

Saku Hjulfors

**HÖYRYKATTILALAITOKSEN VARAKATTILAN KÄYTÖN OPTI-
MOINTI PAINEAKKUNA**

HÖYRYKATTILALAITOKSEN VARAKATTILAN KÄYTÖN OPTI- MOINTI PAINEAKKUNA

Saku Hjulfors
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Saku Hjulfors

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Höyrykattilalaitoksen varakattilan käytön optimointi paineakkuna

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Optimizing Use of Secondary Boiler in Steam Boiler Plant as Pressure Accumulator

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2020

Sivumäärä: 48 + 3 liitettä

Opinnäytetyön tavoite oli selvittää Kaustisen höyrykattilalaitoksen varakattilan lataustoiminnon ongelmat sekä optimoida paineakkutoiminnon latausta tasottaen biokattilan käyttöä. Työn tilaajana toimi Suomen teollisuuden energiapalvelu – STEP Oy.

Varakattilan paineakkutoiminto perustuu kattilaveden potentiaaliin varastoida ja luovuttaa lämpöä kattilan paineen vaihdellessa. Paineen noustessa veden lämpötila voi nousta korkeammaksi varastoiden enemmän lämpöenergiaa. Paineen laskiessa lämmennyt vesi saavuttaa kylläisen veden pisteen ja alkaa höyrystymään tuottaen prosessiin höyryä.

Työ aloitettiin selvittämällä paineakkutoiminnon ongelmia. Varakattilan kytkentäkaavion ja toimintakuvauksen avulla perehdyttiin varakattilan rakenteeseen ja toimintaperiaatteeseen. Prosessia seuraamalla huomattiin, että varakattilan ja höyryverkoston väliltä puuttuu paine-ero, joka on tärkeä paineakkutoiminnon latauksen kannalta. Paine-eron puuttumisen syyksi selvisi varakattilan venttiilien virheellinen ajotapa. Paineakkutoiminnon kuntoon saattamista vaikeutti myös lataushöyrylinjan lauhteenpoistimen viallinen sulkuventtiili. Lauhdelinjan sulkuventtiili täytyy vaihtaa, jotta lataushöyrylinja saadaan lauhteenpoistimen avulla tyhjätyä lauhteesta ja linja saadaan lämmitettyä. Paineakkutoiminnon lataushöyrylinjan säätöventtiilin automaatiota optimoitiin biokattilan käyttöä tasoitavaksi, millä pyrittiin polttoainesäästöihin.

Varakattilan paineakkutoiminnolla on laskennallisesti merkittävä potentiaali biokattilan käytön tasaamiseksi. Potentiaalilin tarkka määrittäminen on hyvin hankalaa prosessin jatkuvan muuttuvuuden takia, joten määrityksessä käytettiin lyhytaikaista prosessin muutosta parhaalla mahdollisella tarkkuudella.

Asiasanat: Kestävä kehitys, paineakku, höyrykattila, biohöyrykattila

ALKULAUSE

Kiitän Suomen teollisuuden energiapalvelu - STEP Oy:n tarjoamasta mahdollisuudesta mielenkiintoiseen ja opettavaiseen opinnäytetyön aiheeseen. Kiitän STEP Oy:n henkilökuntaa avusta ja tuesta, jota olen heiltä työhöni saanut. Erityisesti haluan kiittää tuesta ja tiedoista höyrylaitokseen liittyen Juha Siltalaa, joka toimi työntilaajan puolesta opinnäytetyöni ohjaajan roolissa.

Kiitän Oulun ammattikorkeakoulun energiatekniikan yliopettajaa Veli-Matti Mäkelää opinnäytetyön ohjauksesta ja neuvoista sekä lehtori Pirjo Partasta opinnäytetyön tyylin ja kielen ohjauksesta.

Kaustisella

8.4.2020

Saku Hjulfors

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTOA	7
1 JOHDANTO	9
2 SUOMEN TEOLLISUUDEN ENERGIAPALVELUT - STEP OY	10
2.1 Honkajoki Kaustinen	10
2.1.1 Biohöyrykattila 4 MW	11
2.1.2 Suurvesitilakattila 8 MW	12
2.2 Harjavallan suurteollisuuspuisto	13
2.3 Altia Koskenkorva	13
2.4 Hankkija Seinäjoki	14
2.5 Veolia Group	14
2.6 Pori energia	15
3 HÖYRYKATTILA	16
3.1 Historia	16
3.2 Höyrykattilan toiminta	16
3.3 Suurvesitilakattila	17
3.4 Vesiputkikattila	19
3.4.1 Syöttöveden esilämmitin	20
3.4.2 Höyrystin	21
3.4.3 Lieriö	21
3.4.4 Tulistin	22
3.5 Luonnonkiertokattila	24
3.6 Pakkokiertoakattila	26
3.7 Läpivirtauskattila	27
4 KAUSTISEN HÖYRYKATTILALAITOKSEN PAINIAKKUTOIMINTO	29
4.1 Paineakun lataus	29
4.2 Paineakun purkaminen	30

4.3 Energian varastointipotentiaali	31
5 PAINEAKUNLATAUSTOIMINNON TOIMIMATTOMUUS	34
5.1 Höyryventtiilien virheellinen ajotapa	34
5.2 Lataushöyrylinjan lauhteenpoiston ongelmat	35
6 PROSESSIN OPTIMOINTI	38
6.1 Varakattilan venttiilien testaus	38
6.2 Varakattilan pinnanpuhalluksen säätö	38
6.3 Varakattilan venttiilien säädöt	42
6.3.1 Varakattilan päähöyryventtiili ja päähöyryventtiilin ohitusventtiili	42
6.3.2 Lataushöyryn säätöventtiili	43
7 YHTEENVETO	45
LÄHTEET	46
LIITTEET	48
Liite 1 Kaustisen höyrykattilalaitoksen suurvesitilahöyrykattilan kytkentäkaavio	
Liite 2 Veden termodynaamiset intensiivisuureet	
Liite 3 GESTRA BAE 46 virtausdiagrammi	

SANASTOA

Hajukaasu	Tehtaitten prosesseissa syntyviä kaasuja, jotka ovat hajultaan yleensä voimakkaita ja saattavat olla terveydelle haitallisia riippuen kaasun sisältämistä yhdisteistä.
Hydrostaattinen paine	Nesteen oman painovoiman aiheuttama paine. Hydrostaattiseen paineeseen vaikuttaa nesteen tiheys, putoamiskiihtyvyys ja neste massan korkeus.
Hönkähöyry	Muodostuu kylläisestä vedestä paineen las- kiessa. Hönkähöyry on höyrykattilan tuotta- man höyryn kanssa samanlaista, joten se kannattaa mahdollisuuksien mukaan käyt- tää hyödyksi.
Höyryturbiini	On lämpövoimakone, joka muuntaa korkea- paineisen höyryn energian akselin pyöri- misliikkeeksi. Pyörivän akselin mekaanisen energian generaattori muuntaa sähköener- giaksi.
Höyryverkosto	Höyryn siirtämiseen tuotantolaitoksilta kulu- tuscohteille tarkoitettu putkisto.
Kavitaatio	Ilmiö, jossa neste alkaa kiehumaan paineen laskun takia. Kavitaatiokuplat kuluttavat pumppujen juoksupyöriä mekaanisesti erit- tään nopeasti.
KPA – kattila	Kiinteän polttoaineen kattila. Kattila, jossa on suunniteltu poltettavan kiinteitä polttoai-

	neita esim. puun kuorta, purua, haketta tai turvetta.
Lentotuhka	On hyvin pienistä hiukkasista koostuvaa tuhkaa, joka poistuu kattilasta savukaasujen mukana. Lentotuhka puhdistetaan savukaasuista suodattimilla tai sähkösuodattimella.
Painekoe	Koe, jossa testataan kappaleen paineenpitävyys. Koe tehdään seuraamalla kappaleen painetta, kun kaikki kappaleen yhteydet on suljettu.
Pinnan ulospuhallus	Kattiloissa käytetään haitallisten suolojen poistoon kattilaveden pinnasta. Kattilaveden kiintoaineet aiheuttavat kattilaan vaahtoa ja kerrostumia lämmönsiirtopinnoille.
Pohjatuhka	Kattilan pohjalle jäävä karkeampijakoisempi tuhka.
Starttiventtiili	Höyryn ulospuhallusventtiili, joka säätelee avautumaan höyrynpaineen mukaan. Venttiilillä estetään kattilan höyrynpaineen nouseminen liian korkeaksi puhaltamalla höyryä kattilasta pois.
Syöttöveden esilämmitin	Lämmönsiirrin, jossa kattilassa syntyvällä savukaasulla lämmitetään kattilaan syötettävää vettä.
Takaiskuventtiili	Yksisuuntaventtiili, joka sallii väliaineen virtaamisen vain yhteen suuntaan.

1 JOHDANTO

Kaustisen höyrykattilalaitoksen varakattilana toimivan suurvesitilahöyrykattila on suunniteltu toimivan biokattilan paineakkuna, jolla saataisiin tasoitettua biokattilan käyttöä. Tehdasympäristössä olisi paineakkutoiminnosta merkittävää hyötyä, koska höyryä kuluttuvan tehtaan höyryn käyttö on erittäin vaihtelevaa. Ongelmana on ollut varakattilan lataustoiminnon toimimattomuus, joten varakattila ei ole toiminut biokattilan paineakkuna. Opinnäytetyön tavoitteena on saada lataustoiminto toimimaan sekä lisäksi tarkoitus on muuttaa lataustoiminnon automaatiota energiatehokkaammaksi.

Kattilalaitoksella on 4 MW:n pyöriväärinainen KPA-kattila, jonka varakattilana toimii 8 MW:n suurvesitilahöyrykattila. Varakattilaan on rakennettu latauskäyttöön tarkoitettu höyryputki, joka on liitetty kattilan vesitilan alaosaan. Höyryverkoston paineen vaihdellessa varakattilassa oleva vesi toimisi paineakun ominaisuudessa luovuttaen ja vastaanottaen höyryä prosessin mukaan.

Työn tilaajana toimii Suomen Teollisuuden Energiapalvelut - STEP Oy. STEP Oy toimittaa teollisuusasiakkailleen kestäviä energiaratkaisuja, joissa otetaan huomioon asiakkaan kokonaisvaltaiset tarpeet ja energiatehokkuus ratkaisut. Veolia (51 %) ja Pori Energia (49 %) omistavat yhdessä STEP Oy:n. (1.)

2 SUOMEN TEOLLISUUDEN ENERGIAPALVELUT - STEP OY

Suomen Teollisuuden Energiapalvelut – STEP Oy tarjoaa Suomen teollisuudelle energiapalveluita kehitetyllä kumppanuusmallilla. Yrityksen on perustanut vuonna 2008 kaksi merkittävää energiayhtiötä Pori energia ja Veolia. Pori energia omistaa STEP Oy:stä 49 % ja Veolia 51 %. Veolia suuryrityksenä antaa yritykseen kansainvälistä kokemusta sekä resursseja ja Pori energia taas paikallista osaamista. Vuonna 2018 STEP Oy:n energiatoimitusten volyymi oli 699 GWh, josta tuotettiin 85 % hiilidioksidivapaalla tuotannolla. (2.)

STEP Oy:n palveluihin kuuluvat energiapalvelusopimukset, liiketoimintasiirrot ja yrityskaupat, tuotantoyhtiömallit, käynnissäpitosopimukset sekä etävalvonta ja raportointipalvelut. STEP pyrkii optimoimaan energian tuotantoa ja käyttöä räätälöidyillä ja kokonaisvaltaisilla energiaratkaisuilla sekä jatkuvalla toiminnan kehittämisellä. Hankekehityksen esisuunnittelusta projektin toteutukseen asti hoitaa STEPin projektiorganisaatio. (2.)

2.1 Honkajoki Kaustinen

STEP tuottaa höyryä Findest Proteinin tehtaan käyttöön vuonna 2015 valmistuneella biohöyrykattilalaitoksella (kuva 1). Biohöyrykattila on 4 MW:n pyöriväriäinen kiinteänpolttoaineenkattila, joka käyttää paikallista metsähaketta, kuorta, purua ja turvetta polttoaineenaan.



KUVA 1. Kaustisen höyrykattilalaitoksen biokattilarakennus vasemmalla ja polttoaineen seulontarakennus oikealla

Höyrykattilalaitoksella puhdistetaan tehtaalta tulevat hajukaasut polttamalla biohöyrykattilassa sekä tarpeen vaatiessa myös varakattilassa. Laitoksella on nestekaasulla ja kevyellä polttoöljyllä toimiva 8 MW:n varakattila. Kokonaisenergian tuotanto on 20 GWh vuodessa. (2; 3.)

2.1.1 Biohöyrykattila 4 MW

Biohöyrykattilan tulipesä on vesiputkikattila, jossa on pyörivä arina. Pyöriväarinnaisessa tulipesässä polttoaine syötetään syöttöruuvilla tulipesän keskelle, jossa se palaa hiljakseen pyörivien arinoitten mukana valuen reunoille päin. Polttoaine seulotaan, jotta polttoaineessa mahdollisesti olevat isommat epäpuhtaudet eivät tukkisi syöttöruuvia. Tulipesän päällä on 5-vetoinen tulitorvi-tuliputkikattila. Ensimmäisen vedon muodostaa tulipesä, josta lähtee toisen vedon tulitorvet, joita on 4 kpl. Kolmas, neljäs ja viides veto on tehty DN50 tuliputkillalla, joitten jälkeen savukaasut menevät syöttövedenesilämmittimeen. Syöttöveden esilämmitin on pyöreä vaakamallinen kaksivetoinen tuliputkikattila.

2.1.2 Suurvesitilakattila 8 MW

Varakattilana toimii kolmevetoinen suurvesitilakattila, jossa ei ole syöttöveden esilämmitintä. Kattila on rakennettu vuonna 1977, ja se on myöhemmin siirretty Kaustisen höyrykattilalaitoksen yhteyteen varakattilaksi. Suurvesitilakattilan vesitilavuus on 24 m³, jonka yläosalla on höyryn erotusta varten höyrytila. Polttimena on hajukaasun poltto-ominaisuudella varustettu nestekaasu ja kevytpolttoöljy käyttöinen poltin (kuva 2).



