



Paksuusmittaukset höyrykattiloiden käyttöiän ennustamisen apuna

Alexi Tullinen

Opinnäytetyö, AMK

Huhtikuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Tullinen, Aleksi

Paksuusmittaukset höyrykattiloiden käyttöiän ennustamisen apuna.

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2022, 29 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Teollisuudessa höyrykattilan ja siihen liittyvien laitteiden katkeamaton toiminta on välttämätöntä. Jos näin ei ole, saattaa yksittäinen komponentti rikkoutuessaan aiheuttaa jopa koko laitoksen alasajon. Niinpä laitteita huolletaan, kuntoa seurataan ja niiden käyttöikää pyritään ennustamaan esimerkiksi paksuusmittauksien avulla.

Toimeksiantajalla oli tavoitteena saada työkalu, joka huomioi nykyistä tarkemmin höyrykattilan komponenttien aiemmat paksuusmittaukset. Tehtäväksi muodostui työkalun kehittämisen ohella selvittää toimeksiantajan käyttämien höyrykattiloiden käyttöiän määrittämisen menetelmien ajantasaisuus, sekä mahdollisuus niiden kehittämiseksi. Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Replico Oy.

Tutkimusmenetelmäksi valikoitui kehitystutkimus, sillä se nimensä mukaisesti sopii kehitystyöhön. Teoriaosuudessa paneuduttiin höyrykattiloiden materiaaleihin, ja näiden vaurioitumismekanismeihin. Käyttöiän määrittämisen menetelmien tutkimus oli sekoitus teoriaa ja käytäntöä, kun etsittiin sopivaa menetelmää työkalun laskennan perustaksi. Tutkimuksessa keskityttiin pelkästään teollisen mittakaavan höyrykattiloihin. Aineisto työkalun kehittämiseen koostui toimeksiantajan haastatteluista, sekä olemassa olevasta paksuusmittaus datasta.

Tuloksena syntyi työkalu, joka muodostaa jäljellä olevan käyttöiän ennustemallin lineaarisen regressioanalyysin perusteella. Työkalu vastasi pääpiirteittäin sille asetettuihin tavoitteisiin, ja toimeksiantaja voi hyödyntää sitä höyrykattiloille. Työkalulle tunnistettiin myös jatkokehitystarpeita. Toimeksiantajan käyttämät menetelmät todettiin ajantasaisiksi, joskin kehitysehdotuksia annettiin.

Avainsanat (asiasanat)

Paksuusmittaus, höyrykattila, käyttöikä, ennustaminen, regressioanalyysi

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Tullinen, Aleks

Remaining service life assessment of steam boilers based on thickness measurements

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2022, 29 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The continuous operation of steam boilers and their components is critical to the industry that uses them. If this isn't the case, and some component breaks, it might cause damages and shut down the operation of the steam boiler. Because of this, the components and materials are maintained, and their overall condition is monitored. Part of this maintenance is forming assessments of the remaining service life of the steam boiler.

The commissioner of this thesis is Replico Oy. Their goal was to develop a tool for calculating remaining service life assessments of steam boilers. The tool forms the remaining life assessments from thickness measurements, which are collected from various parts of the steam boiler. Another goal was to ascertain the thesis commissioner that the methods they use are still up to date, and to see if their methods can be developed further.

The chosen research method for this thesis was development research. This method is especially suitable for the development of new things. The theory part of this thesis includes both theory and practice. Suitable methods of calculating the assessments were researched from literature and scientific articles from the industry. The study was conducted on steam boilers of industrial size. The thickness measurement data used in the development of the tool was obtained from the commissioner.

The result of this thesis was a tool which calculates the remaining life assessments of steam boilers. The assessment is formed by giving the tool thickness measurement data. The tool then uses linear regression analysis to form the assessment. The developed tool was noted to be working as intended, with the exception of calculating multiple assessments simultaneously.

Keywords/tags (subjects)

Thickness measurement, steam boiler, service life, assessment, regression analysis

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	3
2	Tutkimusasetelma	4
2.1	Tutkimustavoite	4
2.2	Tutkimuksen rajaus	4
2.3	Aineiston hankinta	5
2.4	Tutkimusmenetelmät.....	5
3	Höyrykattiloiden toimintaperiaate ja höyrykattilatyyppejä	6
3.1	Höyrykattiloiden toimintaperiaate	6
3.2	Leijupetikattila.....	7
3.3	Kiertopetikattila	8
3.4	Soodakattila.....	10
4	Kattiloiden materiaalit.....	11
4.1	Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräkset.....	11
4.2	Seostetut teräkset.....	12
5	Vaurioitumismekanismit.....	12
5.1	Korroosio	12
5.2	Erosio.....	14
5.3	Viruminen.....	14
5.4	Väsyminen.....	15
6	Käyttöiän määrittämisen menetelmiä	16
6.1	API 579/ASME FFS-1.....	16
6.2	Lineaarinen regressio	18
7	Laskimen kehittäminen.....	19
7.1	Aineiston käsittely	19
7.2	Työkalun ohjelmointi.....	19
7.3	Laskimen toiminta ja perusteet	20
7.3.1	Lineaarinen	20
7.3.2	Eksponentiaalinen	21
7.3.3	Logaritminen.....	22
7.3.4	Potenssifunktio	22
7.3.5	Toisen asteen polynomifunktio	23

