaineen virtaus on huomattavasti isompi ammoniakkin vastaavaan verrattuna. Tämä aiheuttaa kiertopumpulle enemmän kuormaa, jolloin hyötysuhde laskee. Ammoniakin kiertoaineen virtaus pysyy 1 kg/s tasossa tilanteesta riippumatta, mutta hiilidioksidilla virtaus vaihtelee 5,49–16,27 kg/s välillä. Hiilidioksidin osalta prosessin korkein paine on yli 70 bar, mikä tuo prosessin materiaaleille omat vaatimuksensa. Ammoniakilla vastaavasti korkein paine on noin 12 bar.

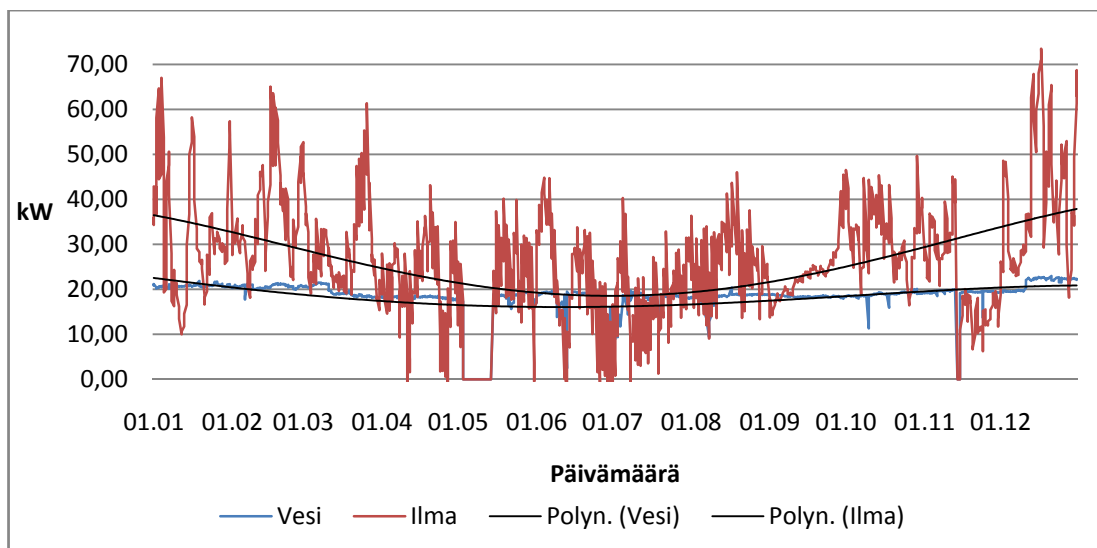
Ammoniakki on huomattavasti helpompi prosessin ohjauksen kannalta vakaudestaan johtuen. Mikäli höyrystimen läpi ajetaan 100 kg/s lämmintä merivettä, tuottaa edellä kuvattu prosessi ammoniakilla 160 MWh/a vuodessa ja vastaavasti hiilidioksidilla 145 MWh/a.

Kuvassa 16 nähdään ammoniakkin ja hiilidioksidin tehon tuoton erot. X-akselina ovat päivämäärät. Kuvasta 16 voimme nähdä, että talvikuukausina tehontuotto on suurempaa kuin kesällä. Myös tehontuoton tasaisuus on talviaikana parempi.



Kuva 16. Ammoniakin ja hiilidioksidin tehontuotto eri kuukausina

Vastaavasti kuvassa 17 nähdään ilmajäähdytteisen ja vesijäähdytteisen lauhduttimen tehontuottoerot. Kuvaajaan on lisätty polynomiset trendiviivat. Ilmajäähdytteisen prosessin teho on huomattavasti korkeampi, mutta myös huomattavasti epävakaampi. Ilmajäähdytteisen prosessin talvikuukausien aikainen tehontuotto on kesäaikaa korkeampi.



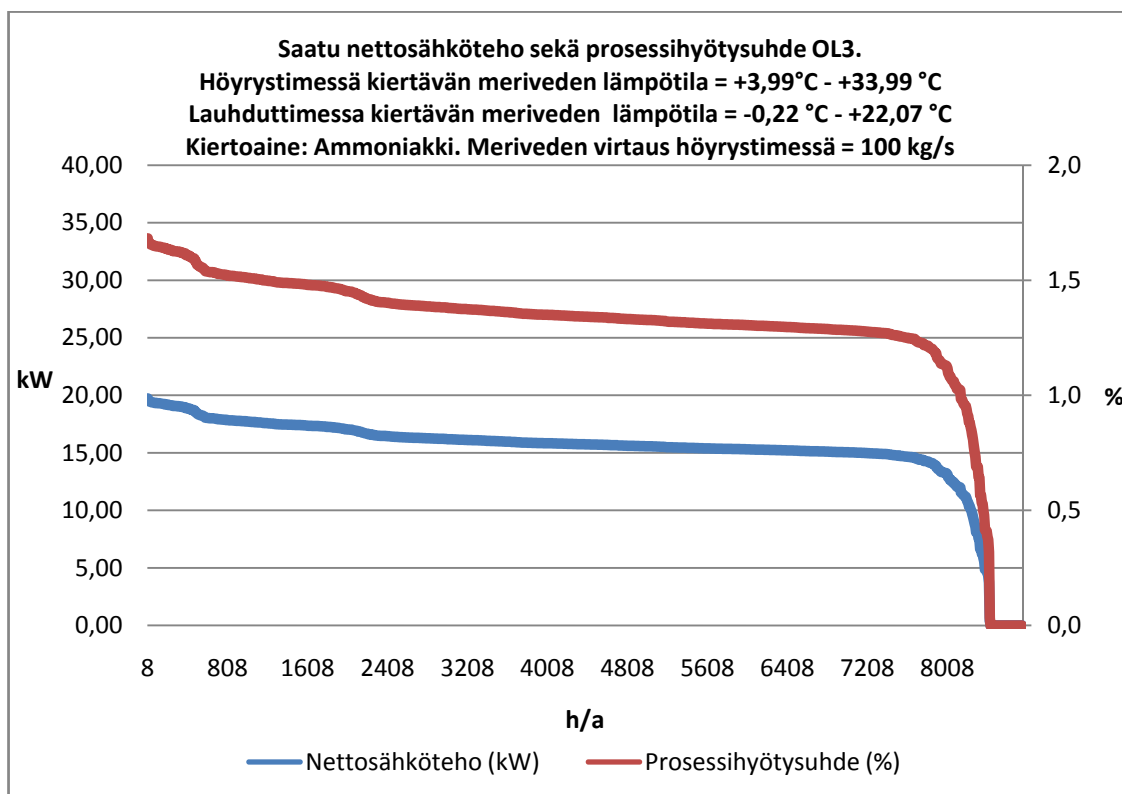
Kuva 17. Ammoniakki kiertoaineisen ORC prosessin tehot ilma- ja vesijäähdyteteisellä lauhduttimella päivämäärän funktiona. Polynomiset trendiviivat ovat kuvaamassa keskitehoa.

Jos koko ydinvoimalan tuottama lämmin merivesi saataisiin utopistisesti ajateltuna, käytettyä ORC-prosessin lämmönlähteeksi, tarkoittaisi se noin 48000 MWh/a tuottoa. Mikä tarkoittaa 0,34 % talteenottoa mereen menevästä hukkaenergiasta. Korvaamalla lauhduttimen jäähdytys ilmalla päästään 68000 MWh/a tuottoon, joka vastaa 0,48 % hyötysuhdetta. Vuonna 2009 laskennallisesti OL1:sellä energiaa meni mereen noin 1780 GWh.