KUVA 2. Kolmevetoinen suurvesitilahöyrykattila kevyt polttoöljy ja nestekaasu käyttöisellä hajukaasupolttimella

Varakattila toimii biokattilan rinnalla turvaamassa höyryntuotantoa tehtaalle. Mikäli höyryverkoston paine laskee liian alas, käynnistyy varakattilan poltin automaattisesti biokattilan rinnalle.

2.2 Harjavallan suurteollisuuspuisto

STEP muodostaa harjavallan suurteollisuuspuiston alueella kumppanuusverkon Nornickel Harjavalta Oy:n ja Boliden Harjavalta Oy:n kanssa. STEP toimittaa teollisuusalueelle höyryä, kauko- ja prosessilämpöä, vettä ja paineilmaa sekä lisäksi Harjavallan kaupungille kaukolämpöä. STEPin voimalaitos hyödyntää höyrynjakelussa oman tuotantonsa lisäksi teollisuusprosesseista talteenotettua lämpöä. Omistamiensa kattiloiden käytön lisäksi STEP vastaa myös niiden kunnossapidosta. (2.)

Energiantuotannossa suurteollisuusalueella on

- 30 MW:n pellettihöyrykattila
- 20 MW:n höyrykattila
- 24 MW:n Ni-lämmöntalteenottokattila
- 20 MW:n Cu-lämmöntalteenottokattila
- 12 MW:n konverttelilämmöntalteenottokattila
- 16 MW:n höyrystykattila
- 5 MW:n tulistuskattila
- 16 MW:n apukattila
- 10 MW:n Noviter-kattila
- 2 MW:n + 2x 4 MW:n kuumavesikattila
- 3 MW:n pellettilämpökattila.

Suurteollisuuspuiston alueella STEPin kokonaisenergiantuotanto on 600 GWh vuodessa. Matala- ja korkeapaineista paineilmaa alueella tuotetaan 9,3 MW:n paineilmakompressoreilla 145 000 Nm³/h ja jäähdytys-, talous- ja prosessivettä 24,5 Mm³/a. (2; 4.)

2.3 Altia Koskenkorva

STEP vastaa Altian omistaman voimalaitoksen käytöstä ja toimittaa höyryä Altian ja A-rehun prosesseihin. Voimalaitoksella tuotetaan myös paineilmaa. Ohran ja

kauran kuori saadaan asiakkaiden sivuvirroista, ja ne muodostavat kaksi kolmasosaa voimalaitoksien polttoaineen tarpeesta. Alueelle vuonna 2014 valmistunut ohrankuorikattila polttaa vain Altian tehtaalta tulevaa ohrankuorta, jonka poltosta syntynyt lento- ja pohjatuhka käytetään peltolannoitteena hyödyksi. (2.)

Alueella energiantuotannossa on 10 MW:n biohöyrykattila, joka käyttää polttoaineenaan pelkästään ohrankuorta. Turvetta ja kaurankuorta polttoaineenaan käyttävän 20 MW:n kiertopetikattilan lisäksi alueella on 16 MW:n raskaalla polttoöljyllä toimiva varakattila. Kokonaisenergian tuotanto vuodessa alueella on 130 GWh. (2; 5.)

2.4 Hankkija Seinäjoki

Seinäjoella hankkijan rehutehtaan tarpeisiin tuotetaan höyryä ja kaukolämpöä STEPin biohöyrykattilalaitoksella. Sivutuotteena syntyvä kaurankuori käytetään kokonaisuudessaan höyryntuotannossa, mikä vastaa polttoaineen tarpeesta noin 40 %:a. Tehtaan kaukolämpöpiirissä hyödynnetään paineilman tuottamisesta syntyvän hukkalämmön lisäksi kattilan arinajäädytyksessä syntyvä talteenotto-lämpö. Vuodessa 12 GWh:n kokonaisenergia tuotetaan 2,5 MW:n biohöyrykattilalla, joka käyttää kaurankuoren lisäksi polttoaineena turvetta ja metsähaketta. Varakattilana toimii 3 MW:n kevyen polttoöljyn kattila. (2; 6.)

2.5 Veolia Group

Veolia on perustettu jo 1800-luvun puolessa välissä Ranskassa vesijohtoyrityksenä. Veolian toimintaan kuuluu vieläkin puhtaasta vedestä huolehtiminen nykyisten laajentuneitten resurssitoimintojen ohella. Veolia keskittyy auttamaan kuntia ja yrityksiä hyödyntämään resurssejaan kierrätys-, vesi- ja energiaratkaisuissa ja lisäksi auttaa teollisuutta tukipalveluilla. Veolia on veden, energian ja kierrätyksen alalla maailman johtavia yrityksiä työllistäen lähes 171 000 henkilöä ympäri maailman (kuva 3). (7.)



KUVA 3. Veolia Group avainluvut (7)

Yritys on puhtaan veden markkinoilla merkittävä tekijä maailmassa vastaamalla lähes 100 miljoonan ihmisen juomavedestä. Jätteiden käsittelyssäkin Veolia on hyvin merkittävä toimija vastaamalla 43 miljoonan ihmisen jätteistä. Veolian energiantuotanto vastaa n. 15 %:a koko Suomen kuluttamasta energiasta. (8). (7.)

2.6 Pori Energia

Porin kaduille syttyi katuvalaistus vuonna 1898, joten sillä hetkellä Porin energia alkoi syntyä. Kaukolämpötoiminta alkoi 1969, ja teatteritalo oli ensimmäinen kiinteistö, joka liitettiin kaukolämpöverkkoon. Nykyään yli puolet porilaisista asuu Pori energian kaukolämmöllä lämmitetyissä kiinteistöissä. Valtaosa kaukolämmöstä tuotetaan lähiseudun puulla ja turpeella. Vuonna 2018 Pori Energia työllisti vakituisesti yli 200 henkilöä liikevaihdon ollessa 137,1 M€. Porin energia tuotti 683 GWh:a kaukolämpöä vuonna 2018, sähkön vastapainetuotantoa oli 248 GWh:a ja prosessienergian tuotantoa 290 GWh:a. (9; 10.)

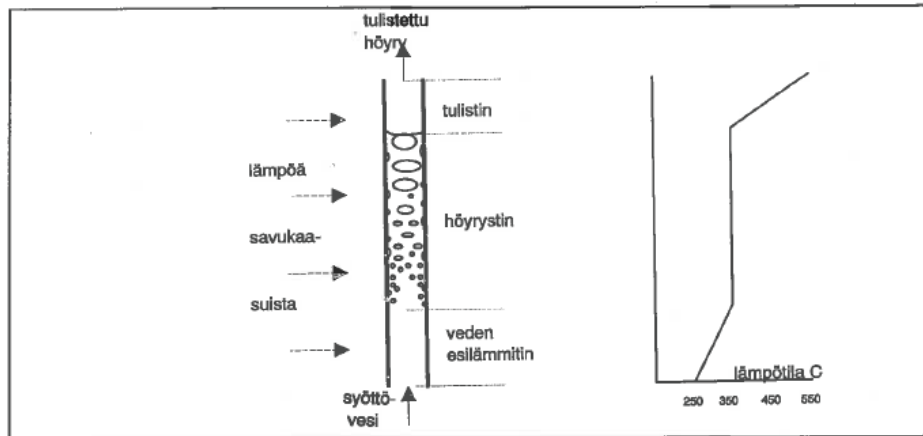
3 HÖYRYKATTILA

3.1 Historia

Ensimmäiset höyrykattilat on rakennettu 1700- ja 1800-luvuilla kotitaloustarpeita varten, pääasiassa ruoanvalmistukseen. Ne ovat olleet alta päin liekillä lämmitettäviä, puoliksi vedellä täytettyjä umpinaisia astioita. Höyryntuotannon hyötysuhdetta alettiin 1800-luvulla parantamaan ja silloin kehitettiin vieläkin käytössä oleva suurvesitilarakenne. Kyseisellä rakenteella pyrittiin alentamaan kattilasta poistuvan savukaasun lämpötilaa ja näin parantamaan kattilan höytysuhdetta. 1900-luvun alussa höyryturbiinin keksiminen asetti vaatimuksia höyrykattilan yhä suuremmille paineille sähköntuotannon tehostamiseksi. Vesiputkikattilat mahdollistivat höyryn paineen nostamisen sähköntuotannon tehostamiseksi. Nykyisin käytössä olevien vesiputkikattiloiden käyttöpainne on jopa 240 baaria. (11, s. 111.)

3.2 Höyrykattilan toiminta

Höyrykattila höyrystää vettä polttotapahtumassa polttoaineeseen sitoutuneen kemiallisen energian hapen kanssa reagoinnissa muodostuneella lämpöenergialla. Höyrykattilaan syötetty vesi lämmitetään ensin painetta vastaavaan höyrystymislämpötilaan. Höyrystymislämpötilan saavutettuaan vesi alkaa höyrystyä vesihöyryksi. Vesihöyryä pystytään tulistamaan höyrystymisen jälkeen nostamalla vesihöyryn lämpötilaa, jolloin se muuttuu kylläisestä vesihöyrystä tulistetuksi vesihöyryksi. (Kuva 4.)



KUVA 4. Lämpötilan muutos veden lämmityksestä tulistumiseen (11, s. 7)

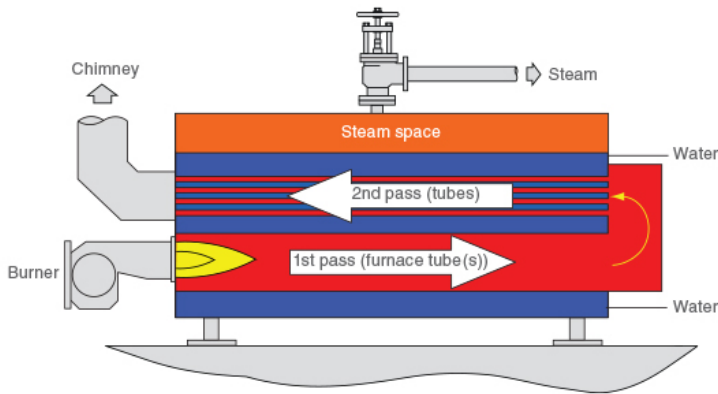
Veden lämmittäminen, höyryttäminen ja höyryn tulistaminen vaativat lämpöenergiaa, jota saadaan polttoainetta polttamalla. Kattilaan syötetyn polttoaineen reagoitessa palamisilman sisältämän hapen kanssa muodostuu lämpöenergiaa sisältäviä savukaasuja. Savukaasujen lämpöenergia pyritään siirtämään kattilan lämmönsiirtopintojen läpi vesihöyrypiiriin mahdollisimman tehokkaasti. (11, s. 7.)

Höyrykattilat voidaan jakaa kahteen pääryhmään, suurvesitilakattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Suurvesitilakattilat koostuvat nimenomaan suuresta yhtenäisestä vesi- ja höyrytilasta, jonka sisällä tulitorvessa polttoaine palaa ja tuliputkissa kulkevat savukaasut lämmittävät ja höyryttävät putkien ulkopuolella olevaa vettä. Vesiputkikattilassa putkien sisäpuolella virtaa vesi ja höyry, joita savukaasut lämmittävät putkien ulkopuolelta. (11, s. 111 - 114.)

3.3 Suurvesitilakattila

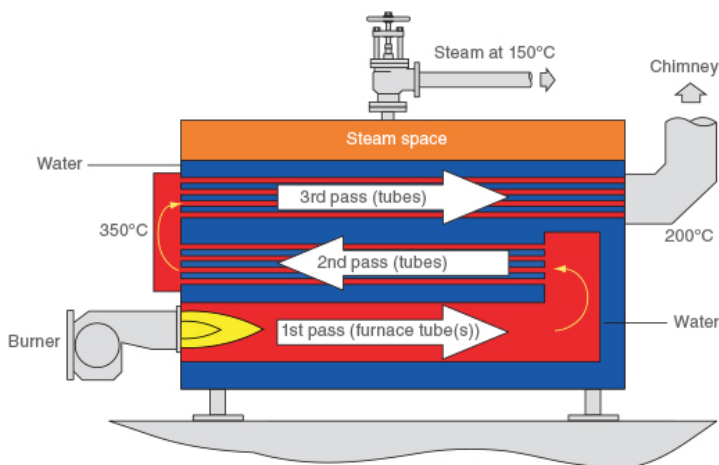
Suurvesitilakattila on suunniteltu pienille käyttöpaineille johtuen suuresta vesitilasta. Suuren yksittäisen vesihöyrytilan valmistaminen suurille paineille vaatisi seinämiltä lujaa kestävyyttä, joten vesiputkikattila tulee hinnaltaan edullisemmäksi. Suurvesitilakattiloita käytetään yleisesti teollisuudessa tuottamaan matalapaineista prosessihöyryä kohteissa, jossa höyryn kulutus on niin vähäistä, että sähköntuotanto ei kannata. Suurvesitilakattilat ovat yleensä öljy- tai kaasukäyttöisiä. Käyttöpaineet yleensä ovat alle 15 baaria ja höyryntuotantomäärä alle

70 000 kg/h. Suurvesitilakattilat ovat yleensä kaksi- tai kolmevetoisia. Kaksivetoisessa tulitorvi-tuliputkikattilassa polttoaine palaa tulitorvessa, josta savukaasut menevät kattilan peräosassa olevaan kääntökammioon. Kääntökammioista savukaasut jakautuvat tuliputkiin ja palaavat takaisin kattilan etuosaan ja poistuvat kattilasta (kuva 5). (11, s. 111 - 112; 12.)