8 Tulokset	24
9 Pohdinta	25
Lähteet	27
Liitteet	29
Liite 1. Kuva työkalusta	29

Kuviot

Kuvio 1 Kattilan vesi-höyrypiiri. (Drum Boilers Overview n.d., muokattu).....	7
Kuvio 2 Leijupetikattilan layout-kuva (Bubbling fluidized bed boilers n.d.).....	8
Kuvio 3 Kiertopetikattilan layout-kuva (Advancing CFB technology n.d., 8)	9
Kuvio 4 Valmetin valmistaman soodakattilan layout-kuva (XXL size recovery boilers n.d.)	10
Kuvio 5. Deformaatiokartta (Lindroos, ym. 1986, 805)	15
Kuvio 6 Neliösumman muodostaminen (Nummenmaa 2021, 441)	18

1 Johdanto

Kaikilla materiaaleilla on oma käyttöikä, jonka ajan ne kestävät käytössä, ja näin on myös höyrykattilaympäristössä. Höyrykattilaympäristössä on tarpeellista määrittää tarkkaan kattilan ja sen komponenttien käyttöikä erityisesti turvallisuus näkökohtien ja investointien suuruuden vuoksi. Tämä huomioidaan teollisuudessa suunnittelussa, jossa komponenteille lasketaan suunniteltu teoreettinen käyttöikä. Teoreettisen käyttöiän saavutettaessa komponenttia tai osaa täytyy alkaa seuramaan, tai se tulee vaihtaa uuteen.

Komponenttien vaihtaminen on kallista ja siihen täytyy varautua usein vuosia etukäteen. Varautumista komponenttien vaihtamiseen hankaloittaa se, että komponentit kuluvat usein eri tahtia riippuen sijainnista ja toimintatarkoituksesta. Hyvästä suunnittelusta huolimatta kaikki komponentit eivät tule kestäämään suunniteltua käyttöikänsä ja toisaalta jotkin komponentit kestävät pidempään kuin niiden käyttöiän ennuste on. Aistinvarainen kunnonseuranta höyrykattilaympäristössä on mahdollista, mutta hankalaa, eikä välttämättä anna tarpeeksi tarkkaa tietoa. Onkin kehitetty kunnonseurantamenetelmiä ja -tapoja, jotta kaikkia komponentteja ei tarvitsisi vaihtaa uusiin niiden suunnitellun käyttöiän tullessa täyteen, vaan ainoastaan silloin kun se on komponentin kunnon vaatiessa tarpeellista. Kun kattilan komponenttien ja osien kuntoa seurataan, ja jäljellä olevaa käyttöikää lasketaan, saadaan kattava kuva kattilan nykytilasta, jonka pohjalta investointitarve ja budjetointi on helppo suunnitella. Myös ympäristöä ajatellen kunnonseurannalla on positiivinen vaikutus, kun turha materiaalien hukkaaminen vähenee.

Tällä hetkellä monet käytössä olevat käyttöiän ennustusmenetelmät muodostavat ennusteet joko yksittäiskohtaisesti komponentille tai yleisen ennusteen suuremmalle joukolle mittapisteitä ja komponentteja. Alan toimijoille tärkeää on lainsäädännöllisten tarkastuksien yhteydessä saatu tieto höyrykattilan kunnosta, ja sen käyttökelpoisuudesta. Käyttöiän ennustamisessa olisi kuitenkin hyvä ottaa huomioon myös laajasti aiemmat mittaustulokset, koska näin päästään tarkempaan ymmärrykseen kyseisen höyrykattilan toiminnasta pidemmältä ajanjaksolta.

Toimeksiantajan esittely

Toimeksiantajana toimii suomalainen Replico Oy, joka on perustettu vuonna 2014. Replico Oy tuottaa puolueettomia käyttöikä- ja asiantuntijapalveluita kaikille teollisuuden sektoreille. Palveluihin kuuluvat kattiloiden kunnonseuranta, käyttöikäselvitykset, QA-QC-palvelut, turbiinien tarkastaminen, sekä kattavat NDT- ja puhdistuspalvelut yhteistyöverkoston kautta. Replico Oy:llä on kolme pääsektoria: Metsäteollisuus, energiateollisuus, sekä öljy- ja kaasuteollisuus. (Replico Oy 2021.)

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tutkimustavoite

Toimeksiantajalle alan nykyiset yleiset menetit ovat toimineet tähän asti hyvin, mutta oman toimintansa kehittämiseksi ja laadun parantamiseksi he haluavat nyt toteuttaa laskurin, joka huomioi tietystä höyrykattilasta aiemmin kerätyn datan, ja hyödyntää tätä dataa jäljellä olevan käyttöiän määrittämisessä. Laskimen kehittämisen lisäksi tässä opinnäytetyössä on tutkittu alalla yleisesti käytössä olevia paksuusmittauksiin perustuvia menetelmiä, joilla ennustetaan höyrykattiloiden ja niiden komponenttien käyttöikää.