Vuonna 2009 OL1 laitoksen läpi menevän meriveden lämpötila nousi keskimäärin 13 °C.. OL3:sen vastaavaksi lämpötilaksi on laskettu 12 °C, joten lämpötiloista on vähennettävä yksi aste jotta voidaan riittävällä tarkkuudella laskea OL3:selta saatavan ORC-prosessin teho. OL3:sen meriveden virtaus lauhduttimen läpi tulee olemaan n. 52,7 m³/s. (Suullinen tiedonanto 6.4.2011).

Mikäli laskentaohjelmaan syötetään suoraan OL3 merivesivirtaukset sekä oletetut lämpötilat, niin päästään vesilauhduttimella 0,30 % hyötysuhteeseen sekä ilmalauhduttimella 0,46 % hyötysuhteeseen. Laskentaohjelmassa vuosihuolto jätettiin vastaavaksi, kuin OL1 vuoden 2009 revisio. OL3 revisioista ei vielä tiedetä, joten tämä menettely lienee riittävän tarkka. Kuvassa 18 on esitetty tehon ja prosessihyötysuhteen pysyvyykäyrä OL3:sen lämpötila arvoilla. ORC-prosessissa käytettiin 100 kg/s

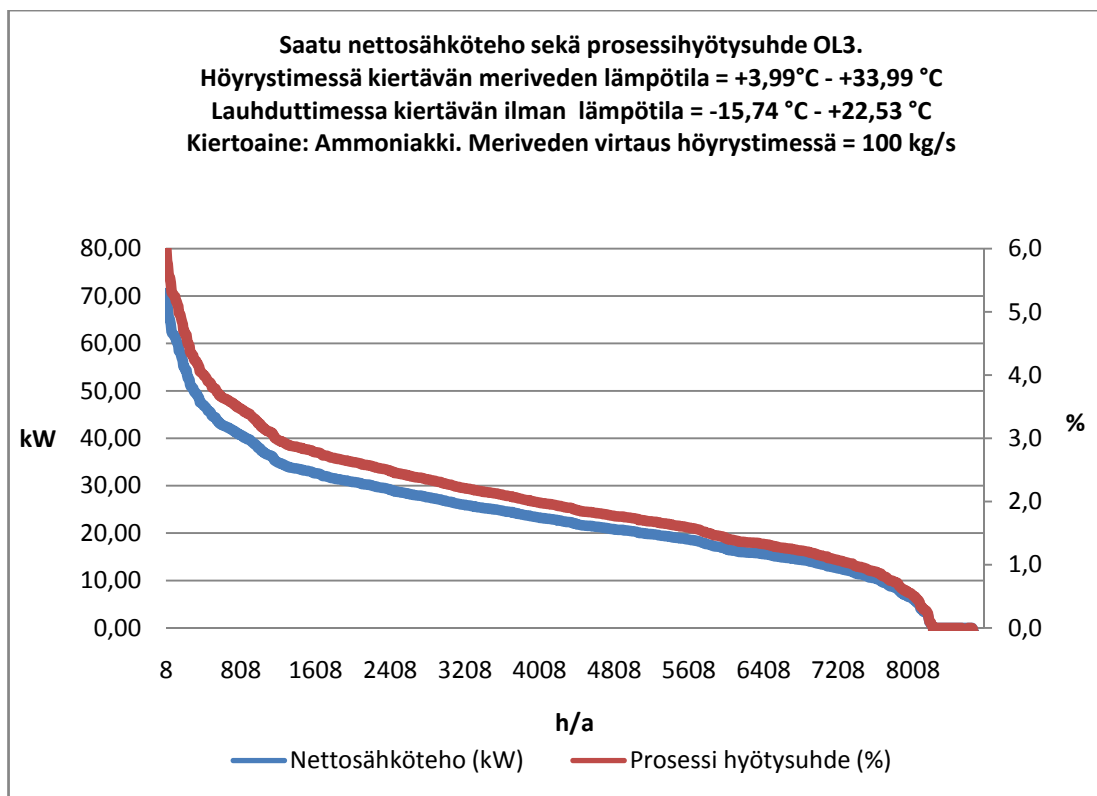
höyrystimen lämpimän veden virtauksena. Tuotoksi saatiin 133 MWh/a. Tämä on 27 MWh/a vähemmän kuin OL1 2009 lämpötiloilla.



Kuva 18. Nettosähkötehon ja prosessihyötysuhteen pysyvyyskäyrä OL3 arvoilla. ΔT ollessa 2,8 K ja asteisuus 1 K

Vastaavasti kuvassa 19 nähdään vastaavan tilanteen, jossa lauhduttimessa on käytetty kylmää ilmaa. Kyseisen prosessin tuotto on n. 202 MWh/a, joka on n. 25 MWh/a pienempi kuin OL1 2009 arvoilla.

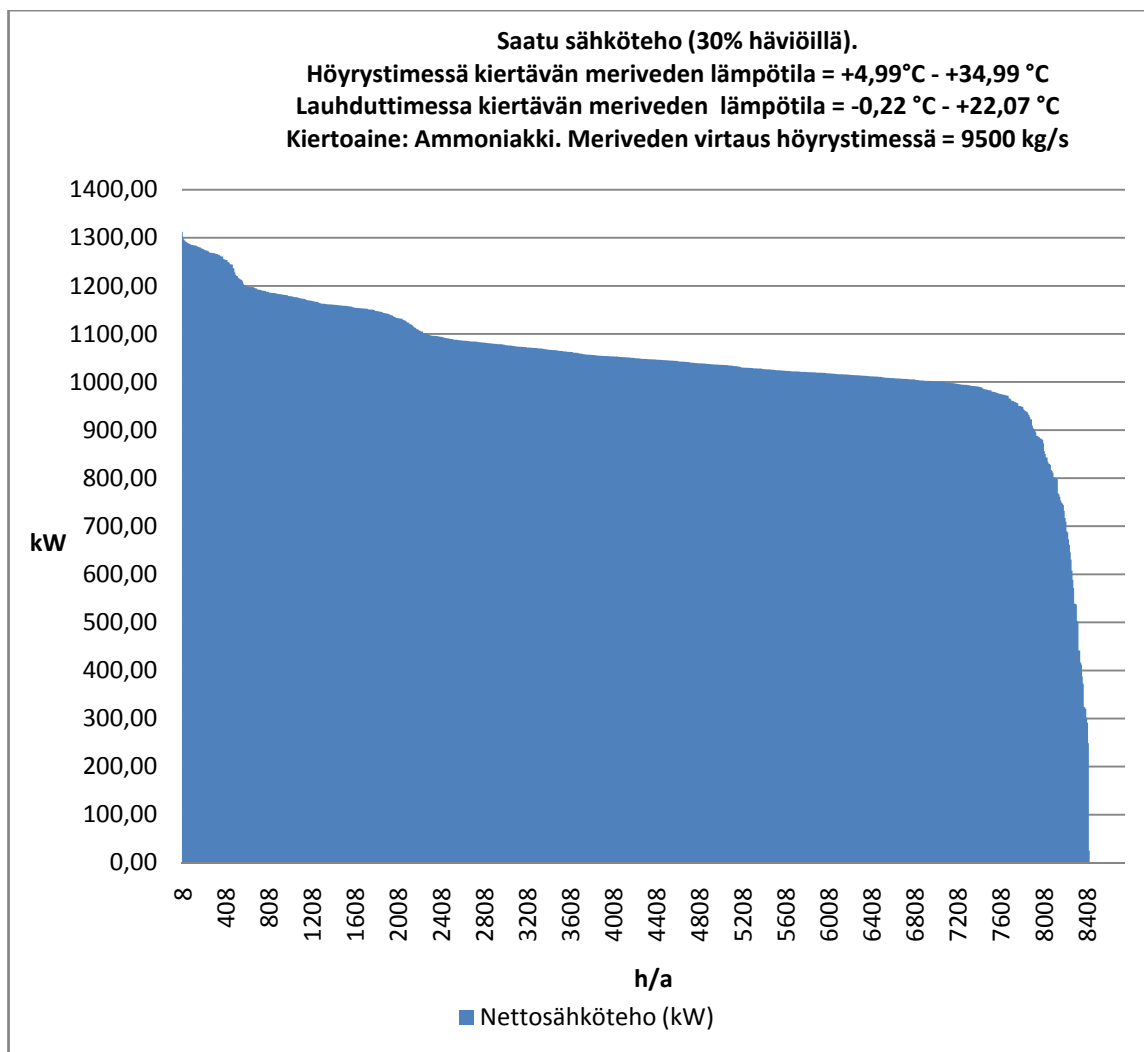
Sähkön hinnan ollessa n. 60 €/MWh, 5 vuoden takaisinmaksuaikaa laskiessa ilma-lauhduttimella varustettu prosessi saa maksaa noin 60 t€. Vesilauhduttimella varustettu saa maksaa vain noin 40 t€.