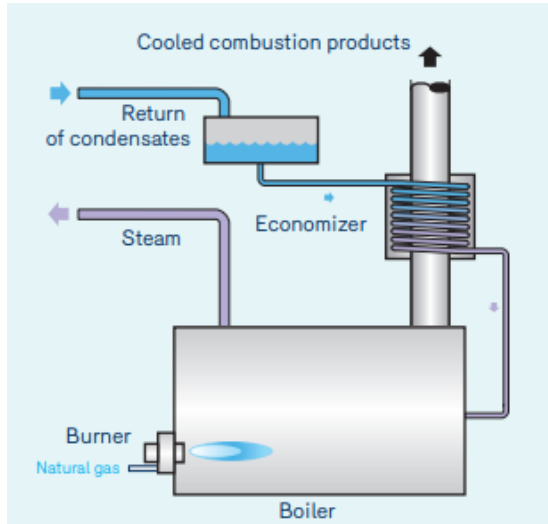
KUVA 5. Suurvesitilakattila kaksivetoisena (13)

Kolmevetoisessa tulitorvi-tuliputkikattilassa on toinenkin kääntökammio kattilan etuosassa, missä savukaasut kääntyvät vielä takaisin tuliputkia pitkin kattilan takaosaan, josta ne poistuvat kattilasta. Tulitorvi yleensä rakennetaan kattilassa tuliputkien alapuolella. Kattilan yläosassa on höyrytila, joka ei ole yleensä kosketuksissa lämmönsiirtopintojen kanssa. (Kuva 6.) (11, s. 112.)



KUVA 6. Suurvesitilakattila kolmevetoisena (13)

Suurvesitilakattilan jälkeen voidaan savukaasukanavaan rakentaa syöttöveden esilämmitin. Syöttöveden esilämmittimellä saadaan alennettua savukaasun lämpötilaa ja parannettua kattilan hötyysuhdetta (kuva 7). (11, s. 112.)



KUVA 7. Suurvesitilakattilan savukaasukanavaan asennettu syöttöveden esilämmitin (14, s. 1)

3.4 Vesiputkikattila

Vesiputkikattila on suunniteltu suurille käyttöpaineille, joissa höyrystyvä vesi ja höyry virtaavat putkien sisäpuolella ja niitä lämmittävät savukaasut putkien ulkopuolella (kuva 8). Vesiputkikattilat voidaan jakaa kolmeen ryhmään vesi-höyrykiertonsa mukaan: luonnonkierto-, pakkokierto- ja läpivirtauskattiloihin. Kaikissa kattilatyypeissä keskeisimmät vesihöyrypiirin lämmönsiirtimet ovat saman tyyppiä ja niihin kuuluvat syöttöveden esilämmitin, höyrystin ja tulistimet. Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloissa lisäksi on lieriö, jossa höyry erotetaan vedestä. (11, s. 113.)



KUVA 8. Kiertopeti vesiputkikattila (15)

3.4.1 Syöttöveden esilämmitin

Esilämmittimen tehtävä on lämmittää kattilaan syötettävää vettä lähemmäksi sen kylläistä pistettä. Esilämmittimiä on kahden tyyppisiä, höyrystäviä ja ei-höyrystäviä. Ei-höyrystävä esilämmitin jättää veden lämpötilan alijäähtyneeksi noin 20 °C:seen, jotta kiehumisvaaraa ei esiinny kattilan kuormitusvaihteluiden takia. Höyrystävä lämmittää syöttöveden kiehumispisteeseen ja höyrystääkin osan syöttövedestä. (11, s. 184.)

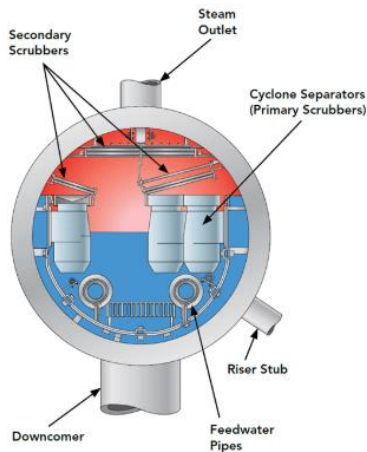
Savukaasuilla syöttövettä lämmittämällä saadaan parannettua kattilan hyötysuhdetta, koska tulistimien jälkeen savukaasujen lämpötila voi olla jopa 800 °C. Esilämmitin on sijoitettu kattilassa tulistimien jälkeen, jolloin saadaan jäähdytettyä savukaasut lähelle syöttöveden tulolämpötilaa. Syöttöveden lämmityksen jälkeen savukaasujen lämpötila on 250 - 450 °C. Savukaasuilla on huomattavasti huomompi lämmönsiirto-ominaisuus kuin putkien sisäpuolella virtaavalla vedellä, joten putkien ulkopuolen lämmönsiirtopintaa voidaan kasvattaa rivoituksella. Rivoitukseen voidaan käyttää monenlaista rakennetta ja tekniikkaa, mutta ne lisäävät myös painehäviötä varsinkin likaantuessaan. Paljon lentotuhkaa tuottavilla polttoaineilla voidaan käyttää myös sileää teräsputkea, joka on huomattavasti helpompi nuohouksella puhdistaa. (11, s. 184 - 185.)

3.4.2 Höyrystin

Höyrystin on lämmönsiirrin, jonka tehtävä on ainoastaan höyrystää kattilaan syötetty vesi. Syöttövesi johdetaan höyrystimen alaosaan lieriön laskuputkia pitkin. Vesi jakaantuu tulipesää ympäröiviin höyrystinputkiin, joissa vesi alkaa höyrystyä tulipesästä vapautuvalla lämpöenergialla. Veden ja höyryn seos alkaa nousta ylöspäin höyrystysputkissa ja lopulta seos päättyy takaisin lieriöön. Höyrystinputket voidaan sijoittaa tulipesän ympärille, koska putkissa virtaava vesi jäähdyttää höyrystinputkia hyvin ja näin estää putkien liiallista lämpenemistä ja puhkipalamista. Luonnonkierto- ja pakkokierto-kattilassa vesi ei höyrysty kokonaan yhdellä kierroksella, vaan se kiertää useamman kerran höyrystimen läpi. Läpivirtauskattilan höyrystimessä vesi höyrystyy yhdellä kierroksella, joten lieriötä ei tarvita. (11, s. 113.)

3.4.3 Lieriö

Lieriön tehtävä on erottaa höyrystinputkissa höyrystynyt kylläinen höyry höyrystymättä jääneestä kylläisestä vedestä. Kattilaveteen on liuenneena haitallisia suoloja, jotka eivät saisi päästä lieriöstä höyryn mukana tulistimiin tai turbiiniin aiheuttamaan haitallisia kerrostumia. Näin ollen lieriön erotusaste pitäisi saada mahdollisimman hyväksi. Painovoimaa hyväksi käyttäen vesi ja höyry erotetaan lieriön sykloneissa toisistaan (kuva 9). Parhaaseen erotusasteeseen päästään, kun höyry-vesiseos virtaa koko ajan tasaisena virtana lieriöön. Erotuksen tehokkuuteen vaikuttaa höyryn virtausnopeus, johon vaikuttaa lieriön koko. Mitä hitaammin vedestä erotettu höyry virtaa kohti tulistimia, sitä paremmin painovoimainen erottuminen tapahtuu. (11, s. 117.)



KUVA 9. Lieriön rakenne (16)

Vesi-höyryseoksen tiheuserojen vuoksi lieriön suunniteltuun kokoon vaikuttaa myös kattilan käyttöpaine. Suuremmissa kattilan käyttöpaineissa lieriön koko pitää olla suhteessa isompi kuin pienemmissä käyttöpaineissa, koska veden tiheusero höyryyn on suurempi pienemmissä paineissa. Painevoimainen erotus on näin ollen tehokkaampaa pienemmissä käyttöpaineissa, joten höyryn viipymäaika lieriössä voi olla lyhyempi. (11, s. 117.)

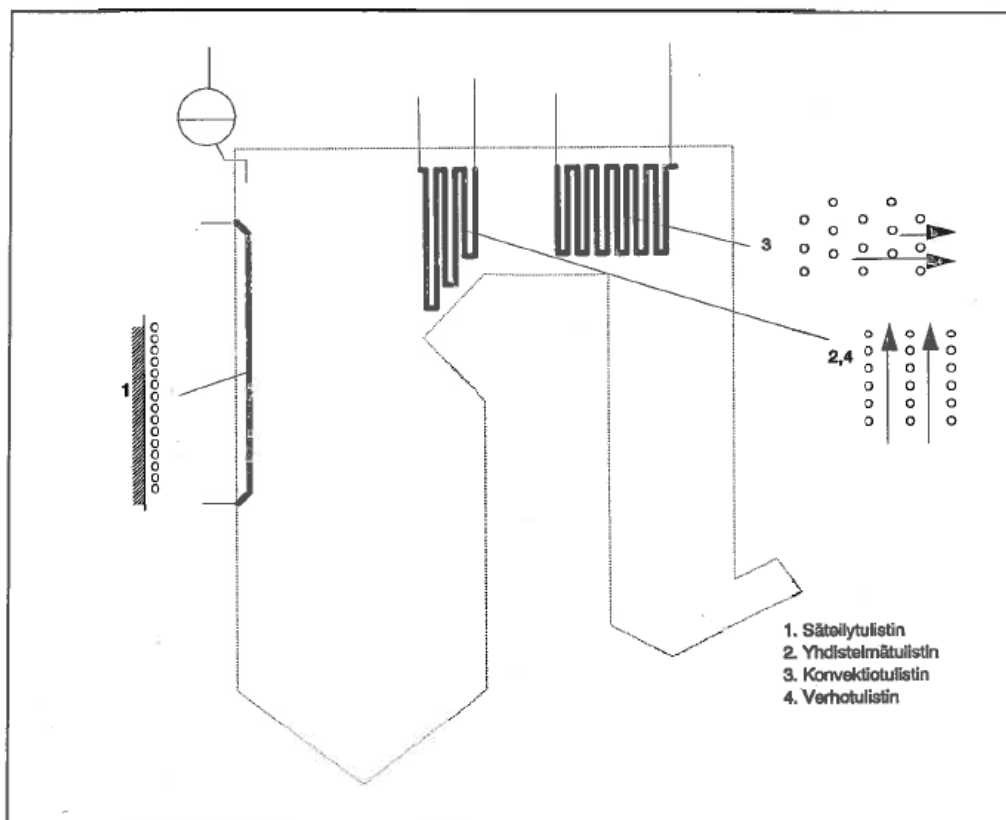
3.4.4 Tulistin

Lämmittämällä eli tulistamalla höyryä saadaan höyryturbiinista enemmän liike-energiaa, mitä kuumempana höyry johdetaan turbiiniin. Näin ollen nykyaikaisissa voimalaitoksissa lähes poikkeuksetta höyry tulistetaan. Tulistus voi olla monivaiheinen, jolloin höyryn paisuntaa pystytään jatkamaan alhaisempaan paineeseen höyryturbiinissa. Tulistimien sijoittelu kattilassa vaihtelee tulistintyyppin mukaan. Yleisesti tulistimet sijaitsevat kattilan tulipesässä tai heti alkavassa savukaasukanavassa, koska tulistus vaatii korkeita lämpötiloja. Höyry voidaan tulistaa maksimissaan n. 550 °C:seen, koska materiaalien tekniset rajoitukset estävät korkeammat lämpötilat. (11, s. 188 - 189.)

Välitulistuksella höyry voidaan turbiinin ensimmäisen vaiheen jälkeen tulistaa uudestaan. Välitulistuksessa päästään samoihin lämpötiloihin kuin tulistimissa,

mutta välitulistus tapahtuu pienemmässä paineessa. Tulistetun höyryn täytyy pysyä lämpötilaltaan tasaisena, koska sähköntuotanto laskee höyryn lämpötilan laskiessa ja lämpötilan noustessa tulistimet saattavat ylikuumentua. Lämpötilaa pystytään säätämään suihkuttamalla syöttövettä tulistusvaiheiden välissä tulistetun höyryn joukkoon. Kulumisen ehkäisemiseksi höyry pyritään tulistimissa jakamaan painehäviöillä tasaisesti kaikkiin höyryputkiin. Normaalisti 7 - 12 bar:n painehäviöllä saadaan virtauksen tasainen jakautuminen kaikkiin höyryputkiin. (11, s. 188 - 189.)

Tulistimet voidaan jakaa neljään ryhmään sijoitustapansa mukaan, säteilytulistiin, verhotulistimiin, konvektiontulistiin sekä yhdistelmätulistiin (kuva 10).



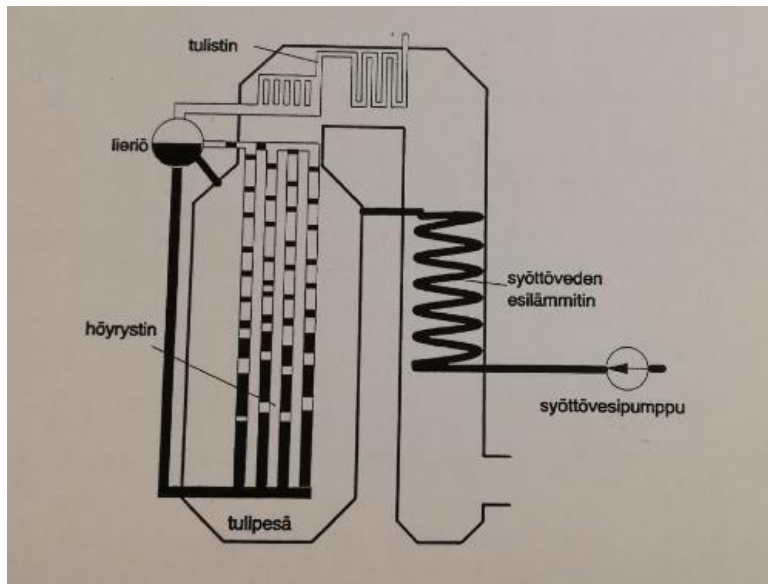
KUVA 10. Tulistimien sijoittelu vesiputkikattiloissa (11, s. 189)

Kuvasta 10 nähdään, että säteilytulistin sijaitsee tulipesän seinällä, johon tulipesän lämpöenergia siirtyy säteilemällä. Koska tulipesä sisältää suuren määrän lämpöenergiaa, säteilytulistimissa täytyy käyttää suurta höyryn virtausnopeutta,

jotta vältetään tulistimen ylikuumentuminen. Verhotulistin on sijoitettu tulipesän poistoaukkoon, joten sekin toimii säteilytulistimen periaatteella. Verhotulistin myös suojaa myöhempiä tulistimia savukaasujen epäpuhtauksilta. Verhotulistin jäädyttää sulan tuhkan sekä suoloja sisältävät savukaasut niin nopeasti, että ne eivät pääse vaikuttamaan jäljempänä oleviin tulistimiin. Yleisin tulistintyyppi on konvektiotulistin, joka sijaitsee tulipesän jälkeen savukaasukanavassa. Konvektiotulistimet toimivat pelkästään savukaasun koskettaessa tulistimien pintoja, jolloin savukaasun lämpöenergia siirtyy tulistinputken läpi höyryyn. Lisäksi on vielä yhdistelmätulistimet, jotka toimivat säteilytulistimena sekä konvektiotulistimena. Yhdistelmätulistimet sijaitsevat tulipesän yläpuolella, jolloin tulistimen uloimmat osat toimivat säteilytulistimina ja tulistimen sisemmät osat toimivat savukaasukanavan alkuosassa konvektiotulistimina. (11, s. 189 - 191.)