2.2 Tutkimuksen rajaus

Tutkimuksessa selvitetään, kuinka höyrykattiloiden jäljellä olevaa käyttöikää seurataan ja ennustetaan höyrykattiloiden kanssa toimijoiden parissa, sekä kehitetään toimeksiantajalle oma työkalu, jonka avulla voidaan ennustaa höyrykattilan jäljellä olevaa käyttöikää. Tässä opinnäytetyössä käsiteltävät höyrykattilat ovat teolliseen käyttöön suunniteltuja, eikä tämä opinnäytetyö käsittele pienemmän luokan höyrykattiloita.

Opinnäytetyössä tutkitut ennustusmenetelmät ovat rajattu sellaisiin, jotka kohdistuvat höyrykattiloille, vaikka muitakin metodeja voidaan höyrykattilalle soveltaa. Miltei kaikkia metallisiin materiaaleihin suunniteltuja kunnonseuranta- sekä ennustusmenetelmiä voidaan hyödyntää höyrykattiloille, riippumatta niiden alkuperäisestä käyttökohteesta. Erityisesti menetelmät, jotka on suunniteltu käytettäväksi painelaitteille toimivat myös hyvin höyrykattiloille.

Opinnäytetyön työkalu on rajattu ennustamaan jäljellä olevaa käyttöikää vain paksuusmittauksien pohjalta toimeksiantajan pyynnöstä. Rajaus laskimelle tehtiin siksi, että ennuste olisi mahdollista laskea mahdollisimman usealle kohteelle samanaikaisesti. Tarkemmat ennustusmenetelmät tarvitsevat muitakin mittauksia paksuusmittauksien lisäksi, esimerkiksi mitattavan materiaalin kovuusmittauksia.

2.3 Aineiston hankinta

Opinnäytetyötä varten aineistoa on kerätty alan kirjallisuudesta, tutkimuksista, standardista ja tilastollisista menetelmistä. Toimeksiantajan edustajien kanssa on käyty syventävää keskustelua alan sekä heillä käytössään olevista käyttöikä määrittämisen metodeista.

Laskimen rakentamista varten on hyödynnetty toimeksiantajan kumppaneiden suorittamia mittauksia kentällä. Kyseiset mittaukset sisältävät paksuusmittausdataa, tietoa materiaaleista sekä mitatun pisteen sijainnista höyrykattilaympäristössä. Näiden tietojen pohjalta toimeksiantajan asiantuntijat muodostavat asiakkaalle selkokiehisen raportin, joka antaa kuvan kattilan nykytilanteesta.

2.4 Tutkimusmenetelmät

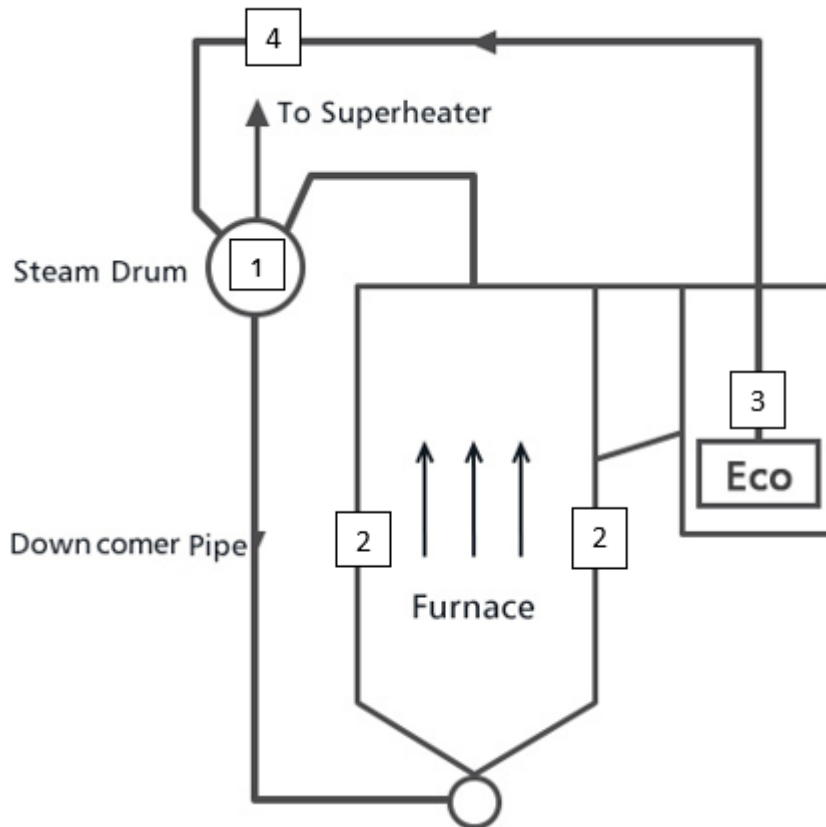
Opinnäytetyön tutkimusmenetelmäksi on valittu kehittämistutkimus, sillä se sopii kehitystyöhön ja on hyvä pohja liiketoiminnan kehittämiseksi (Ojasalo, Moilanen & Ritalahti 2015, 14). Tämän vuoksi se sopii työkalun kehittämiseen. Kehittämistutkimuksessa myös teoria ja käytäntö vuorottelevat ja tukevat toisiaan (Kananen 2012, 45). Kyseessä oli toimeksiantajan halu kehittää omaa toimintaa ja saada liiketoiminnallista hyötyä. Kehittämistutkimuksessa opittujen taitojen myötä kehittäjät pystyvät omatoimisesti havainnoimaan kehittämisen kohteen, luomaan käytäntöön hyvin soveltuvan ratkaisun ja toteuttamaan sen yhdessä muiden kanssa (Ojasalo ym. 2015, 14). Kehittämistutkimuksessa sovelletaan määrällisiä-, sekä laadullisia menetelmiä, eivätkä ne pois sulje toisiinsa.