Kuva 19. ΔT on 2,8 astetta sekä asteisuus 1 astetta molemmissa lämmönvaihtimissa. Pysyvyyskäyrässä on esitetty prosessihyötysuhde ja nettosähköteho OL3 arvoilla.

4.5 1 MW laitos OL3 -laitosyksikön yhteyteen

Tässä kappaleessa perehdytään asioihin joita vaaditaan, jotta ORC-prosessi kykenee tuottamaan 1 MW:n tehon mahdollisimman luotettavasti. Riittävä luotettavuus tarkoittaa tässä yhteydessä yli 7000 h/a pysyvyyttä. Excel -laskentaohjelmaa muokattiin niin, että se ottaa huomioon tuloksissa 30 % pumppaus ja lämmönsiirtohäviöt. Tämä häviö otettiin pois suoraan ORC-prosessin tuottamasta sähköstä. Laskelmassa on käytetty OL3 laitosyksikön tarjoamaa lämpötilatasoa. Lämmönvaihtimen asteisuus on 1 K ja lämpötilamuutos 2,8 K. Lauhduttimena toimii kylmä vesi. Laskennan perusteella kyseinen prosessi tuottaa 7000 h kohdalla 1001 kW. Huipputeho tällä prosessilla on 1312 kW. ORC-prosessin pysyvyyskäyrä on esitetty kuvassa 20. Pysyvyyskäyrässä on havaittavissa jyrkkä tehon notkahdus 7800 tunnin kohdilla.



Kuva 20. Laitos joka tuottaa 1 MW tehon 7000 h vuodessa

Lämpimän meriveden virtaus höyrystimen läpi on oltava 9500 kg/s, jotta saavutetaan kyseinen tehotaso. Tällä virtauksella laitos tuottaa 8880 MWh/a. Tällä tuotolla viiden vuoden takaisinmaksuajalla laitos saa maksaa noin 2,66 M€. Tähän tulokseen päästiin olettamalla sähkön hinnaksi 60 €/MWh.

OTEC-teorioissa on mainittu, että meriveden virtaus imuputkessa on oltava alle 2 m/s, jotta häviöiden osuus jää 20–30 % tasolle. Tämä vaikuttaa merivesiputkiston kokoon, joka puolestaan tuo lisähaasteita. Putken halkaisijan laskemiseen pitää selvittää veden tilavuusvirta. Tilavuusvirta saadaan laskettua kaavalla 20.

$$q_{v.vesi} = \frac{q_{mv}}{\rho_{vesi}} \quad (20)$$

Jossa:

$$\begin{aligned} q_{mv} &= \text{meriveden massavirta} && [9500\text{kg/s}] \\ \rho_{vesi} &= \text{veden ominaismassa} && [1000\text{kg/m}^3] \\ q_{v.vesi} &= \text{veden tilavuusvirta} && [\text{m}^3/\text{s}] \end{aligned}$$

$$\frac{9500 \text{ kg/s}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 9,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tilavuusvirran ollessa selvillä pitää selvittää putken poikkileikkauspinta-ala kaavalla 21.

$$A = \frac{q_{v.vesi}}{v} \quad (21)$$

Jossa:

$$\begin{aligned} v &= \text{virtausnopeus} && [2\text{m/s}] \\ q_{v.vesi} &= \text{veden tilavuusvirta} && [9,5\text{m}^3/\text{s}] \end{aligned}$$

$$\frac{9,5 \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m/s}} = 4,75 \text{ m}^2$$

Selvittämällä aluksi putken säde, on helpompi lähestyä putken halkaisijaa. Säteen laskemiseen tarvitaan putken poikkipinta-ala. Jos putki ei ole pyöreä, niin poikkipinta-ala tieto riittää. Tässä työssä kuitenkin uskotaan pyöreän putken olevan parempi. Putken säde saadaan selville kaavalla 22.

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (22)$$

Jossa:

$$A = \text{pinta-ala} \quad [4,75 \text{ m}^2]$$

$$\sqrt{\frac{4,75m^2}{\pi}} = 1,22 m$$

Saatu säde kerrotaan kahdella, jolloin saadaan putken halkaisija.

$$d = 2 * r \tag{23}$$

Jolloin:

$$2 * 1,22m = 2,44m$$

Pumpattavasta virtauksesta ja putken koosta voidaan arvioida 30 % häviöt olevan uskottavia. Vastaavia virtausmääriä kytetään pumppaamaan putkiston aiheuttamien painehäviöiden vallitessa 30 % häviöihin laskettavalla teholla. Laskentaohjelman perusteella OTEC-teorioissa mainittu häviöiden määrä on realistinen tekstissä mainitulla optimilämpötilaerolla. 26 °C lämmönlähteellä ja 4 °C jäähdytteellä sekä 30 % häviöillä tuotto on noin 1,2 MW.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan sanoa, että ORC-prosessilla kyetään tuottamaan sähköä ydinvoimalan hukkaan menevästä lauhde-energiasta pienin varauksin. Tutkimus jättää jälkeensä vielä joitain kysymyksiä, mitkä pitää ratkaista. Ongelmat koostuvat lähinnä prosessin epävakaudesta, höyrystimestä sekä lauhduttimesta. Prosessin epävakaas johtuu lämmönlähteen sekä lauhduttimen jatkuvasta lämpötilan muutoksista. Ydinvoimalan lauhde-energiaa hyödyntävää ORC-laitosta ei taloudellisessa mielessä ole mielekäästä rakentaa. Tämänhetkiselä tietämyksellä ja tekniikalla ORC-voimala ei maksa itseään takaisin järkeväässä ajassa. Julkisuusmielessä pienen koelaitoksen rakentaminen jonkin yliopiston kanssa yhteistyössä voisi olla mielekäästä.