3.5 Luonnonkiertokattila

Kattilassa veden ja vesihöyryn kierto perustuu tiheyseroihin. Tulipesän höyrystinputkissa höyrystyvän vesi- ja vesihöyryseoksen tiheys on pienempi kuin lieriön laskuputkissa. Tämän takia höyrystinputkissa oleva veden ja vesihöyryn seos alkaa virrata ylöspäin kohti lieriötä, ja laskuputkia pitkin vesi virtaa lieriöstä alaspäin höyrystimeen. Esilämmitetty syöttövesi syötetään lieriöön, josta se laskeutuu laskuputkia pitkin höyrystymättä jääneen veden mukana höyrystimeen. Höyrystimestä lieriöön palanneesta vesi ja vesihöyryn seoksesta lieriössä erotetaan painovoimaisesti höyry, joka johdetaan tulistimiin. (Kuva 11.) (11, s. 113.)



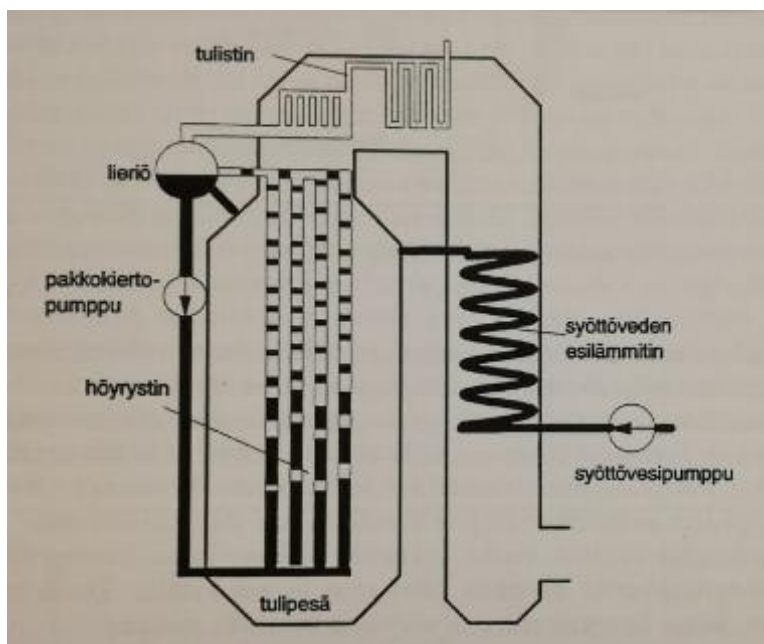
KUVA 11. Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri (11, s. 113)

Kattilan kiertoluku kertoo höyrystimessä virtaavan veden suhdetta höyrystyvään veteen, eli kuinka monta kierrosta veden tarvitsee kiertää höyrystimessä höyryntyäkseen. Korkeampipaineisten kattiloiden kiertoluku on pienempi kuin matalapaineisten, johtuen pienemmästä tiheyserosta. Korkeammassa paineessa veden ja vesihöyryn tiheusero on pienempi, joten höyrystinputkissa seos nousee hitaammin, jolloin se kerkeää höyrystyä enemmän. Luonnonkiertokattiloiden kiertoluku vaihtelee välillä 5 - 100 painetason mukaan. Tämän takia luonnonkiertokattilat ovat yleensä korkeita. Mitä korkeampi kattila on, sitä suurempi on laskuputkien ja höyrystinputkien välinen tiheuserosta aiheutuva paine-ero. Paineeron aikaansaaman kiertovoiman on voitettava lasku- ja höyrystinputkien virtausvastukset. (11, s. 114 - 115.)

Luonnonkiertokattilan omakäyttöteho on pienempi kuin pakko- ja läpivirtauskattiloiden, koska veden kierrätykseen ei tarvita pumppua. Luonnonkiertokattilat eivät sovellu korkeille höyrynpaineille, koska veden ja höyryn tiheusero pienenee paineen noustessa. Veden kriittisessä paineessa (221 bar) on veden ja vesihöyryn tiheys yhtä suuri 315 kg/m^3 . Luonnonkierron toiminnan kannalta tulistimesta ulostulevan höyrynpaineen tulee olla alle 170 bar, jolloin veden tiheys on noin viisinkertainen höyryn tiheyteen verrattuna. (11, s. 114.)

3.6 Pakkokierto-kattila

Kattilan periaate on samanlainen kuin luonnonkiertoisenkin kattilan, mutta pakkokierto-kattilassa vesihöyrypiirissä on pakkokierto-pumppu (kuva 12). Pakkokierto-pumpun ansiosta kattila soveltuu korkeammille paineille kuin luonnonkierto-kattila. Pakkokierto-kattila ei sovellu ylikriittisiin paineisiin, koska höyry erotetaan vedestä lieriössä tiheyserojen avulla. Käytännössä pakkokierto-kattilat soveltuvat höyrynpaineiltaan korkeimmillaan noin 190 bar:n paineisiin. Lieriöstä laskuputkiin lähtevän kylläisen veden höyrystymisen ja pumpun kavitaation estämiseksi tulee pumpun sijoittaa useita metrejä lieriötä alemmaksi. (11, s. 118.)

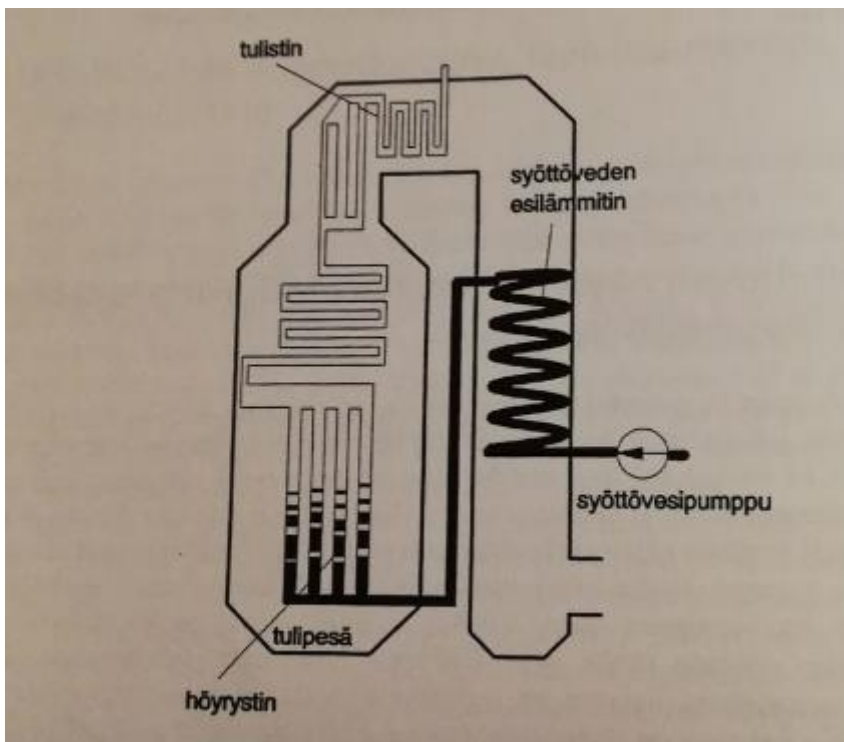


KUVA 12. Pakkokierto-kattilan vesihöyrypiiri (11, s. 119)

Pakkokierto-kattilan höyrystin voidaan mitoittaa suurempiin painehäviöihin kuin luonnonkiertoisissa kattiloissa, joten höyrystinputkistokin voidaan toteuttaa käytännössä mihin asentoon vain. Höyrystinputket voivat olla halkaisijaltaan pienempiä ja edullisempia luonnonkiertoiseen kattilaan nähden pakotetun vesikierron ansiosta. Pakkokierron aikaansaamiseksi pumpun kuluttaa n. 0,5 % omakäyttöön koko tehosta. Kiertoluku pakkokierto-kattiloissa on 3 - 8, joka on pienempi kuin luonnonkiertoisissa kattiloissa. (11, s. 118.)

3.7 Lämpivirtauskattila

Lämpivirtauskattila on rakenteeltaan kuin pitkä putki, jossa ei ole höyrynerotuslieriötä (kuva 13). Lämpivirtauskattilassa kiertoluku on yksi, eli vesi syötetään syöttöveden esilämmittimen läpi höyrystimeen, josta se jatkaa höyrystyttyään suoraan tulistimeen ilman mitään kattilan sisäistä kiertoa. Lämpivirtauskattiloita on kahden tyyppisiä, kiinteän ja vaihtelevan höyrystymispisteen kattiloita. Voimalaitoksissa, joissa halutaan sähköntuotannon hyötysuhde mahdollisimman hyväksi, käytetään lämpivirtauskattiloita, koska ne voivat toimia ylikriittisillä käyttöpaineilla. (11, s. 120.)



KUVA 13. Lämpivirtauskattilan vesihöyrypiiri (11, s. 124)

Lämpivirtauskattiloissa vettä ja höyryä ei eroteta toisistaan, joten ne voivat toimia ylikriittisillä paineilla. Syöttöveden täytyy olla erittäin puhdasta, koska lämpivirtauskattilassa kaikki vesi höyrystyy, eikä kattilakiveä aiheuttavia suoloja poisteta ulospuhalluksella niin kuin lieriöllä varustetuissa vesiputkikattiloissa. Lämpivirtauskattiloiden virtausputket voidaan valmistaa pieniläpimittaisista putkista, koska putkien

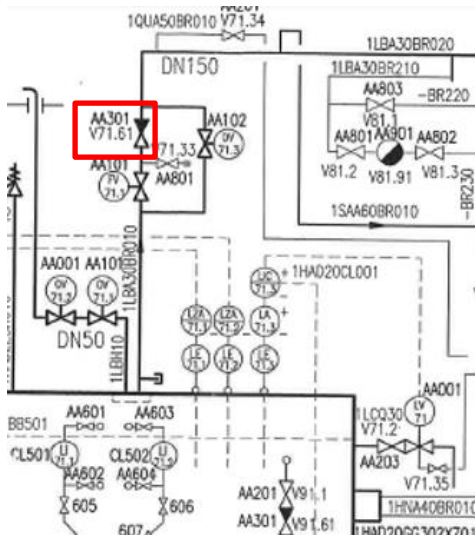
virtaus tuotetaan syöttövesipumpulla. Pienistä virtausputkista aiheutuvat painehäviöt läpivirtauskattiloissa ovat merkittävät ja vaativat syöttövesipumpulta suuria tehoja painehäviön voittamiseksi. Läpivirtauskattilat ovat nopeampia säädettäviä kuin luonnon- ja pakkokiertoiset kattilat johtuen pienemmästä höyrystimen vesimassasta ja virtausputkien ohuemmista seinämänpaksuuksista. (11, s. 120.)

4 KAUSTISEN HÖYRYKATTILALAITOKSEN PAINEAKKUTOIMINTO

Varakattilana toimivan suurvesitilahöyrykattila on suunniteltu toimivan biokattilan paineakkuna, jolla saataisiin tasoitettua biokattilan käyttöä. Tehdasympäristössä olisi paineakkutoiminnosta merkittävää hyötyä, koska tehtaalla höyryn kulutus on vaihtelevaa. Ongelmana on ollut varakattilan paineakun toimimattomuus.

4.1 Paineakun lataus

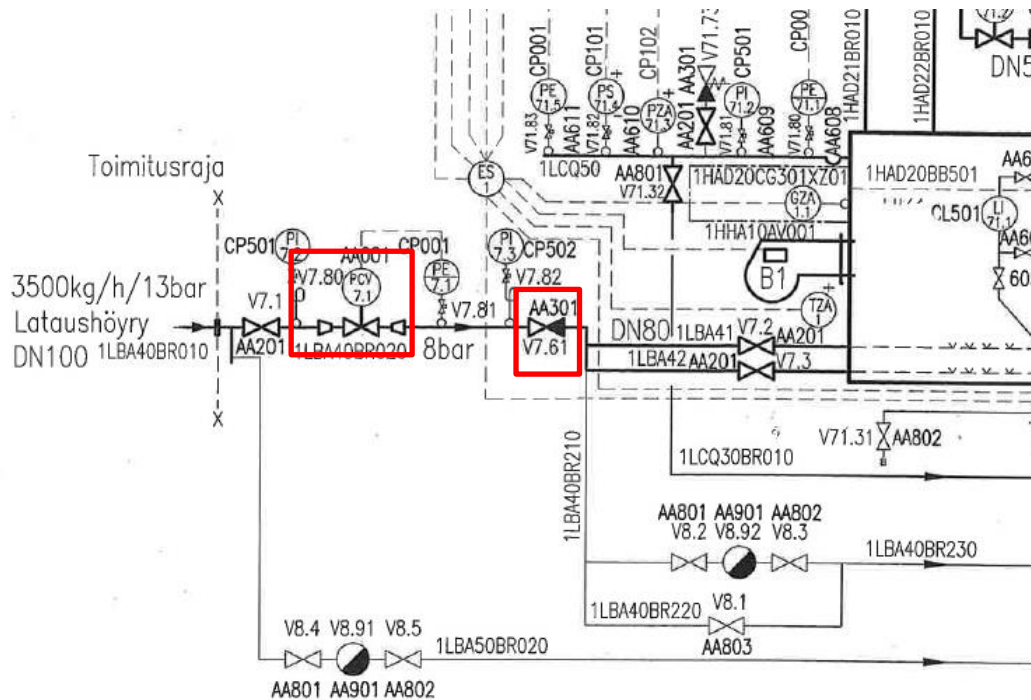
Varakattilan paineakkutoiminto perustuu suoraan höyryverkoston paineen vaihteluun. Liitteessä 1 on esitetty varakattilan kytkentä V71.61-takaiskuventtiilillä suoraan samaan höyryverkostoon, kuin biokattilakin. Takaiskuventtiili on asennettu niin, että verkostosta varakattilaan päin virtaus on estetty (kuva 14). Takaiskuventtiili aiheuttaa lataustoiminnon tarvitsevan paine-eron varakattilan ja höyryverkoston välillä verkoston höyrynpaineen noustessa.