3 Höyrykattiloiden toimintaperiaate ja höyrykattilatyyppiä

3.1 Höyrykattiloiden toimintaperiaate

Höyrykattila on painelaite, jonka avulla höyrystetään vettä höyryksi. Kattilan tulipesässä sekoitetaan eri polttoaineita ja palamisilmaa, jolloin polttoaine syttyy palamaan. Tällöin palamisreaktio vapauttaa polttoaineen sisältämän kemiallisen energian, joka muuttuu lämpöenergiaksi, ja höyrystää kattilan seinustoilla putkissa kiertävän veden. Palamisesta syntyneen lämmön vapautumisen seurauksena syntyneitä höyryä voidaan sitten hyödyntää työtä varten monessa eri tarkoituksessa, kuten mekaanisen liikkeen, sähkön, prosessihöyryn tuotannossa ja kaukolämpönä. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 7.)

Kattilan käyttötarkoituksen kannalta tärkein osa on sen vesi-höyrypiiri. Kattilaan syötetään vettä syöttövesisäiliöistä, josta se kiertää ekonomaisereille. Ekonomaisereilla vesi esilämmitetään, jonka jälkeen se kulkeutuu lieriölle. Sieltä vesi virtaa kattilan tulipesän vesiputkiseinille ja höyrystyy. Höyry kulkeutuu takaisin lieriöön, joka erottaa siitä vielä höyrystymättömän veden. Lieriöltä höyry jatkaa tulistimille, jossa sen lämpötilaa nostetaan edelleen. (Vakkilainen 2017, 74.) Tulistimien jälkeen höyry johdetaan turbiinille ja mahdollisille väliotoille. Käytön jälkeen lauhtunut vesi pumpataan takaisin syöttövesisäiliöön. (Mts. 71.)