Vesijäähdyltteisellä lauhduttimella epävakaas ei ole niin iso, sillä meriveden lämpötilan muutokset ovat verrattain hitaita. Ilmajäähdyltteisen lauhduttimen ongelmat johtuvat ilman lämpötilan jatkuvasta elämisestä. Vuorokauden sisälläkin lämpötilan muutos voi olla hyvin suuri. Tämänlainen epävakaas aiheuttaa huomattavat vaatimukset prosessin ohjattavuudelle.

Lämmönsiirto höyrystimeen sekä lämmönsiirto lauhduttimesta vaatii vielä eritystä tutkimusta. Optimitilanne olisi se, ettei näihin tarkoituksiin tarvitsisi lainkaan hyödyntää sähköä. Tämä tarkoittaisi aivan uudenlaisia lämmönvaihdinratkaisuja. Höyrystimenä ja lauhduttimena pitäisi olla jonkinlainen keräilyputkisto merivesikanavissa. Putkistossa kiertäisi suoraan kiertoaine, jolloin sähköenergiaa ei kuluisi erillisen kiertopiirin pumpun tarpeisiin. Tästä haittana on pidentyneestä prosessiputkistosta johtuen kierron painehäviön kasvu. Painehäviöiden kasvu aiheuttaa suurempaa energiankulutusta pääkiertopumpulle. Lämmönvaihtimen mahdolliset vuodot toisivat mukaan myös ongelmia. Mikäli kiertoaineena on hiilidioksidi, niin prosessin korkea paine saattaisi aiheuttaa helpommin vuotoja. Mutta hiilidioksidin vuotaminen mereen ei tietävästi aiheuta niin pahoja ongelmia vesistölle kuin ammoniakki. Lämmönvaihtimina toimivat putkistot olisi varustettava vuodosta indikoivin laittein sekä mahdollisesta rakentaa useampi rinnakkain toimiva lämmönvaihdin. Erilliset lämmönvaihtimet saadaan venttiilein erotettua prosessista vuodon sattuessa.

Käytettäessä merivettä lämmönvaihtimien nopea likaantuminen tuottaa lisää ongelmia. Koska lämmönvaihtimen asteisuuden ja lämpötilan muutos vaikuttaa myös suuresti prosessin tehoon.

OL3 lämpötila-arvot ovat hieman pienemmät kuin OL1:sen vastaavat arvot. Tämän vaikutus tehoon jää lopulta aika pieneksi.

Kustannustarkastelua tehdessä OL3:n yhteyteen kuvatut laitteet 100 kg/s lauhdeveden jäähdytysvirtauksella viiden vuoden takaisinmaksuajalla tuskin on kannattavaa. Sähkön hinnan ollessa 60 €/MWh saa vesilauhduttimella oleva ORC-prosessi maksaa 5 vuoden takaisinmaksuajalla n. 40000 € ja ilmalauhduttimella varustettu 60500 €. Laskelmissa ei ole otettu huomioon mahdollisien tukien vaikutusta. OL3 laitoksen yhteyteen rakennettavan 1 MW nimellisteholtaan olevan laitoksen kustannus saa olla 5 vuoden takaisinmaksuajana 2,66 M€.

LÄHTEET

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)

L. A. Vega, Ph.D., Hawaii, USA

OTEC- December 1999

http://www.otecnews.org/articles/vega/OTECbyVega_with_photos.pdf

Teollisuuden voima oyj. TVO yhtiönä. TVO Lyhyesti. [viitattu 11.3.2011]

<http://www.tvo.fi/www/page/74/>

Sipilä K. 1997. Tvo:n Olkiluodon voimalaitoksen lauhdelämmön hyödyntäminen. Tutkimusselostus ENE6/8/97. VTT.

Larjola J., Nuutila M. 1995. District heating plant converted to produce also electric power. 27th UNICHAL Congress, June 12-14 1995, Stockholm. Report 228 E, 14 s., UNICHAL, Zurich

Reunanen A., Honkatukia J., Esa H., Pitkänen H., Lattu J., Larjola J. 2000. ORC-Voimalan soveltuvuus hyödyntämään dieselvoimalan hukkalämpöä. Tekes DrNo 1549/401/98, Loppuraportti

Cosmo Frontier.2011

www.cosmosfrontier.com/files/OTEC_diagram.gif

Heinimö J., Jäppinen E. ORC-teknologia hajautetussa sähköntuotannossa
Tutkimusraportti EN B-160

Neuvoston asetuksen (EY) N:o 3093/94 mukainen ilmoitus otsonikerrosta heikentävien valvottavien aineiden tuojille Euroopan yhteisössä

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EY) N:o 2037/2000

Annettu 29 päivänä kesäkuuta 2000, otsonikerrosta heikentävistä aineista.

TVO:n sisäiset julkaisut

Asiakirjatunnus 107721.112-OL1/OL2-Jäähdytysvesikanavat-Lopullinen turvallisuusseloste. Julkaistu 3.2.2011

Fincoil. ilmajäähdytteiset SOLAR lauhduttimet sarjat ZA,SA,ZZ.
www.fincoil.fi/showfile.php?file=SZAleaf_suo.pdf

Suullinen tiedonanto. Lalli J. 6.4.2011

LIITTEET

LIITE 1. Piste 1 ammoniakin T,s tasossa.

LIITE 2. Piste 1 ammoniakin p,h tasossa.

LIITE 3. Piste 3 ammoniakin T,s tasossa.

LIITE 4. Piste 3 ammoniakin p,h tasossa.

LIITE 5. h_{2s} ja h_2 ammoniakin p,h tasossa.

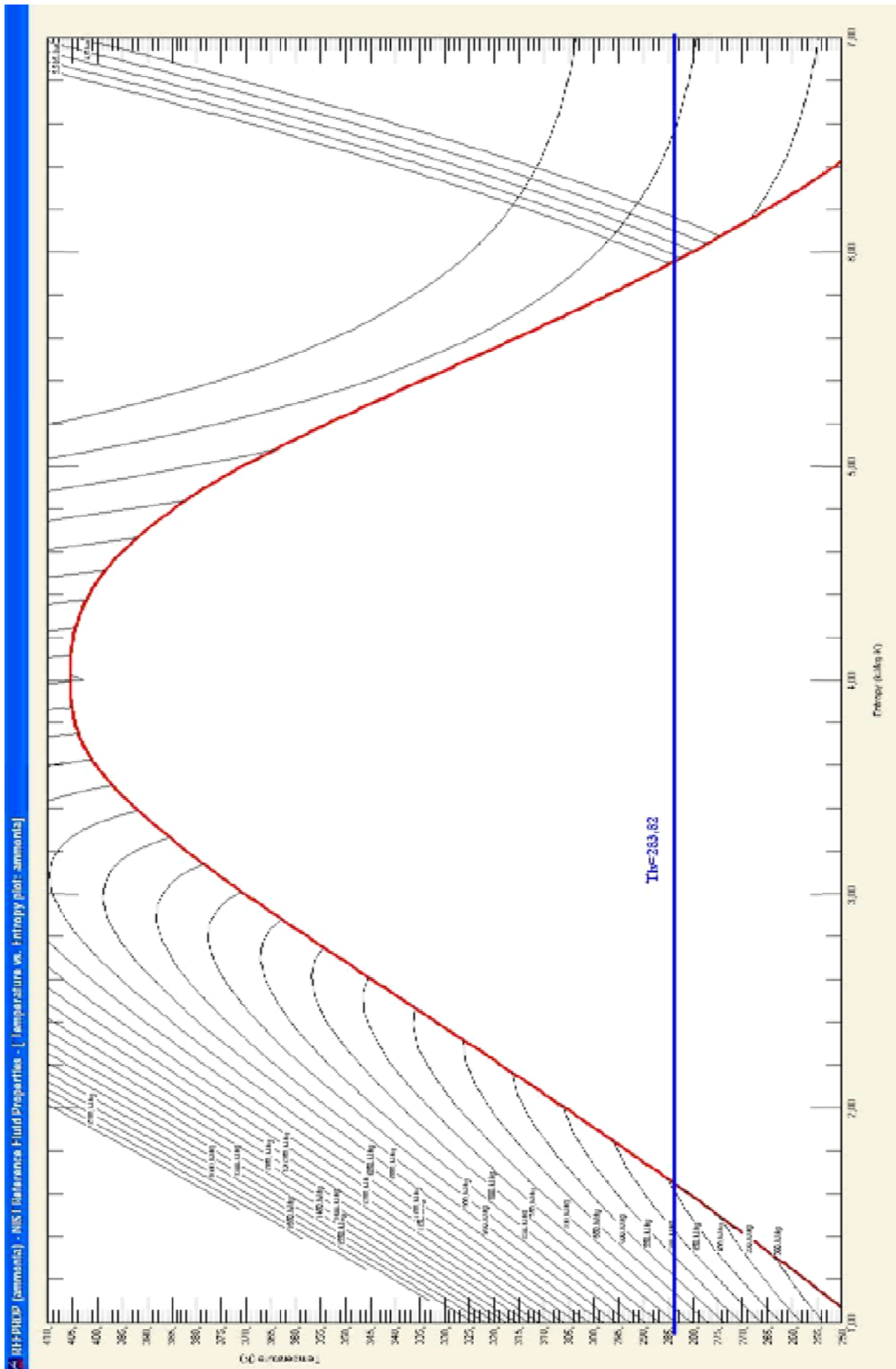
LIITE 6. Pisteessä 4 olevan kiertoaineen ominaismassa.