KUVA 14. Varakattilan päähöyrylinjan kytkentäkaavio

Paine-eron kasvaessa riittävän suureksi alkaa lataushöyry virtaamaan V7.80-lataushöyryventtiilin läpi varakattilan alaosaan lämmittäen kattilassa olevaa vettä (kuva 15). Höyryverkoston ja varakattilan paine-eron tulee olla suurempi, kuin

varakattilan vesimassan aiheuttama hydrostaattinen paine, jotta höyry lähtisi virtaamaan lataushöyrylinjasta varakattilaan. Kattilassa olevaa vettä pystytään lämmittämään, että varakattilan paineen noustessa se pysyy koko ajan kylläisenä vetenä tai hyvin lähellä sitä.



KUVA 15. Varakattilan lataushöyrylinjan kytkentäkaavio

4.2 Paineakun purkaminen

Höyryverkoston paineen alkaessa laskea varakattilankin paine laskee, jolloin kyläinen vesi alkaa varakattilassa höyrystymään ja tuottamaan höyryä biokattilan rinnalla prosessiin. Lataushöyrylinjassa on takaiskuventtiili V7.61, joka estää varakattilasta verkostoon päin virtauksen, jotta paineakun purkaus tapahtuisi päähöyrylinjaa pitkin (kuva 15). Höyryntuotanto jatkuu niin kauan, kuin verkoston ja varakattilan paine laskee. Höyryntuotannon teho riippuu varakattilan vesimassan tilavuudesta sekä paineenlaskun nopeudesta. Mitä nopeammin varakattilan paine laskee, sitä nopeammin vesi höyrystyy ja tuottaa prosessiin höyryä.

4.3 Energian varastointipotentiaali

Varakattilana toimivan suurvesitilahöyrykattilan vesitilavuus on 24 m³. Kattilan yläosassa sijaitsevan höyrytilan tilavuus on 6 m³, joten vesitilan tilavuus on 18 m³. Selvittämällä kylläiselle vedelle ja höyrylle eri käyttöpaineissa ominaisentalpiat sekä tiheydet, saatiin selville varakattilan energian varastointipotentiaali.

Veden termodynaamiset intensiivisuureet voidaan lukea liitteestä 2 eri käyttöpaineille. Arvot on ilmoitettu taulukossa absoluuttisena paineena. Laskuissa käytettiin tasalukuja, joten arvot olivat suoraan taulukosta saatavissa, paitsi 11 bar absoluuttista painetta, jolloin arvot piti interpoloida taulukosta kaavalla 1. (17, s. 88.)

$$\frac{y-y_0}{x-x_0} = \frac{y_1-y_0}{x_1-x_0}$$

KAAVA 1

y = Halutun pisteen y -akselin arvo

y_0 = y -akselin pienempi havaintopiste

y_1 = y -akselin isompi havaintopiste

x = Halutun pisteen x -akselin arvo

x_0 = x -akselin pienempi havaintopiste

x_1 = x -akselin isompi havaintopiste

Liitteessä 2 käytetty veden ja höyryn ominaistilavuus muutettiin ominaistiheydeksi kaavalla 2.

$$\rho = \frac{1}{v}$$

KAAVA 2

ρ = ominaistiheys (kg/m³)

v = ominaistilavuus (m³/kg)

Höyryn ja veden massat varakattilassa laskettiin kaavalla 3.

$$m = \rho * V$$

KAAVA 3

m = Aineen massa (kg)

V = Aineen tilavuus (m³)

Höyryn ja veden energioiden määrät varakattilassa käyttöpaineille laskettiin kaavalla 4.

$$Q = h * m$$

KAAVA 4

Q = Aineen energiamäärä (kJ)

h = Aineen ominaisentalpia (kJ/kg)

Taulukossa 1 ja 2 on laskettu höyryn ja veden sisältämät energiamäärä varakattilassa absoluuttisille käyttöpaineille.

TAULUKKO 1. Varakattilassa olevan höyryn energiasisältö

Paine (bar (a))	Entalpia Kylläinen höyry (kJ/kg)	Lämpötila (°C)	Tiheys (kg/m ³)	Höyryn määrä kattilassa (kg)	Höyryn energian määrä (kJ)
5	2748,70	151,90	2,67	16,00	43990,93
6	2756,80	158,90	3,17	19,01	52394,04
7	2763,50	165,00	3,66	21,99	60758,52
8	2769,10	170,40	4,16	24,96	69112,31
9	2773,90	175,40	4,65	27,91	77411,16
10	2778,10	179,90	5,14	30,86	85743,83
11	2780,92	183,58	5,49	32,97	91678,68

TAULUKKO 2. Varakattilassa olevan veden energiasisältö

Paine (bar (a))	Entalpia Kylläinen vesi (kJ/kg)	Lämpötila (°C)	Tiheys (kg/m ³)	Veden määrä kattilassa (kg)	Veden energian määrä (kJ)
5	640,23	151,90	915,25	16474,46	10547446,46
6	670,56	158,90	908,60	16354,72	10966818,10
7	697,22	165,00	902,53	16245,49	11326678,70
8	721,11	170,40	897,02	16146,39	11643326,16
9	742,83	175,40	891,90	16054,23	11925561,90
10	762,81	179,90	887,08	15967,36	12180058,55
11	779,22	183,58	882,61	15887,03	12379424,54

Varakattilan sisältämän höyryn ja veden energiamäärät ovat tiedossa käyttöpaineille, jolloin pystytään laskemaan suoraan energian lataus- ja purkauspotentiaalit. Paineakun purkaus ja lataus tapahtuu paineen vaihtelun avulla, joten energianmuutos eri käyttöpaineitten välillä saadaan suoraan vähennyslaskulla. Taulukossa 3 on laskettu paineen muutoksista aiheutuva energiamäärän muutos sekä lataus- ja purkausteho.

TAULUKKO 3. Varakattilan energiamäärän muutos paineen vaihdellessa

Paineen muutos (abs)	Energian määrän muutos paineen suhteessa (kJ)	(kWh)	Purkaus teho (kW) 15min	Lataus teho (kW) 30min
11bar-10bar	205300,84	57,03	228,11	114,06
11bar-9bar	468130,16	130,04	520,14	260,07
11bar-8bar	758664,75	210,74	842,96	421,48
11bar-7bar	1083666,00	301,02	1204,07	602,04
11bar-6bar	1451891,07	403,30	1613,21	806,61
11bar-5bar	1879665,83	522,13	2088,52	1044,26

Paineakun purkaus- ja lataustehot laskettiin niin, että paineen purkaus kestäisi 15 minuuttia ja lataus kestäisi 30 minuuttia. Mitä nopeammin paineen muutos tapahtuu, sitä enemmän paineakku vastaanottaa tai luovuttaa tehoa.

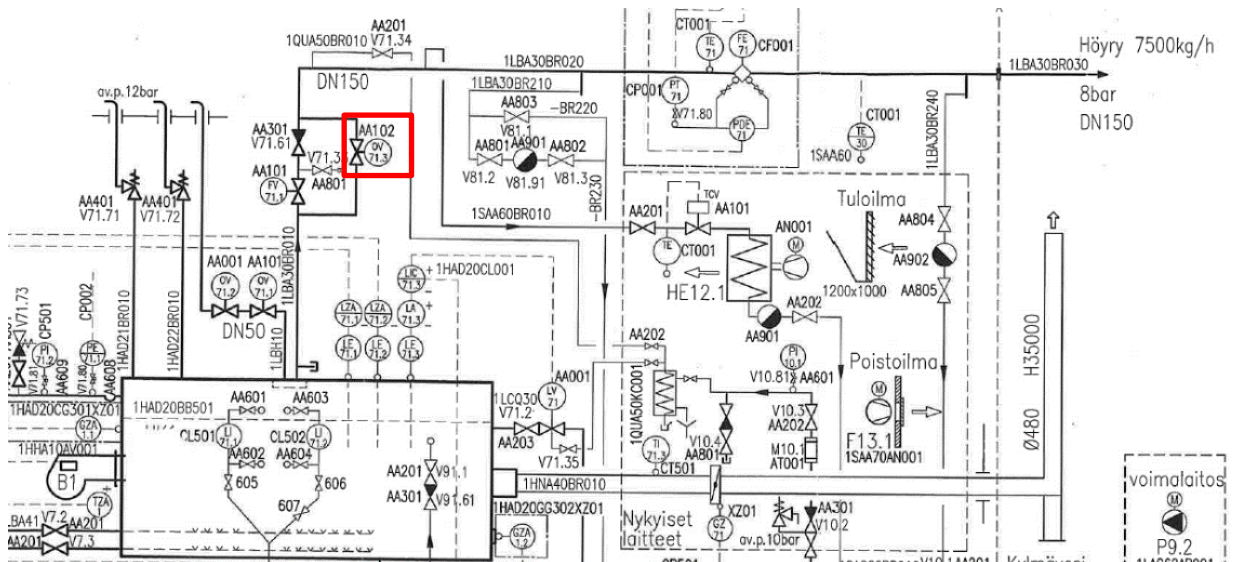
5 PAINEAKUN LATAUSTOIMINNON TOIMIMATTOMUUS

Seuraamalla prosessia huomattiin, että höyryverkoston paineen vaihdellessa varakattilasta lähtee tehoa vain siinä tilanteessa, kun poltin on käynnissä, ja käynnin jälkeen seuraavassa verkoston paineen laskussa. Lataustoiminto ei näin ollen toiminut ollenkaan. Lataushöyryventtiili V7.80 aukesi prosessin mukana, joten se todettiin toimivaksi. Lataushöyryventtiili sulkeutui aina kun lataushöyrylinjan paine laski noin 6 bar:iin. Lataushöyrylinjan paineen noustessa yli sulkeutumispaineen lataushöyryventtiili alkoi aueta hyvin hitaasti ja aukesi tasaisesti määrättyyn 40 %:n maksimiohjausarvoon.

Seuraamalla höyryverkoston ja varakattilan paineita huomattiin, niiden pysyvän lähes samoina prosessin tilasta riippumatta. Höyryverkoston paineen noustessa nousi myös varakattilan paine, vaikka lataushöyrylinjasta ei virrannut höyryä varakattilaan. Höyryn täytyi päästä vuotamaan päähöyrylinjaa pitkin takaisin varakattilaan, vaikka sinne on asennettu takaiskuventtiili V71.61. Höyryn vuodon syyksi selvisi auki jäänyt päähöyryventtiilin FV71.1 ohitusventtiili OV71.3, joka ohittaa myös päähöyrylinjan takaiskuventtiilin (liite 1).

5.1 Höyryventtiilien virheellinen ajotapa

Päähöyryventtiilin FV71.1 ohitusventtiili OV71.3 auki olemisen normaalissa ajotilanteessa on estänyt varakattilan ja höyryverkoston välille paine-eron syntymisen (kuva 16).

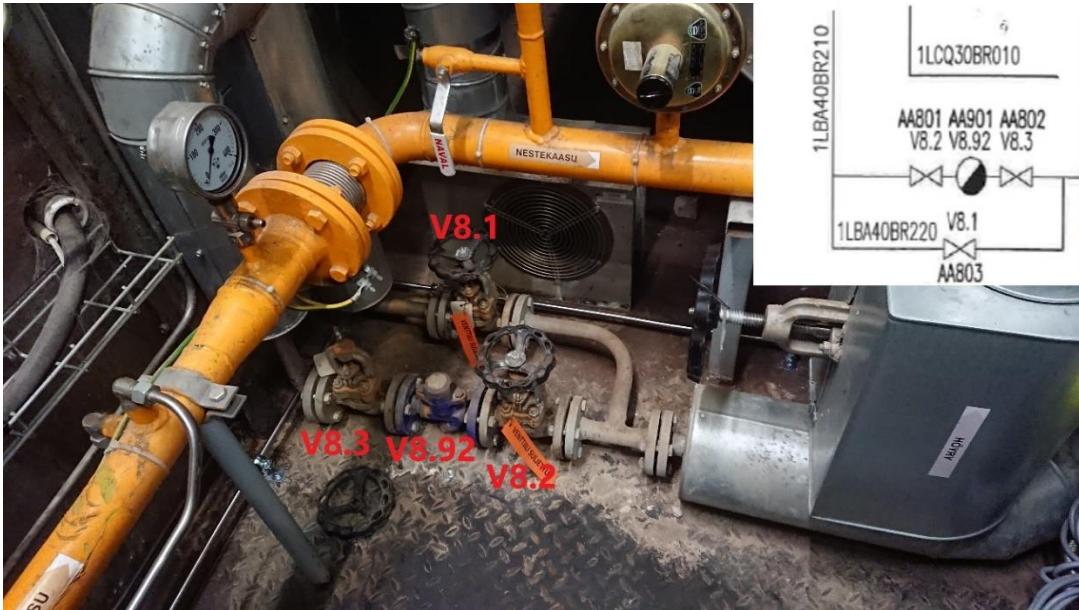


KUVA 16. Varakattilan päähöyrylinjan kytkentäkaavio

Oitusventtiili OV71.3 on tarkoitettu avattavaksi varakattilan ylösajotilanteissa, jolloin sillä saadaan tasoitettua mahdollista höyryverkon ja varakattilan välistä paine-eroa. Normaalisissa ajotilanteissa venttiin tulee olla kiinni, koska muuten se tekee päähöyrylinjan takaiskuventtiin V71.61 toimimattomaksi, eikä lataustoinnin tarvitsemaa paine-eroa saada aikaiseksi höyryverkon ja varakattilan välille.