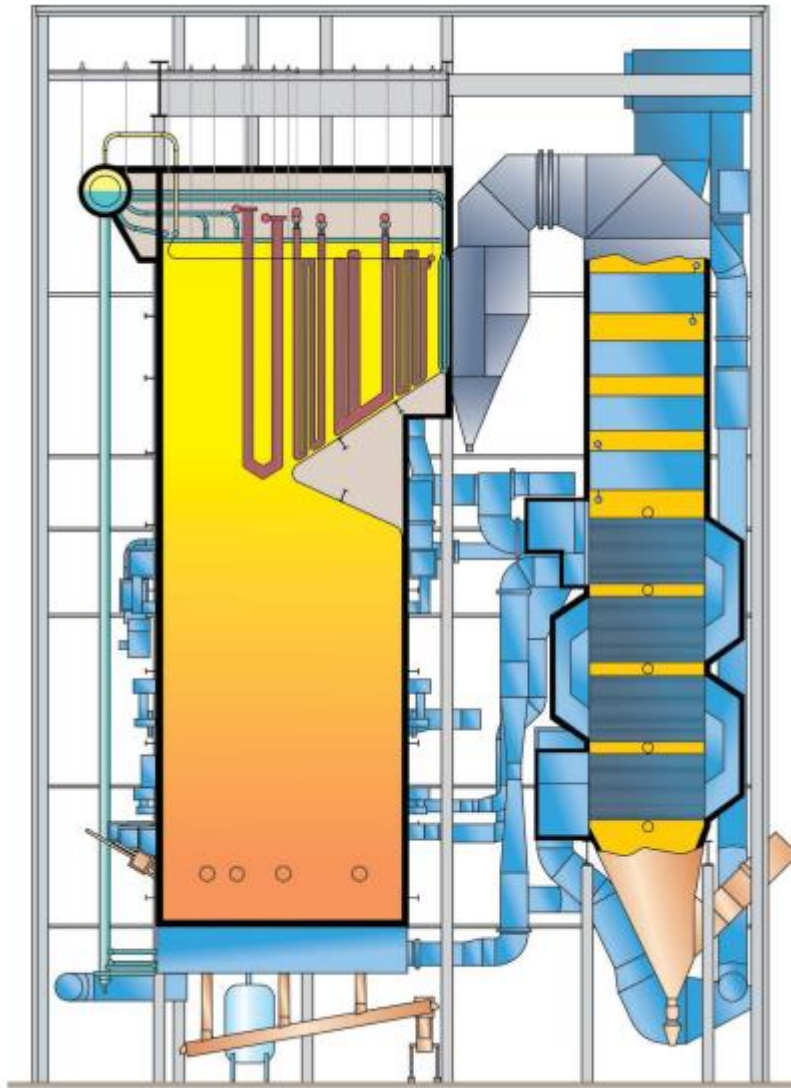


Kuvio 1 Kattilan vesi-höyrypiiri. (Drum Boilers Overview n.d., muokattu)

Kuviossa 1 on pelkistetty teollisen kaavan höyrykattilan vesi-höyrypiiri, jossa tärkeimmät osat ovat numeroitu: Osa 1 on lieriö, osa 2 on kattilan vesiputkiseinät, joissa vesi kiertää ja höyrystyy, osa 3 on ekonomaiseri ja osa 4 on tulistimet.

3.2 Leijupetikattila

Leijupetikattila tai BFB-kattila (Bubbling Fluidized Bed) on kattilatyyppejä, jossa kattilan tulipesässä on inertti hiekkakerros eli peti, jonka läpi puhalletaan ilmaa. Ilmavirran ollessa tarpeeksi nopea sen hiekkaan kohdistava voima on suurempi kuin maan painovoiman luoma vetovoima, jolloin pedin hiekka alkaa leijua. Ilma kulkeutuu hiekan läpi ilmakuplina ja peti alkaa kuplia, josta tulee englannin kielen nimitys bubbling fluidized bed. (Vakkilainen 2017, 217.) Polttoaine syötetään jauhattuna pedille kattilan reunoista. Pedillä ollessaan se kuivuu tehokkaasti hiekan varaaman lämmön ansiosta, ja näin ollen leijupetikattiloilla yleisiä polttoaineita ovat kosteat ja kiinteät polttoaineet. (Mts. 218.) Kuviossa 2 havainnollistetaan leijupetikattiloiden muotoa ja kokoa.



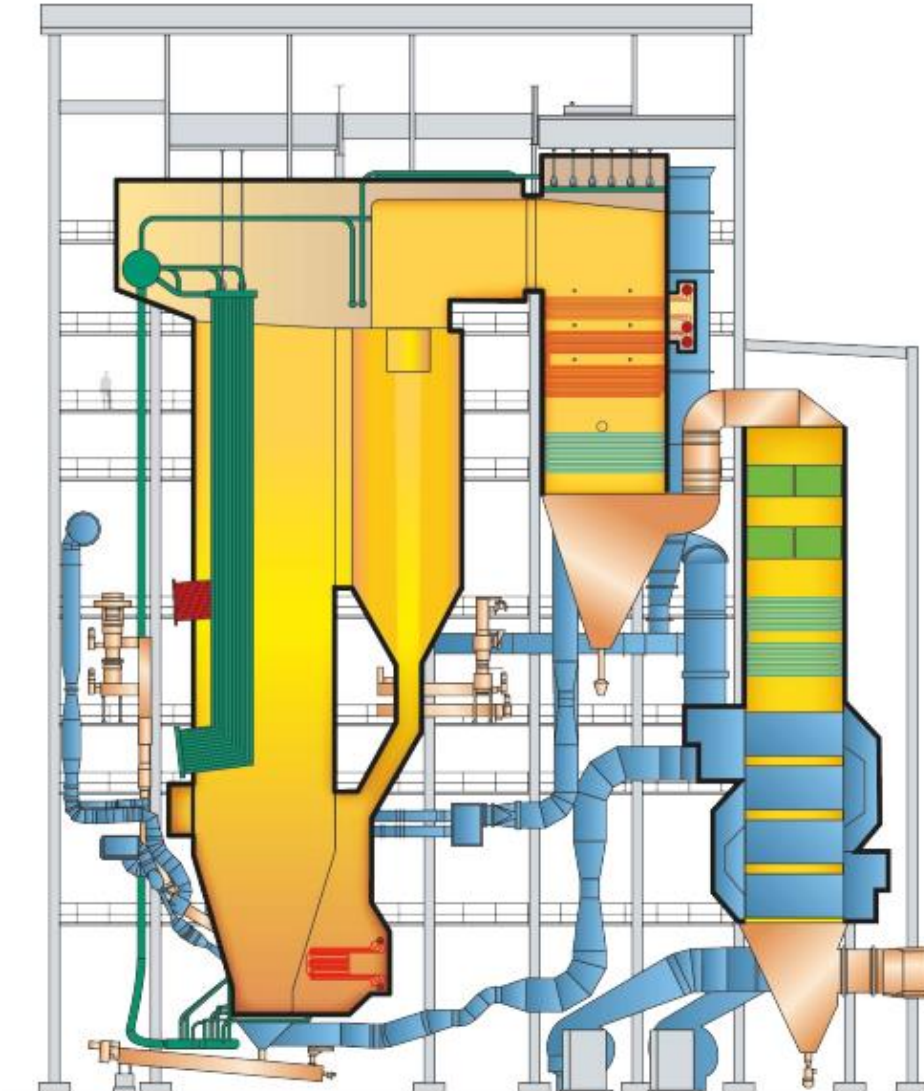
Kuvio 2 Leijupetikattilan layout-kuva (Bubbling fluidized bed boilers n.d.)