LIITE 7. Prosessi T,s tasossa.

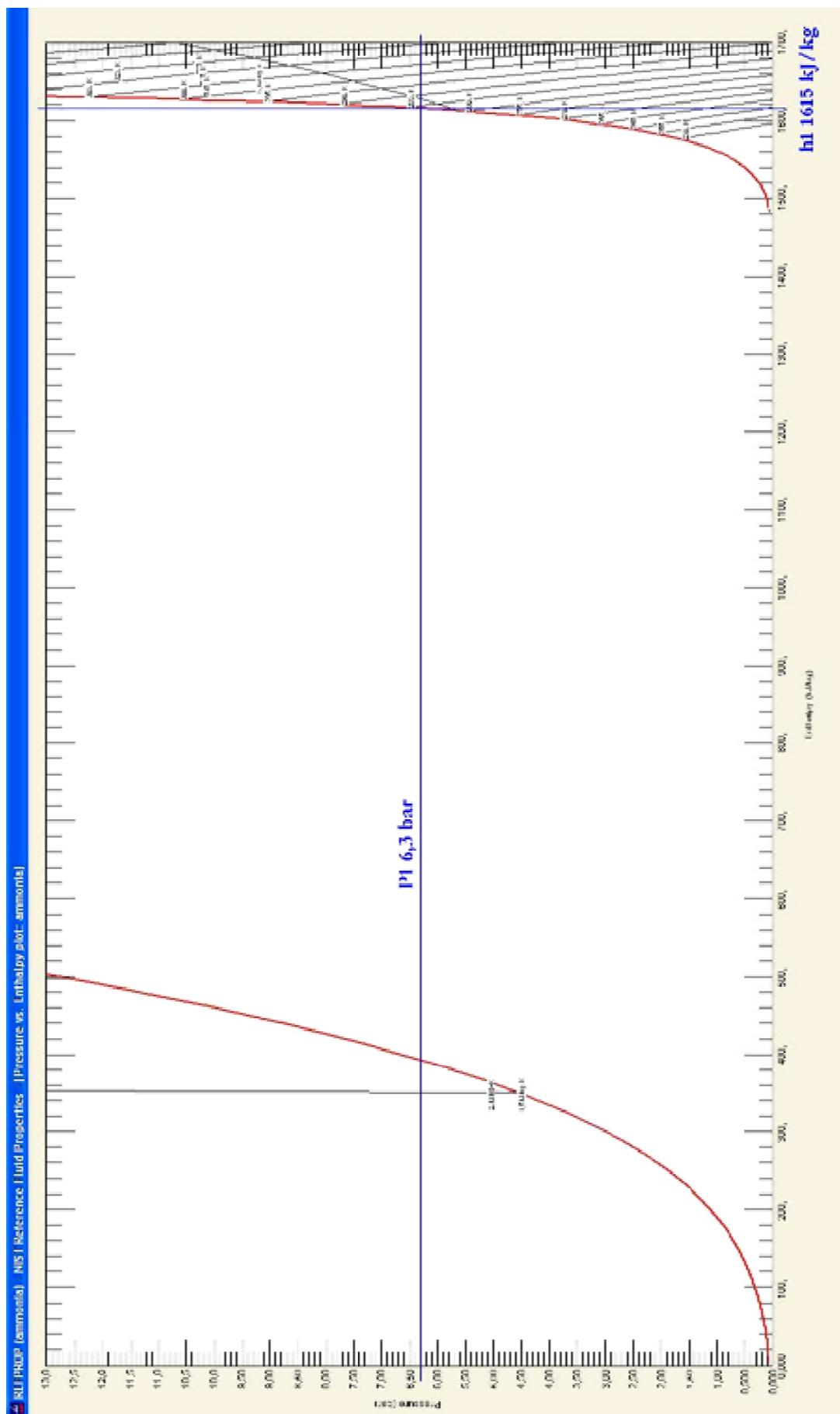
LIITE 8. Prosessi p,h tasossa.