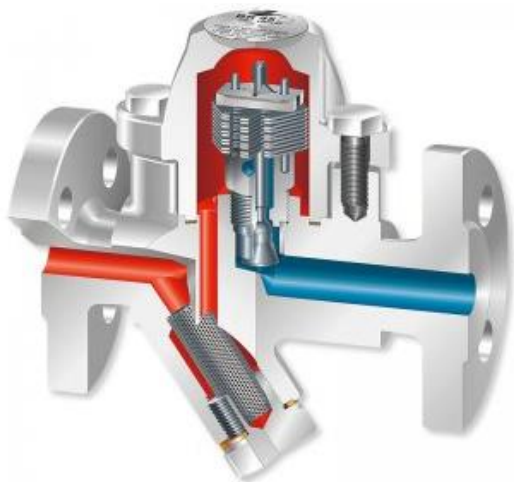
5.2 Lataushöyrylinjan lauhteenpoiston ongelmat

Lataushöyrylinjan lauhteenpoistolinjan sulkuventtiilit V8.2 ja V8.3 olivat kiinni, jolloin lauhteenpoistin V8.92 ei ole voinut poistaa lauhdetta lataushöyrylinjasta. Sulkuventtiilejä avaamalla yritettiin käynnistää lauhteen poistoa, mutta sulkuventtiili V8.3 oli jumissa, ja siitä oli myös hajonnut sulkupyörä. (Kuva 17.) Avaamalla lauhteenpoistimen ohituslinjasta sulkuventtiili V8.1 alkoi lauhdetta virtaamaan välittömästi, mutta nopeat lämpötilan vaihtelut putkistoissa aiheuttivat kovaa putkien tärinää ja pauketta.



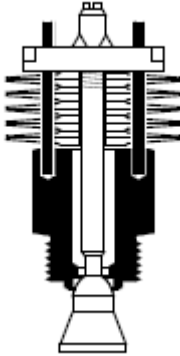
KUVA 17. Varakattilan lataushöyrylinjan lauhteenpoistin

Sulkuventtiili V8.3 täytyy vaihtaa toimivaan venttiiliin, jotta lauhteenpoisto saadaan toimimaan. Lisäksi venttiilin vaihdon yhteydessä saadaan tyhjennettyä lataushöyrylinja lauhteesta, koska linjoissa ei ole erillisiä vesitysventtiilejä. Lauhteenpoistin V8.92 on syytä puhdistaa venttiiliin V8.3 vaihdon yhteydessä, koska lauhteenpoistimessa oleva roskasihti on poistimen alapuolella ja paikallaan ollessaan lattiassa kiinni, eikä sitä saa puhdistettua ilman lauhteenpoistimen irrottamista lauhdelinjasta (kuva 18).



KUVA 18. GESTRA BK 45:n läpileikkauskuva (18)

Lataushöyrylinja lauhteenpoistin V8.92 on GESTRA BK 45 -mallinen ja sen toiminta perustuu termovitsäätimeen. Termovitsäädin toimii päällekkäisten bimetalilevyjen avulla, jotka liikuttavat suutinkaraa. (Kuva 19.) (19, s. 8.)



KUVA 19. GESTRA BK 45 -termovitsäädin (19, s. 8)

Bimetallilevyt taipuvat väliaineen lämpötilan mukaan. Väliaineen lämpötilan lähestyessä kylläisen höyryn lämpötilaa termovitsäädin sulkee virtausaukon, jolloin lauhteen virtaus pysähtyy. Väliaineen lämpötilan jäähtyessä virtausaukko aukeaa höyrynpaineesta, ja lauhde pääsee virtaamaan lataushöyrylinjasta lauhdelinjaan. BK 45 termovitsäätimen avautumisalijäähtyneisyys on 15 kelviniä. Järjestelmän ollessa kylmä termovitsäädin on auki, jolloin linjaa lämmitettäessä lauhde ja ilma pääsevät poistumaan linjastosta. (19, s. 8.)

6 PROSESSIN OPTIMOINTI

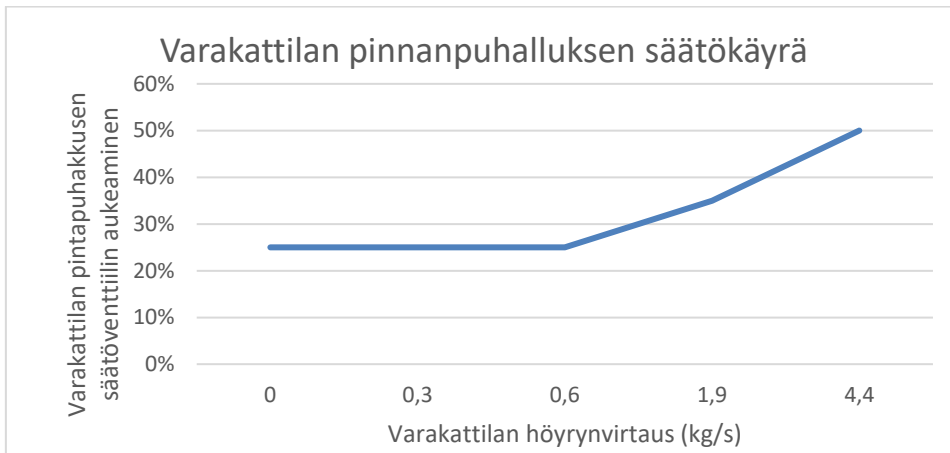
Prosessia pyrittiin optimoimaan energiatehokkaammaksi ja tasaisemmaksi painekutoiminnon avulla. Lataushöyryventtiilin säätöä pyrittiin muuttamaan biokattilan kannalta parhaaksi, jolloin pystyttäisiin saamaan polttoaine- ja energiasäästöjä aikaiseksi.

6.1 Varakattilan venttiilien testaus

Varakattilalle tehtiin painekoe, millä saatiin testattua päähöyrylinjan takaiskuventtiilin ja muiden säätöventtiilien paineen pitävyys. Varakattilanpaine laski- mutta niin hitaasti, että sillä ei ole normaalissa ajotilanteessa merkitystä. Painekokeen yhteydessä, kun paine-eroa oli syntynyt verkoston ja varakattilan välille, kokeiltiin avata varovasti lataushöyryventtiiliä V7.80. Venttiiliä avattiin manuaalisesti vain 3 % auki, ja välittömästi höyry alkoi virrata lataushöyrylinjaa pitkin varakattilaan. Näinkin pienen venttiilin avauksen seurauksesta alkoi kova putkien pauke, jolloin venttiili suljettiin vahinkojen välttämiseksi. Tämä vahvisti sen, että lataushöyrylinjan lauhdelinja täytyy saada toimimaan. Toimivalla lauhdelinjalla saadaan putkistojen lämpötilaerot varakattilaan nähden pysymään pienempinä, jolloin putkien paukkuminen pitäisi vähentyä.

6.2 Varakattilan pinnanpuhalluksen säätö

Varakattilan painekokeen venttiilien sulkemisen yhteydessä huomattiin, että pinnan ulospuhalluksenventtiili LV71 on 25 % auki, vaikka varakattilalla ei ole kulu- tusta ollenkaan. Pinnanulospuhalluksen säätökäyrä on asetettu seuraamaan va- rakattilan höyrynkulutusta, mutta höyryvirtauksen laskiessa alle 0,6 kg:aan/s pinnanpuhalluksen säätöventtiili jää 25 % auki, vaikka höyrynkulutus loppuisi ko- konaan. (Kuva 20.)



KUVA 20. Alkuperäinen varakattilan pintapuhallusventtiilin säätökäyrä

Höyrynkulutus varakattilalta saattaa olla hyvinkin pitkään mitätöntä, joten pinnanpuhalluksen määrä pienillä höyrynkulutuksilla vaikuttaa suurelta. Pinnanulospuhallusta säädetään käsi- tai toimilaitesäätöisellä jatkuvan ulospuhalluksen säätöventtiilillä. Varakattilan pinnanulospuhallusventtiili LV71 on GESTRA BAE 46 DN 25 toimilaitteellinen jatkuvan ulospuhalluksen säätöventtiili (kuva 21).

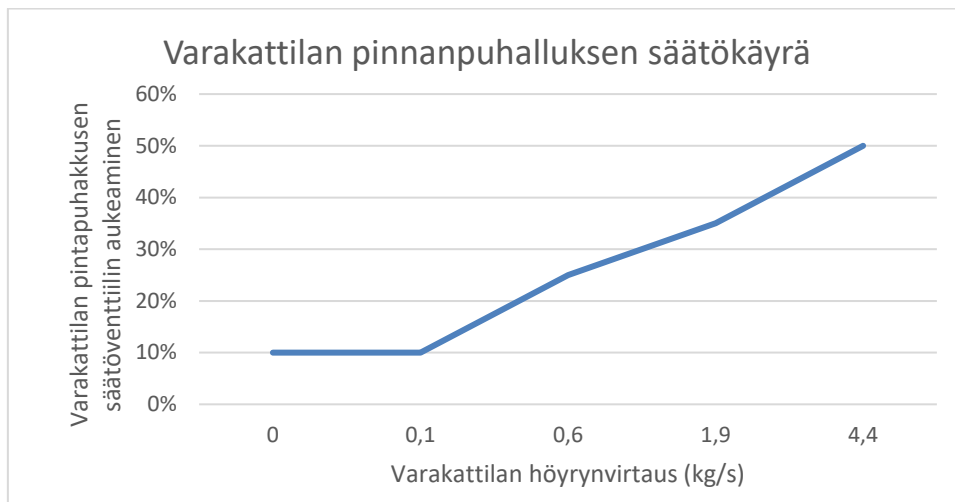


KUVA 21. GESTRA BAE 46 -Jatkuvan ulospuhalluksen säätöventtiili (20)

Liitteestä 3 nähdään, että GESTRA BAE 46 säätöventtiilin virtausdiagrammissa avautumiskynnyksen (0 % - 8 %) jälkeen virtaus kasvaa lineaarisesti venttiilin avautumisen suhteessa. Virtausdiagrammissa A-sarake tarkoittaa poistettavan kattilanveden määrää kilogrammoina tunnissa. B-sarake tarkoittaa säätöventtiilin avautumisastetta. Salmiakkiruudun sisällä olevat numerot tarkoittavat käsisäätöisen venttiilin avautumisasentoa. Toimilaite- ja käsisäätöisissä säätöventtiileissä on venttiilin runko täysin sama. C-sarake tarkoittaa säätöventtiilin vaikuttavaa paine-eroa. Säätöventtiilin vaikuttava paine-ero on varakattilan ja jatkuvaulospuhallussäiliön välinen paine-ero. Jatkuvaulospuhallussäiliön paine voidaan tässä tilanteessa olettaa ilmanpaineeksi, koska ulospuhallussäiliö purkaa hönkähöyryn suoraan ulkoilmaan.

Varakattilan kulutuksettomassa tilassa säätöventtiilin avautumisaste on 25 %, joten virtausdiagrammista saadaan pinnanpuhalluksen määrät. 10 bar:n paine-erolla pinnanpuhalluksen määrä on 125 kg/h ja 6 bar:n paine-erolla 100 kg/h. Säätöventtiilin vaikuttava paine-ero vaihtelee prosessin mukana, joten sen määrittäminen on hyvin vaikeaa. Pinnanpuhalluksen määrät otettiin tämän takia 10 ja 6 bar:n paine-eroille.

Pinnanulospuhalluksen säätökäyrää muutettiin pienten höyrynkulutusmäärien osalta pienemmäksi. Säätökäyrä laitettiin aukaisemaan säätöventtiiliä jo 0,1 kg/s jälkeen, jotta höyryntuotannon alkaessa pinnanulospuhallus tehostuu välittömästi. Säätöventtiilin minimi avautumisarvoksi asetettiin 10 %. (Kuva 22.)



KUVA 22. Varakattilan muutettu pintapuhallusventtiilin säätökäyrä

Muutetun säätökäyrän mukaan säätöventtiilin 10 % avautumisasteen pinnanulospuhalluksen määrä on virtausdiagrammista luettuna 55 kg/h 10 bar:n paine-erolla ja 6 bar:n paine-erolla 45 kg/h. Näin ollen ilman varakattilan höyrynkulutusta pinnanulospuhalluksen määrä väheni alle puoleen alkuperäisestä säätökäyrästä.

Varakattilan energiankulutusta seurattiin kolmen viikon koejaksoilla 6.2.2020–27.2.2020. Kolmen viikon aikana varakattila oli tuottanut höyryä verkostoon 22,6 MWh. Varakattilan hetkellisiä tehoja ei ole saatavissa, mutta oletettaessa keskitehoksi 1 MW, olisi varakattilan höyryntuotanto kestänyt kolmen viikon aikana noin yhden vuorokauden. Kolmen viikon koejakson aikana varakattila on ollut tuottamatta höyryä 20 vuorokautta eli 480 tuntia. Varakattilan tuottamattoman ajan energiansäästö saatiin laskettua pinnanulospuhalluksen määrän muutoksesta. Kattilaveden lämpötilaa ei tiedetä, mutta oletuksena käytetään kylläisen veden ominaisentalpiaa, koska korjaamalla lataushöyryntoiminnon pitäisi varakattilaveden pysyä lähellä kylläisestä pistettä. Kylläisen veden ominaisentalpiasta pitää vielä vähentää raakaveden ominaisentalpia (17, s. 720). Ulospuhalluksessa vesi johdetaan viemäriin, mikä pitää korvata uudella puhtaalla kattilavedellä. (Taulukko 4.)