Leijupetikattiloita käytetään pääasiassa biopolttoaineita hyödyntävissä laitoksissa, joiden nimellinen lämpöenergian tuotto on alle 300MW. Leijupetikattiloissa on myös alhainen petilämpötila, jonka avulla saavutetaan alhaiset typpioksidi-päästöt. (Mts. 15.)

3.3 Kiertopetikattila

Kiertopetikattila tai CFB-kattila (Circulating Fluidized Bed) on kattilatyyppeä, jossa hiekan leijuttamisen sijaan hiekan läpi ajettavalla ilmavirralla nostetaan hiekka kiertoon palamisilman ja palokaasujen kanssa. Tästä syystä kiertopetikattiloiden hiekka on myös hienojakoisempaa kuin leijupetikattiloissa. Hiekka kulkeutuu kattilan läpi, ja se erotetaan palokaasuvirrasta syklonilla, jonka jälkeen se

palautetaan tulipesään. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 159.) Kuviossa 3 sykloni on kattilan seinässä kiinni, ja sen pohja johtaa takaisin tulipesään.

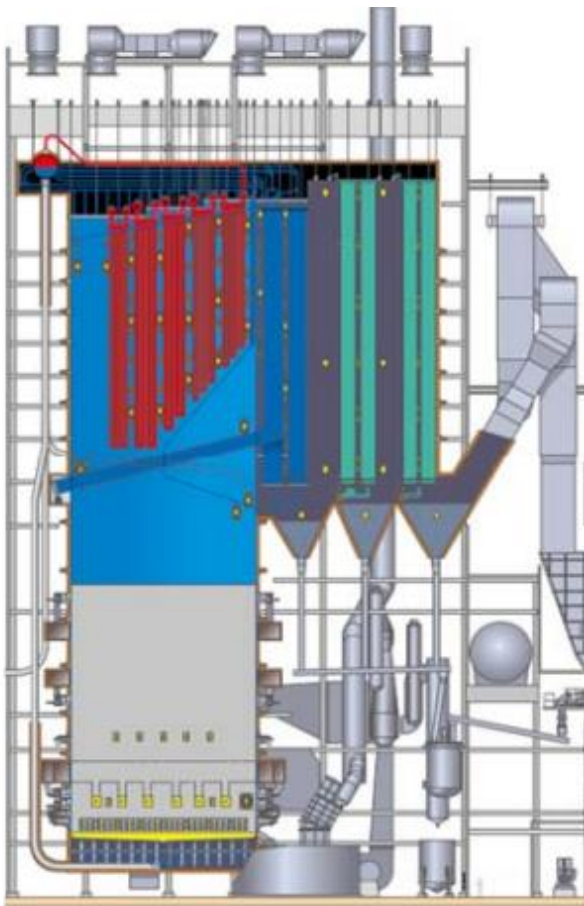


Kuvio 3 Kiertopetikattilan layout-kuva (Advancing CFB technology n.d., 8)

Kiertopetikattilaan polttoaine syötetään joko kattilan etuseinästä, tai tulipesään palaavan hiekan mukana. Kiertopetikattilan tulipesässä polttoaine kuivuu ja jauhautuu hiekan vaikutuksesta, joka mahdollistaa myös huonompilaatuisten, ja usean eri polttoaineen samanaikaisen käytön. Myös polttoaineet, jotka vaativat pidemmän ajan palaakseen käyvät kiertopetikattiloihin, koska palamattomat polttoainehiukkaset palautuvat hiekan kierron mukana takaisin tulipesään. (Vakkilainen 2017, 221.)

3.4 Soodakattila

Soodakattila on kattilatyyppejä, jota käytetään sulfaattisellutehtailla. Sulfaatti-menetelmällä sellua keitetessä puusta irtoava orgaaninen aine ja keittoon käytetyt epäorgaaniset kemikaalit muodostavat yhdessä mustalipeää, joka poltetaan soodakattilassa. Soodakattilan tarkoituksena on kerätä talteen orgaanisen aineksen sisältämä energia, ja regeneroida keittoon käytetyt kemikaalit uudelleenhyödynnettäviksi. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 163.) Mustalipeän takia soodakattiloiden materiaalien täytyy kestää hyvin korroosiota (Vakkilainen 2017, 255).



Kuvio 4 Valmetin valmistaman soodakattilan layout-kuva (XXL size recovery boilers n.d.)