LIITE 9. Lämpönielujen lämpötilat

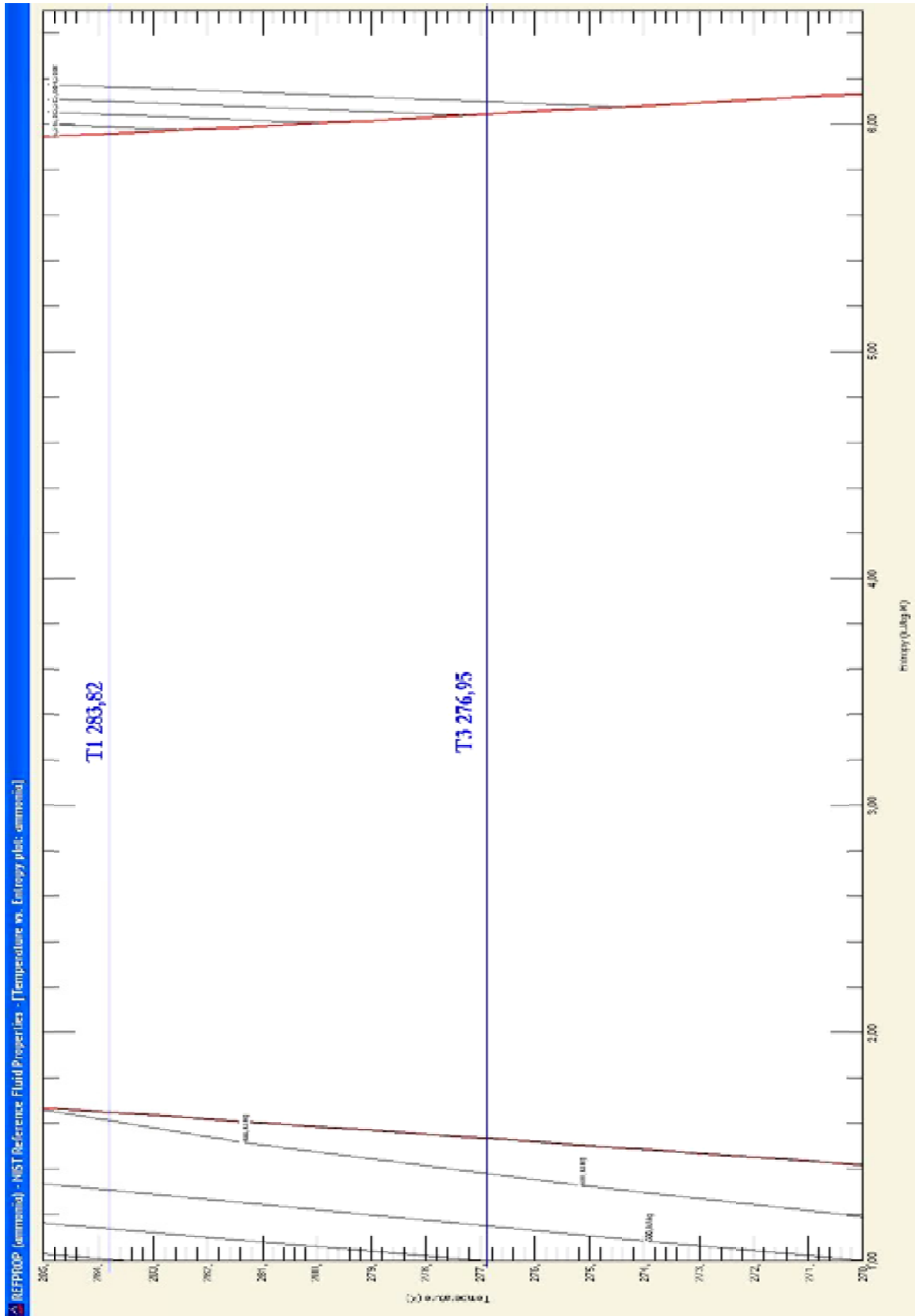
Piste 1 ammoniakin T,s tasossa. LIITE 1



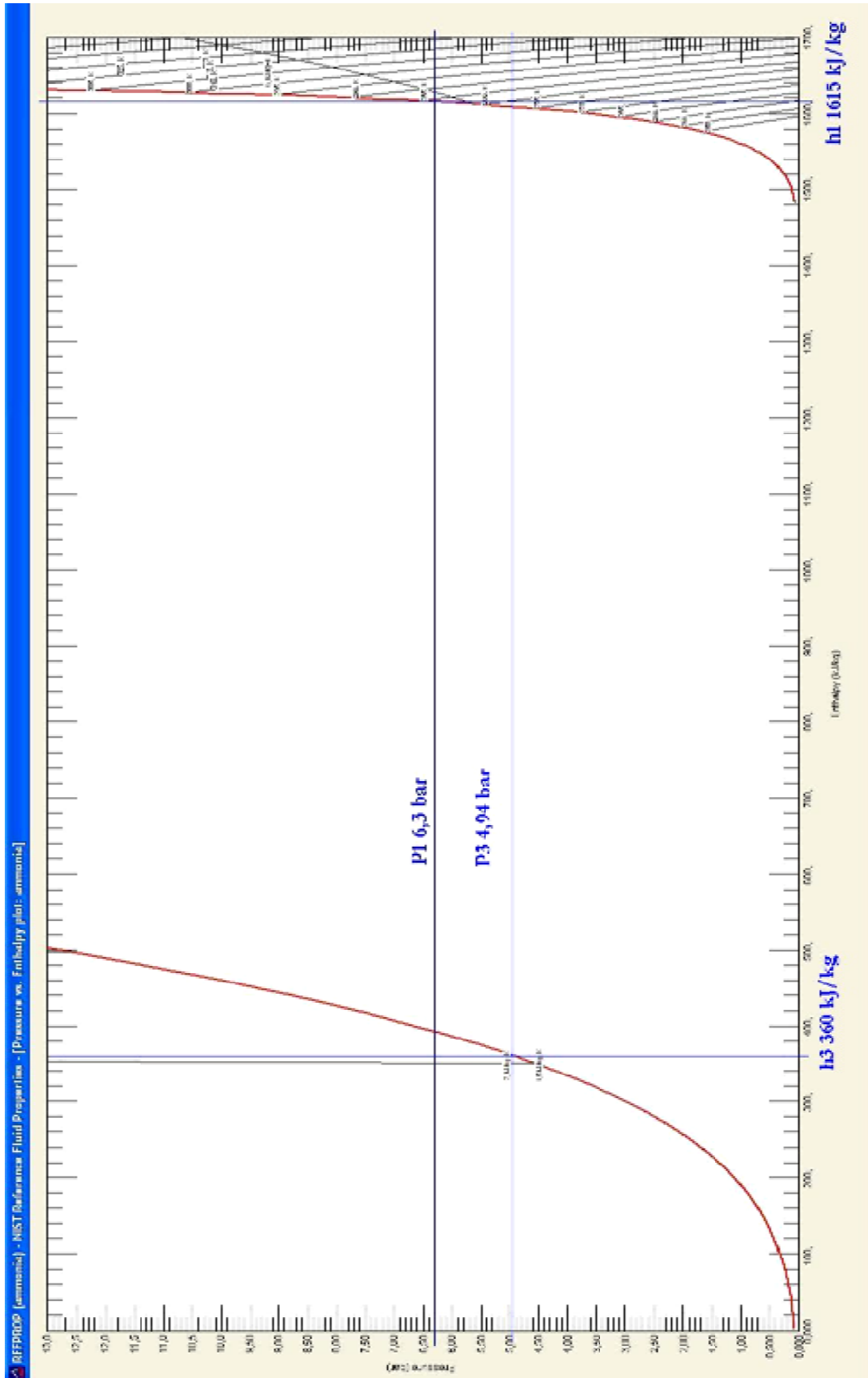
Piste 1 ammoniakin p,h tasossa. LIITE 2



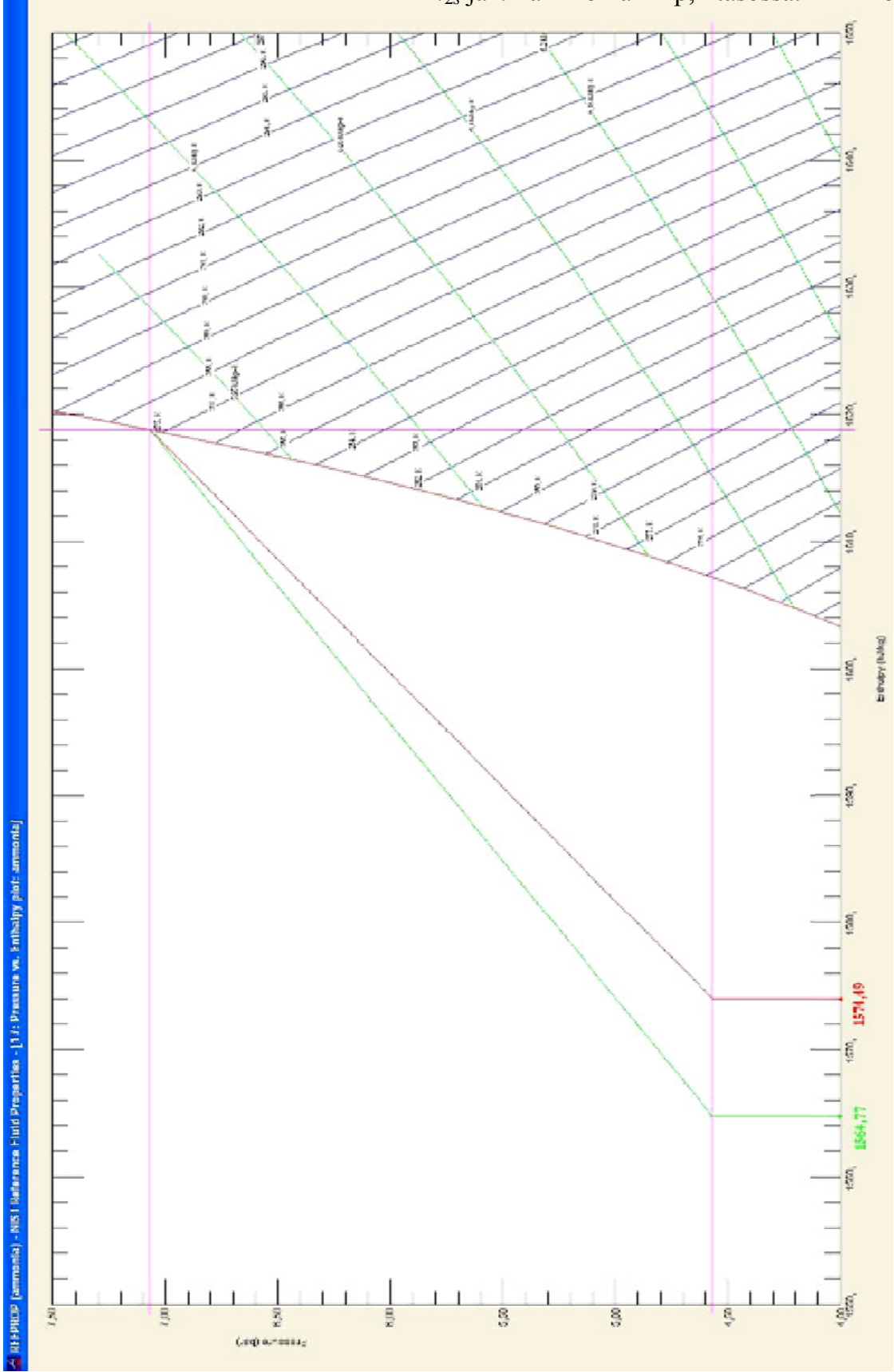