TAULUKKO 4. Varakattilan pinnanulospuhalluksen muutoksen energiansäästö

Säätöventtiilin vaikuttava paine-ero (bar)	Pinnanulospuhalluksen määrä säätöventtiili 25% (kg/h)	Pinnanulospuhalluksen määrä säätöventtiili 10% (kg/h)	Ulospuhalluksen määrän muutos (kg/h)	Kylläisen veden ominaisentalpia (kJ/kg)	Raakaveden ominaisentalpia 6 °C (kJ/kg)	Energian säästö (MWh)
10	125	55	70	779,22	25,2	7,04
6	100	45	55	697,22	25,2	4,93

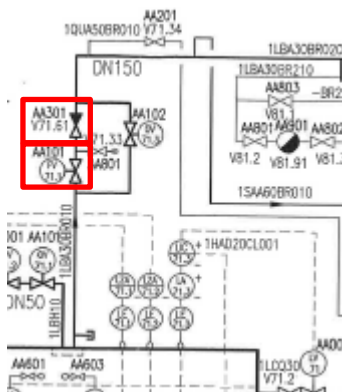
Raakaveden kulutuksen väheneminen kattilaveden valmistuksessa sekä ulospuhallussäiliön jäädytyksessä tuo myös säästöjä. Pinnan ulospuhalluksen säädön takia kattilavesien laatua täytyy erityisesti tarkkailla, jotta nähdään säädön mahdolliset vaikutukset kattilavesien laatuun.

6.3 Varakattilan venttiilien säädöt

Varakattilan säätöventtiilien automaatiota muutetaan toimimaan biokattilan kannalta energiatehokkaammin. Säädöillä pyritään tasaamaan biokattilan kuormitusta ja optimoimaan varakattilan potentiaalia paineakkuna.

6.3.1 Varakattilan päänhöyryventtiili ja päänhöyryventtiilin ohitusventtiili

Varakattilan päänhöyryventtiili FV71.1 on automaattiasennossa aina auki, koska takaiskuventtiili V71.61 estää virtauksen höyryverkostosta varakattilaan (kuva 23). Muuten päänhöyryventtiiliä pystyy säätämään käsikäytöllä halutusti auki ja kiinni tarpeen mukaan.



KUVA 23. Varakattilan päänhöyryventtiilin kytkentä päähöyrylinjassa

Varakattilan pöähöyryventtiilin ohitusventtiili OV71.3 on tehty höyrylinjaston lämmitystä ja varakattilan ylösajotilanteita varten, jotta kattila saadaan helpommin kytkettyä paineenalaiseen höyryverkostoon. Ohitusventtiili ohittaa sekä pöähöyryventtiilin että takaiskuventtiilin. Ohitusventtiiliä käytetään vain ylösajotilanteissa verkoston lämmitykseen ja paineen tasaukseen, mutta muuten ohitusventtiili täytyy olla kiinni. Mikäli venttiili on normaaliajossa auki, kattila pysyy koko ajan höyryverkoston paineessa, eikä lataushöyryn virtauksen tarvitsemaa paine-eroa synny varakattilan ja höyryverkoston välille.

6.3.2 Lataushöyryn säätöventtiili

Lataushöyryn säätöventtiili V7.80 säädetään toimimaan biohöyrykattilan paineen mukaan. Lataus säädetään alkavaksi silloin, kuin biohöyrykattilan paine nousee siihen pisteeseen (n. 9 bar), jolloin automaatio alkaa rajoittamaan biohöyrykattilan tehoa. Silloin biohöyrykattila on jo saanut nostettua paineen ja lämpötilan ylös höyryverkostossa ja olisi ylimääräistä tehoa, joka pystytään ajamaan varakattilaan. Tällä olisi myös tarkoitus tasoittaa biohöyrykattilan käyttöä, koska kuorma on kyseisellä laitoksella erittäin epätasaista. Äkkinäisestä kuorman pudotuksesta biohöyrykattila ei ehdi säätämään tehoa alas, ennen kuin paine nousee pisteeseen, jossa kattilan starttiventtiilit aukeavat. Starttiventtiilien ulospuhalluksesta aiheutuu energiahäviöitä sekä kattilan hyötysuhde huonontuu. Latauslinjalla on tarkoitus hidastaa biokattilan paineen nousua ajamalla ylimääräinen teho latauslinjaa pitkin varakattilaan. Lataus varakattilaan loppuu silloin, kun paine-eroa höyryverkoston kanssa ei ole, tai höyryverkoston paine lähtee kuorman muutoksesta laskemaan.

Lataushöyryn säätöventtiilin sulkeutuminen seuraa myös biohöyrykattilan painetta, eli lataushöyryventtiili menee kiinni, kun paine laskee pisteeseen, missä venttiili aukeakin (n. 9 bar). Jos varakattila on kerennyt latautua täyteen, alkaa höyryn purkaus välittömästi, kun höyryverkoston paine laskee. Muuten purkaus alkaa silloin, kun varakattilassa oleva vesi saavuttaa paineen laskiessa kylläisen pisteensä.

Ongelma tässä on se, että kun varakattilan paine laskee höyryverkoston mukana alas, mutta biohöyrykattilan teho ei riitä nostamaan painetta takaisin ylös ja paine jää seilaamaan alle latauspaineen (n. 9 bar). Tällöin biohöyrykattila ei lataa ollenkaan varakattilaa, ja kattilasta ulospuhallus jatkuu koko ajan, joka laskee kattilan painetta. Näin ollen varakattilan poltin käy ”turhaan” ulospuhalluksesta johtuvan painehäviön takia.

Mikäli laitoksen automaatio ohjelmallisesti mahdollistaa, lataushöyryn säätöventtiili seuraisi myös varakattilan painetta, ja jos paine laskee alle määrätyn paineen (n. 6 bar), venttiili aukeaisi nostaten varakattilan painetta. Venttiili pitäisi varakattilan paineen yli polttimen käynnistysarvon (5,9 bar). Lataushöyryn säätöventtiili menisi kiinni, kun varakattilan paine on noussut riittävän ylös (n. 6,5 bar), ja varsinainen lataus alkaisi vasta latauskynnyksellä. Mikäli höyryverkoston paine on niin alhainen, että se ei pysty nostamaan varakattilan painetta polttimen käynnistysarvon yli, poltin käynnistyy biohöyrykattilan avuksi.

Toinen vaihtoehto olisi säätää lataushöyryn säätöventtiilin minimiarvo niin, että se riittäisi pitämään varakattilan paineen yli polttimen käynnistysarvon. Venttiili säädetään niin pienelle, että varsinainen lataaminen alkaisi vasta, kun höyryverkostonpaine nousee yli latauskynnyksen. Tällä tavoin latausta ei tapahdu, kun höyryverkoston ja varakattilan paine laskee. Varakattilan lataus alkaa silloin, kun höyryverkoston paine alkaa nousemaan ja paine-ero varakattilan kanssa kasvaa riittävän isoksi. Lisäksi vaikka lataushöyryn säätöventtiilin kautta minimiasennossa latausta tapahtuisikin, sen saa hyödyksi seuraavan kerran höyryverkoston paineen laskun yhteydessä. Jos höyryverkoston paineen nousu kestää pitkään, varakattila ei pystyisi ottamaan energiaa latauskynnyksen jälkeen vastaan. Varakattilan vesi on jo lämmennyt tasaisesti koko ajan, kun höyryverkostossa paine on hitaasti noussut. Mikäli höyryverkoston paine hitaasti nousisikin lämmittäen varakattilaa, biohöyrykattilan tehon säätö kerkeäisi paremmin mukaan hitaan paineen nousun takia eikä biohöyrykattilan paine nousisi starttiventtiileille.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoite oli selvittää varakattilan paineakkutoiminnon ongelmat ja optimoida paineakkutoiminnon avulla biokattilan käyttöä. Työn tuloksena saatiin selvitettyä tarvittavat toimenpiteet, jolla saadaan varakattilan paineakkutoiminto toimimaan. Laskennallisesti varakattilalla on merkittävä potentiaali paineakkuna tasoittamaan biokattilan kuormituksen vaihteluita. Tehtaan höyrynkulutuksen vaihtelut ovat nopeasti muuttuvia ja ennalta arvaamattomia, joten paineakun purkauksen ja latauksen ajat ja tehot on laskettu parhaaseen mahdolliseen arvioon.

Varakattilan energian varastointipotentiaalista voitaisiin saada vielä tarkempi, koska tässä työssä ei ole otettu huomioon kattilan rakenteitten vaikutusta varastointikykyyn. Varakattilan rakenteet sitovat myös lämpöenergiaa itseensä, mikä paineen laskun aiheuttaman lämpötilan laskun myötä siirtyy kattilaveteen. Varakattilan rakenteet jätettiin huomioitta, koska ulkoisista rakenteista aiheutuu lämpöhäviötä myös ympäristöön. Sisäisiä rakenteita jäähdyttää myös piipun vedon aiheuttama ilmavirtaus, jota savukaasupelti kyllä vähentää, muttei varmasti kokonaan poista ilmavirtausta.

Varakattilan latausautomaation säädöt pystytään hienosäätämään vielä toimimaan paremmin biohöyrykattilan kannalta, kunhan lataustoiminto saadaan ensiksi toimimaan. Oikeiden säätöjen hakeminen on pitkälti käytännön kokeilemista ja testausta, joten opinnäytetyössä suunniteltuja säätöarvoja voidaan käyttää alkuarvoina hienosäätämiseksi.

LÄHTEET

1. Suomen teollisuuden energiapalvelut – STEP Oy 2020. Saatavissa: <https://www.stepenergy.veolia.fi/step-yritystiedot/step>. Hakupäivä 3.3.2020.
2. Yritysesittely. 2019. Suomen teollisuuden energiapalvelut – STEP Oy.
3. Findest Protein Kaustinen. 2020. Step energy. Saatavissa: <https://www.stepenergy.veolia.fi/palvelutarjonta/palvelutarjonta/stepin-kumppanuudet/findest-protein-kaustinen>. Hakupäivä 23.3.2020.
4. Harjavallan suurteollisuuspuisto. 2020. Step energy. Saatavissa: <https://www.stepenergy.veolia.fi/palvelutarjonta/palvelutarjonta/stepin-kumppanuudet/harjavallan-suurteollisuuspuisto>. Hakupäivä 20.3.2020
5. Altia Koskenkorva. 2020. Step energy. Saatavissa: <https://www.stepenergy.veolia.fi/palvelutarjonta/palvelutarjonta/stepin-kumppanuudet/altia-koskenkorva>. Hakupäivä 23.3.2020.
6. Hankkija Seinäjoki. 2020. Step energy. Saatavissa: <https://www.stepenergy.veolia.fi/palvelutarjonta/palvelutarjonta/stepin-kumppanuudet/hankkija-seinajoki>. Hakupäivä 23.3.2020.
7. Tämä on Veolia. 2020. Veolia. Saatavissa: <https://www.veolia.fi/tietoa-meista>. Hakupäivä 20.3.2020.
8. Energian kokonaiskulutus. 2019. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_kokonaiskulutus. Hakupäivä 20.3.2020.
9. Porin energian historia. Porin energia. Saatavissa: <https://www.porienergia.fi/yritys/Historiaa#.Xo2jZ8gzblU>. Hakupäivä 8.4.2020.
10. Tietoa yrityksestä. Porin energia. Saatavissa: <https://www.porienergia.fi/yritys#.Xo2iycgzblU>. Hakupäivä 8.4.2020.

11. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. Helsinki: Oy Edita Ab.
12. Industrial Boiler Types. FeedWater. Saatavissa: <https://feedwater.co.uk/industrial-boiler-types/>. Hakupäivä 3.3.2020.
13. The Boiler Houses. 2020. SpiraxSarco. Saatavissa: <https://www.spirax-sarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/shell-boilers>. Hakupäivä 3.3.2020.
14. Boilet stack economizer. 2010. Energir. Saatavissa: https://www.energir.com/~media/Files/Affaires/Appareils_fichestechniques/En/economiseur_cheminee_ang.pdf?la=en. Hakupäivä 19.3.2020.
15. Valmet CFB boilers. 2020. Valmet. Saatavissa: <https://www.valmet.com/energyproduction/cfb-boilers/>. Hakupäivä 14.3.2020.
16. Subcritical Radiant Boilers. Babcock & Wilcox. Saatavissa: <https://www.babcock.com/products/radiant-boiler>. Hakupäivä 19.3.2020.
17. Moran, Michael J. – Shapiro, Howard N. – Boettner, Daisy D. – Bailey, Margaret B. 2015. Principles of Engineering Thermodynamics. 8th edition. John Wiley & Sons Singapore.
18. Thermostatic steam traps BK 45/46. 2018. GESTRA. Saatavissa: <https://www.gestra.com/products/valves/a1-steam-traps/thermostatic-steam-traps-bk/bk-45-46.html>. Hakupäivä 19.3.2020.
19. Lauhteenpoistimet BK45 BK45-U BK 45-LT BK 46. Käyttöohje. GESTRA. Saatavissa: <https://www.gestra.com/documents/brochures.html>. Hakupäivä 19.3.2020.
20. Reaktomat BAE continuous blowdown valves. 2018. GESTRA. Saatavissa: <https://www.gestra.com/products/industrial-electronics/steam-boiler-equipment/on-land-boilers/spectormodul/top-blowdown.html>. Hakupäivä 24.3.2020

21. Jatkuvan ulospuhalluksen säätöventtiili BA46 BA47 BAE46 BAE47. Käyttö-
ohje. GESTRA. Saatavissa: https://www.gestra.com/documents/brochures.html?go=true&einb=&einc=*BAE4&eind=*en*. Hakupäivä 24.3.2020.