Kuviossa 4 kuvataan soodakattilan layoutissa mustalipeän poltosta syntyvän kemikaalisulan talteenottoa varten tehdyt kourut. Niiden tehtävänä on kuljettaa palamisen jälkeen kemikaalisula kattilan tulipesästä pois regenerointia varten.

4 Kattiloiden materiaalit

Höyrykattilan sisällä vallitsee kattilatyypistä, polttoaineesta sekä kattilan kohdasta riippuen eri olosuhteet. Tästä johtuen kattiloiden materiaalien valinnat ovat riippuvaisia kahdesta asiasta: käyttölämpötilasta, ja sen luomista olosuhteista. Kattiloiden tulipesän vesiputkiseinät, ekonomaiserit ja mahdollisesti lieriöt rakennetaan yleensä seostamattomasta hiiliteräksestä tai niukkaseosteisista teräksistä, koska ne eivät altistu korkeimmille mahdollisille lämpötiloille. Kattilan muut osat kuten tulistimet tehdään taas seostetuista ruostumattomista teräksistä kuuma- ja korroosionkestävyytensä takia, jotta ne kestävät palokaasujen korkeat lämpötilat ja kaasujen korroosiota aiheuttavat komponentit. (Yang 2008, 4.)

Tässä opinnäytetyössä materiaalit ovat jaettu kahteen lukuun materiaalin seosteisuuden perusteella. Niitä kuitenkin nimitetään kiderakenteiden ja alkuainekoostumuksien mukaan. Tämän opinnäytetyön rajoissa ei ole mahdollista käsitellä kiderakenteita tai alkuainekoostumuksia tarkemmin.

4.1 Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräkset

Seostamattomaksi teräkseksi kutsutaan teräksiä, joihin ei ole tarkoituksella lisätty mitään seosainetta. Höyrykattilassa käytettäviin seostamattomiin teräsiin kuuluvat hiiliteräkset, joiden hiilipitoisuus vaihtelee välillä 0,05 % - 2,11 %. Hiiliteräksiä on niukka-, keski- sekä korkeahiilisiä. Kuitenkin niukkahiiliset teräkset (Hiiltä koostumuksessa 0,05 % - 0,25 %) ovat näistä kaikista käytetyimpiä. Hiiliteräksien kiderakenne on pääasiassa ferriittistä, mutta sisältävät myös hieman perliittistä kiderakennetta. (Lindroos, Sulonen, Veistinen 1986, 384.) Lindroos ja muut (1986, 754) kertovat, että hiiliteräkset ovat erittäin suosittuja hyvän hitsattavuutensa, muokattavuutensa sekä alhaisen hinnan takia. Kuitenkaan seostamattomina hiiliteräkset eivät kestä kuumuutta kovinkaan paljoa, ja niiden käyttölämpötila onkin korkeimmillaan hieman yli 400°C. (Lindroos ym. 1986, 754.)

Niukkaseosteisiksi teräksiksi kutsutaan teräksiä, joihin seostetaan jotain muuta ainetta teräksen omien ominaisuuksien parantamiseksi. Yleisimpiä seosaineita ovat kromi, nikkeli, molybdeeni, mangaani, pii sekä vanadium. (Lindroos ym. 1986, 413.) Niukkaseosteisten teräksien kiderakenne on yleensä ferriittiä sekä perliittiä niin kuin hiiliteräksilläkin. (Lindroos ym. 1986, 417.) Höyrykattiloissa käytetyt niukkaseosteiset teräkset ovat yleensä kromilla sekä molybdeenillä seostettuja,

koska ne kohottavat teräksen kuumuuden kestoja, jopa 550°C asti (Lindroos ym. 1986, 754). Yleisimmät käyttökohteet höyrykattilassa näille teräksille on tulistimet, sekä muut hiiliterästä korkeampia lämpötiloja vaativat käyttökohteet. Näistä teräksistä yleisin on 16Mo3. (Vakkilainen 2017, 175.)

4.2 Seostetut teräkset

Jos teräksen seostamista jatketaan edelleen, niin että seosaineiden rajat ylittävät niukkaseosteisten teräksien rajat, saadaan seostettuja teräksiä. Ruostumattomat teräkset ovat seostettuja teräksiä, joiden kromipitoisuus on vähintäänkin 10,5 %. (Tauluvuori, Kyröläinen & Manninen 2012, 6.) Yleisimmät seostetut teräkset, jotka ovat käytössä höyrykattiloilla ovat martensiittiset ruostumattomat teräkset, sekä austeniittiset ruostumattomat teräkset. Kummatkin näistä seostetuista teräksistä kestää paremmin korroosiota sekä korkeita lämpötiloja kuin seostamattomat tai niukkaseosteiset teräkset. Jotkut austeniittiset ruostumattomat teräkset kestävät hyvin jopa 720°C käyttölämpötiloja sekä korroosiota, jolloin ne soveltuvat hyvin tulistinmateriaaleiksi. (Vakkilainen 2017, 175.) Kuitenkin komponenttien valmistusta pelkäästään runsaasti seostetuista materiaaleista välttämään korkeiden kustannuksien, hankalan hitsauksen sekä huonomman muokattavuuden takia. Pelkän seostetun teräksen käytön sijaan esimerkiksi tulistimet voidaan valmistaa hiiliteräksestä, jotka päällystetään seostetulla teräksellä. (Lehtinen 2021.)