Piste 3 ammoniakin T,s tasossa. LIITE 3



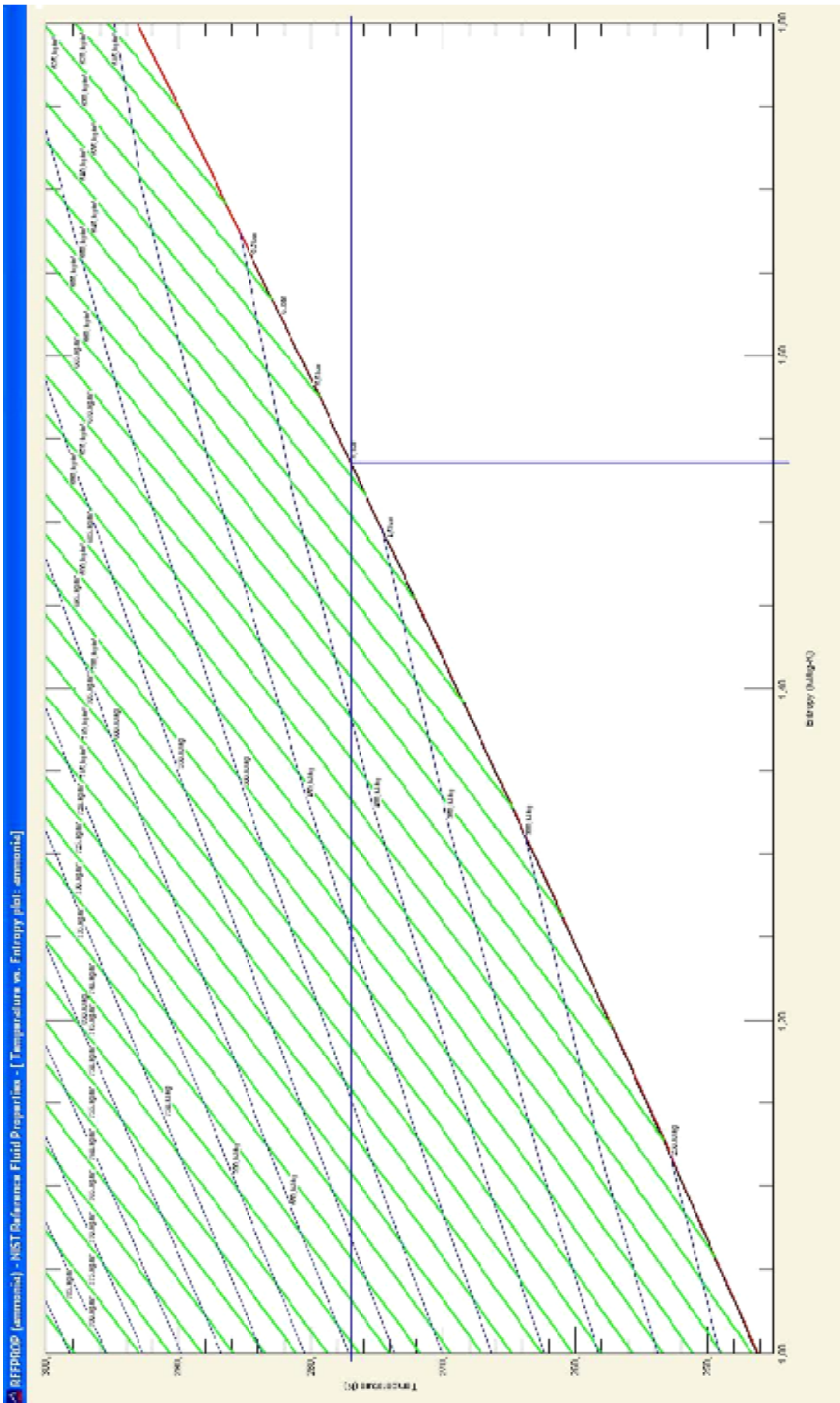
Piste 3 ammoniakin p,h tasossa. LIITE 4

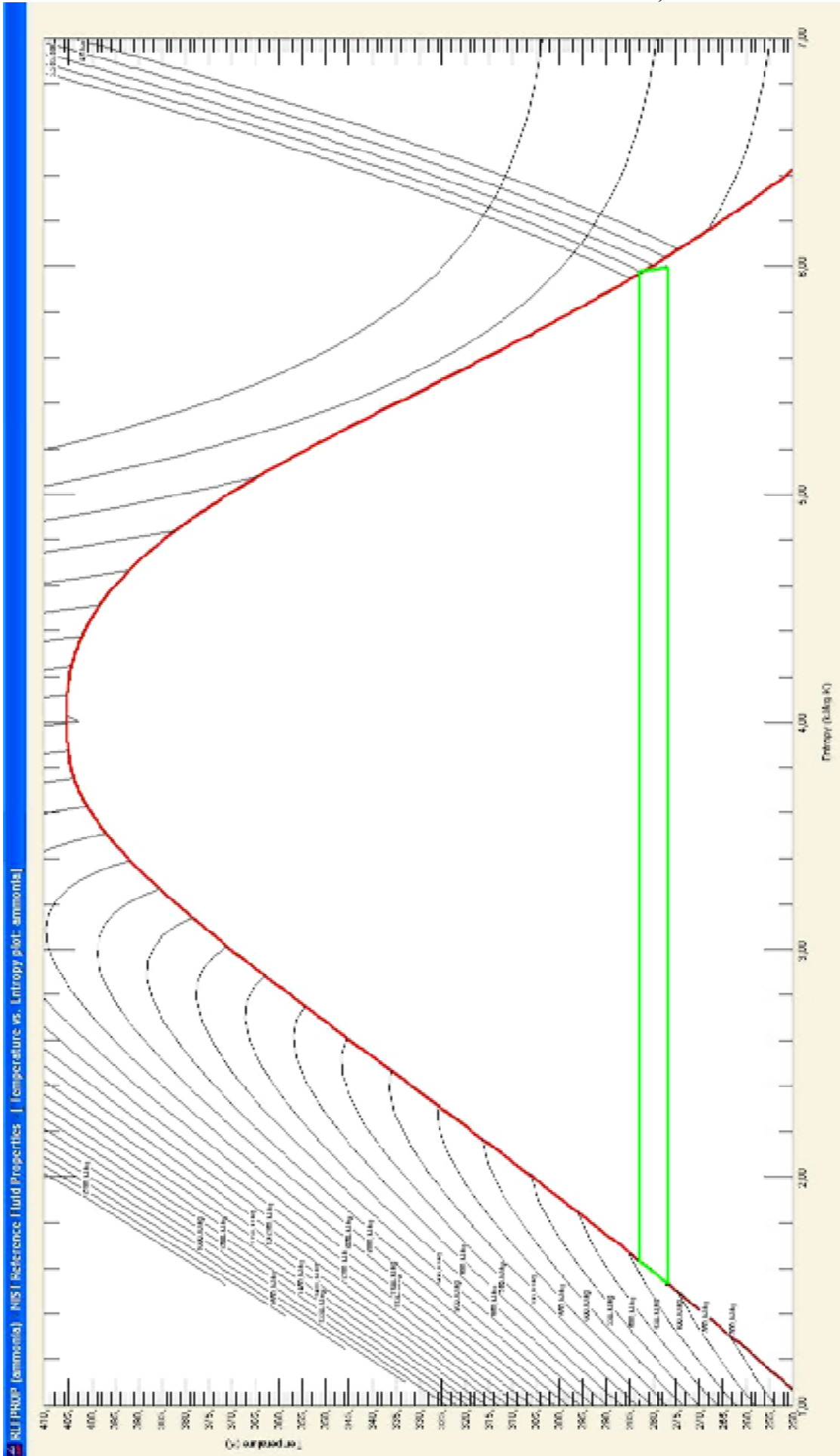


h_2s ja h_2 ammoniakin p,h tasossa. LIITE 5

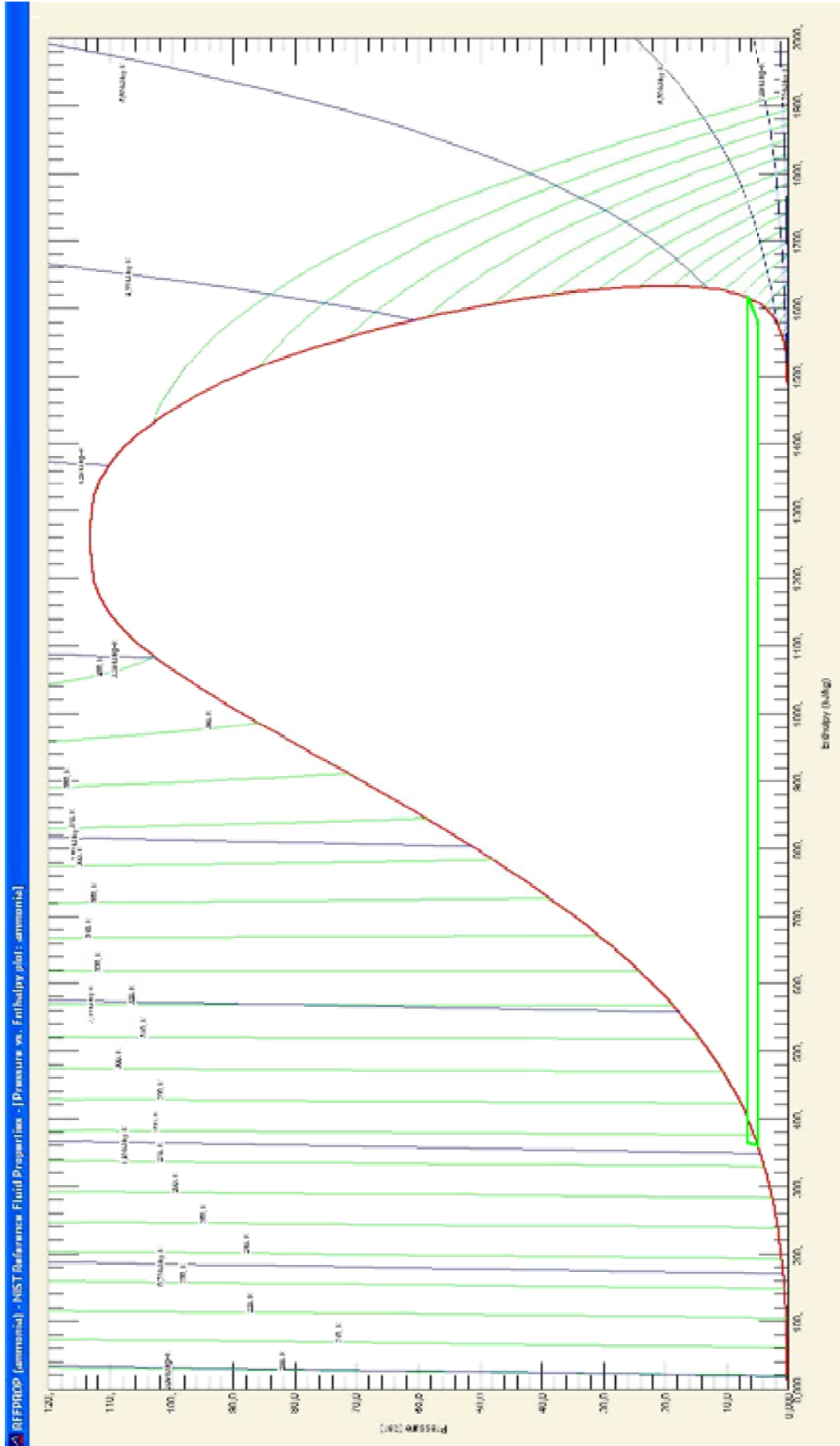


Pisteessä 4 olevan kiertoaineen ominaismassa. LIITE 6





RJ PROP [ammonia], NIST Reference Fluid Properties | Temperature vs. Entropy plot: ammonia



REFPROP (ammonia) - NIST Reference Fluid Properties - [Pressure vs. Enthalpy plot: ammonia]