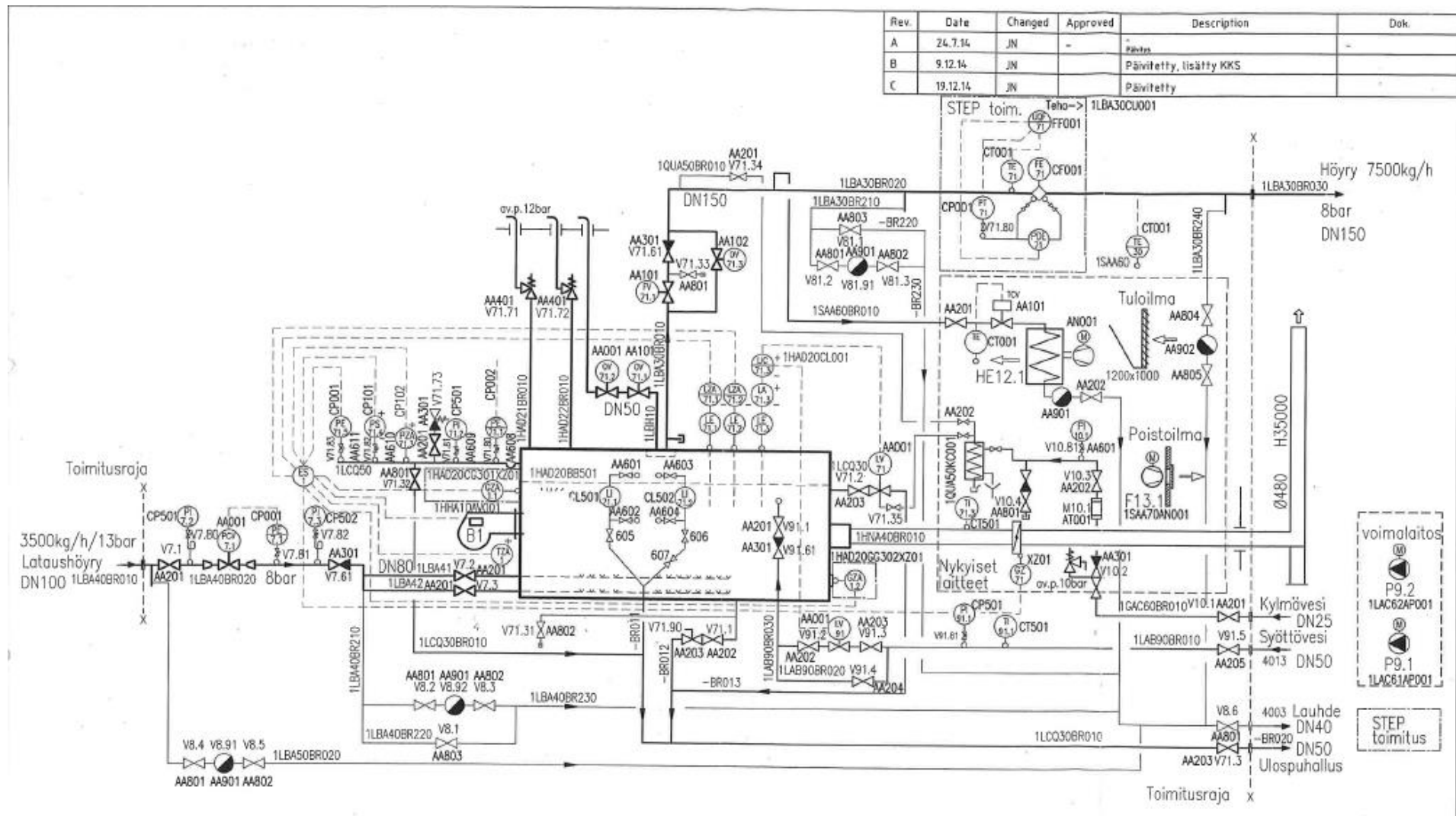
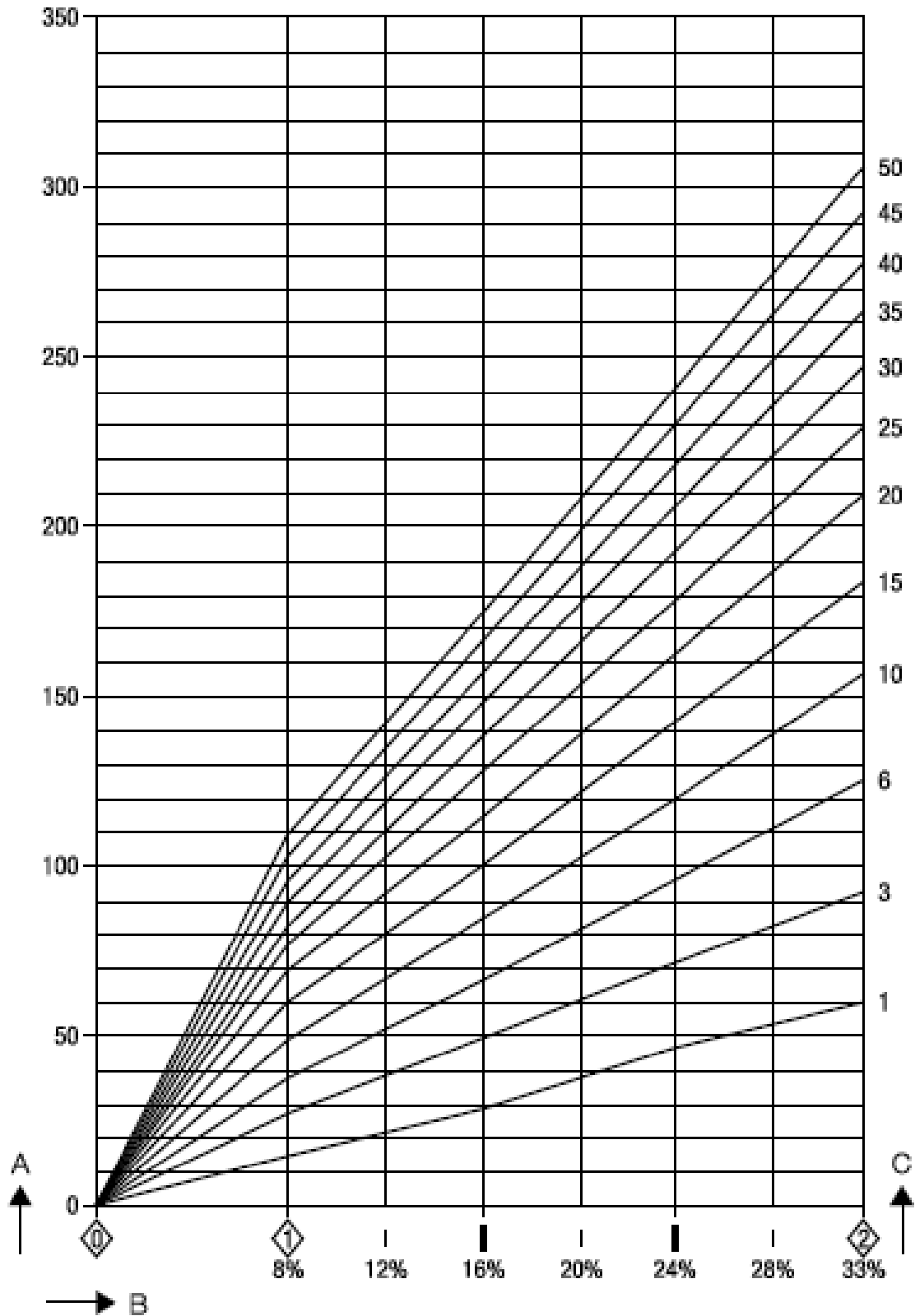


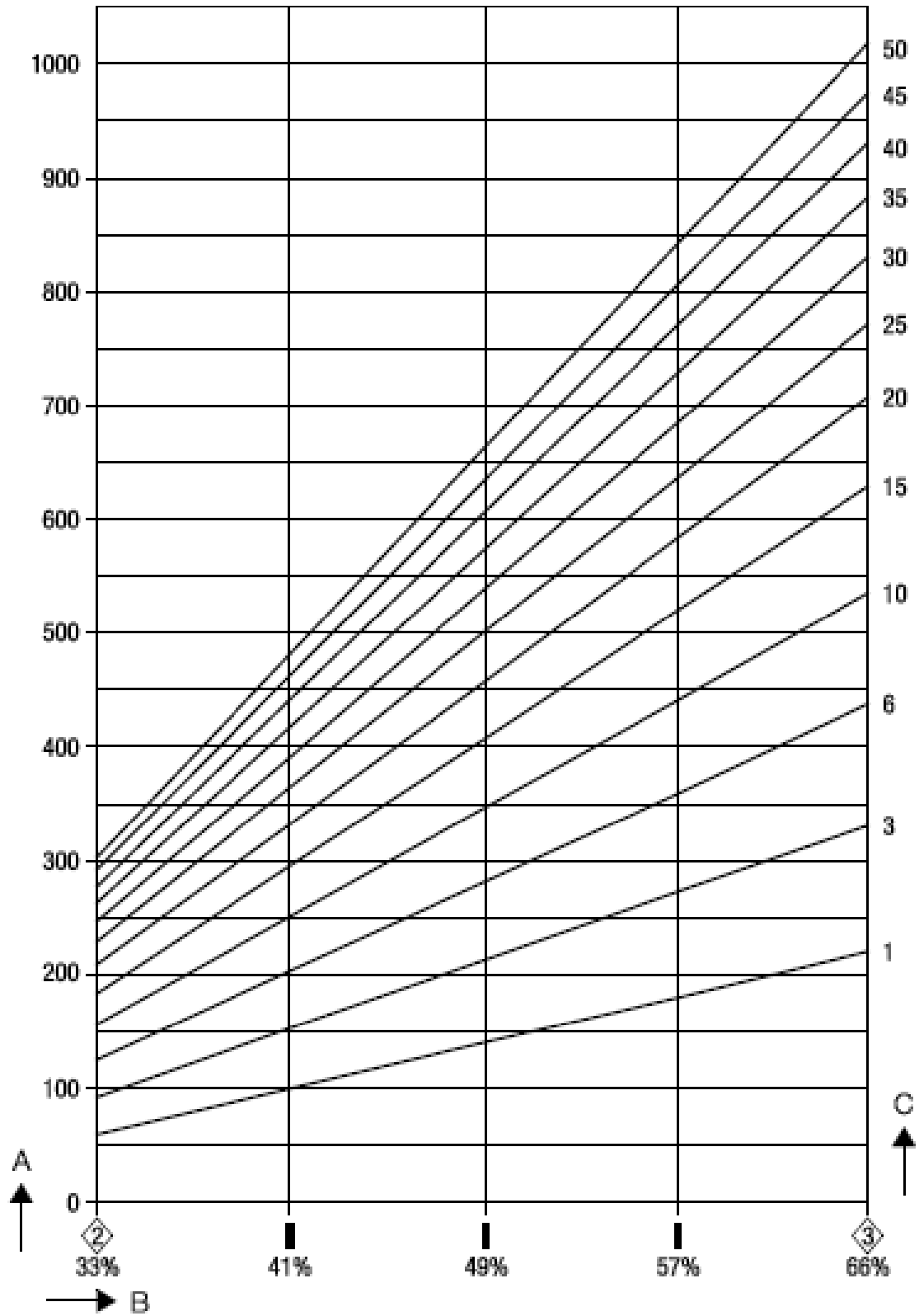
TABLE A-3 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Pressure Table

H ₂ O	Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Press. bar
			Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f	Sat. Vapor s _g	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04	
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06	
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08	
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10	
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20	
0.30	69.10	1.0223	5.229	289.20	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	7.7686	0.30	
0.40	75.87	1.0265	3.993	317.53	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	7.6700	0.40	
0.50	81.33	1.0300	3.240	340.44	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	7.5939	0.50	
0.60	85.94	1.0331	2.732	359.79	2489.6	359.86	2293.6	2653.5	1.1453	7.5320	0.60	
0.70	89.95	1.0360	2.365	376.63	2494.5	376.70	2283.3	2660.0	1.1919	7.4797	0.70	
0.80	93.50	1.0380	2.087	391.58	2498.8	391.66	2274.1	2665.8	1.2329	7.4346	0.80	
0.90	96.71	1.0410	1.869	405.06	2502.6	405.15	2265.7	2670.9	1.2695	7.3949	0.90	
1.00	99.63	1.0432	1.694	417.36	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	7.3594	1.00	
1.50	111.4	1.0528	1.159	466.94	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	7.2233	1.50	
2.00	120.2	1.0605	0.8857	504.49	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	7.1271	2.00	
2.50	127.4	1.0672	0.7187	535.10	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	7.0527	2.50	
3.00	133.6	1.0732	0.6058	561.15	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	6.9919	3.00	
3.50	138.9	1.0786	0.5243	583.95	2546.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	6.9405	3.50	
4.00	143.6	1.0836	0.4625	604.31	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	6.8959	4.00	
4.50	147.9	1.0882	0.4140	622.25	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	6.8565	4.50	
5.00	151.9	1.0926	0.3749	639.68	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	6.8212	5.00	
6.00	158.9	1.1006	0.3157	669.90	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	6.7600	6.00	
7.00	165.0	1.1080	0.2729	696.44	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	6.7080	7.00	
8.00	170.4	1.1148	0.2404	720.22	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	6.6628	8.00	
9.00	175.4	1.1212	0.2150	741.83	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	6.6226	9.00	
10.0	179.9	1.1273	0.1944	761.68	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863	10.0	
15.0	198.3	1.1539	0.1318	843.16	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448	15.0	
20.0	212.4	1.1767	0.09963	906.44	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	6.3409	20.0	
25.0	224.0	1.1973	0.07998	959.11	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	6.2575	25.0	
30.0	233.9	1.2165	0.06668	1004.8	2604.1	1008.4	1795.7	2804.2	2.6457	6.1869	30.0	
35.0	242.6	1.2347	0.05707	1045.4	2603.7	1049.8	1753.7	2803.4	2.7253	6.1253	35.0	
40.0	250.4	1.2522	0.04978	1082.3	2602.3	1087.3	1714.1	2801.4	2.7964	6.0701	40.0	
45.0	257.5	1.2692	0.04406	1116.2	2600.1	1121.9	1676.4	2798.3	2.8610	6.0199	45.0	
50.0	264.0	1.2859	0.03944	1147.8	2597.1	1154.2	1640.1	2794.3	2.9202	5.9734	50.0	
60.0	275.6	1.3187	0.03244	1205.4	2589.7	1213.4	1571.0	2784.3	3.0267	5.8892	60.0	

Virtausdiagrammi DN 15 - DN 32, tehoalue enint. 310 kg/h



Virtausdiagrammi DN 15 - DN 32, tehoalue enint. 1 020 kg/h



Virtausdiagrammi DN 15 - DN 32, tehoalue enint. 2 120 kg/h