5 Vaurioitumismekanismit

5.1 Korroosio

Korroosiokäsikirjan mukaan (2008, 17–18) korroosio on yleisnimitys eri ilmiöille, jotka tapahtuvat, kun jokin metalli joutuu kosketuksiin erilaisten kaasujen ja nesteiden kanssa. Korroosioilmiöt pyrkivät hajottamaan metallia, ja viemään sitä kohti matalaenergisempää tilaa. Nykypäivän teollisuudessa korroosion estämisen merkitys on korostunut tekniikan edistämisen myötä. (Korroosiokäsikirja 2008, 17–18.)

Metallin päätyessä kosketuksiin ilman hapen tai jonkin liuoksen kanssa tapahtuu reaktio, jonka tuloksena syntyy passiivinen kalvo. Reaktiotuote muodostaa reagoimattoman eli passiivisen kerroksen metallin tai metalliseoksen pinnalle, joka hidastaa tai jopa lopettaa korroosion jatkoreaktiot.

Näin ollen korroosio, joka luo passiivisen kerros on hyväksi, eikä aiheuta materiaalin häviämistä, joka heikentäisi metallin toimintaa alkuperäisessä tarkoituksessaan. (Mts. 2008, 98.) Yleisin tällainen metallia suojaava passiivikerros on metallioksideista muodostuva. (Mts. 2008, 229.)

Kuitenkin kattilaympäristössä metallia ympäröivä kaasu sisältää syövyttäviä aineita, ja metallin pinnalle on mahdollista kertyä sulaa sekä muodostua muutakin kerrostumaa kuin passiivikerros. Nämä kaikki vaikutukset lisäävät korroosion riskiä kattilaympäristössä huomattavasti. Edellä mainittujen tekijöiden vaikutusten määrä kuitenkin vaihtelee kattilasta riippuen, mutta yleistä kaikilla kattiloilla on tulistimien korkea lämpötila ja siitä seuraavat vaikutukset kuten sula putken pinnalla, tulipesän mahdolliset pelkistävät olosuhteet sekä savukaasukanavien loppupuolen matalalämpötilakorroosio. (Mts. 2008, 153.)

Korkealämpötilakorroosio

Korkeissa lämpötiloissa metallien pinnalle muodostuva oksidikerros on ominaisuuksiltaan heikompaa kuin matalissa syntyvä, ja voi alkaa hilseilemään. Hilseilystä johtuen oksidikerroksen hävitessä pinnalta reagoimaton metalli päätyy uudestaan ja uudestaan kosketukseen hapen kanssa, ja näin ollen korroosio jatkuu ja poistaa materiaalia. Korroosiokestävyyttä voidaan kuitenkin parantaa oikeanlaisilla materiaaliseostuksilla, kuten kromilla. (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 210.)

Myös korkeissa lämpötiloissa ongelmaksi muodostuu komponentin pinnalle jäävä tuhka. Tuhkan sisältämät epäpuhtaudet, kuten rikki, vanadium ja erilaiset alkalimetallit (pääasiassa natrium ja kalium) saattavat sulaa putken pinnalle. Kemialliset reaktiot putken pinnalla täten kiihtyvät, sillä nestemäinen tuhka putken pinnalla tarjoaa elektrolyytin sähkökemiallisille reaktioille, se liuottaa suojaavaa passiivista oksidikerrosta, sekä sulattaa lisää putken pintaan osuvaa tuhkaa. Sulatuhka sulattaa erityisen tehokkaasti hiiliteräkset. (Vakkilainen 2005, luku 10–4.)

Sulfidoituminen

Vakkilaisen mukaan (2005, luku 10–4) jos korkeiden lämpötilojen lisäksi savukaasuvirta sisältää rikkiä, saattaa siinä oleva rikki diffundoitua metallin passiivisen oksidikerroksen läpi kosketuksiin reagoimattoman metallin kanssa. Rikki ja metalli muodostavat yhdessä metallisulfideja, jotka ovat hauraita ja helposti hilseileviä. Erityisesti matalahappisissa, rikkiä sisältävissä olosuhteissa suojaavan passiivisen oksidikerroksen syntyminen jää riittämättömäksi, ja rikki pääsee vapaasti reagoimaan metallin kanssa.

Matalalämpötilakorroosio

Matalissa lämpötiloissa, eli noin 200 astetta ja sen alle, alkaa savukaasujen kosteus tiivistymään kaasusta nesteeksi komponenttien pinnoille. Tällöin erityisesti polttoaineen rikin palamistuotteet reagoivat tiivistyneen veden kanssa muodostaen rikkihappoa, syövyttäen aggressiivisesti metallin suojaavaa oksidikerrosta. (Huhtinen ym. 2000, 212.)

5.2 Eroosio

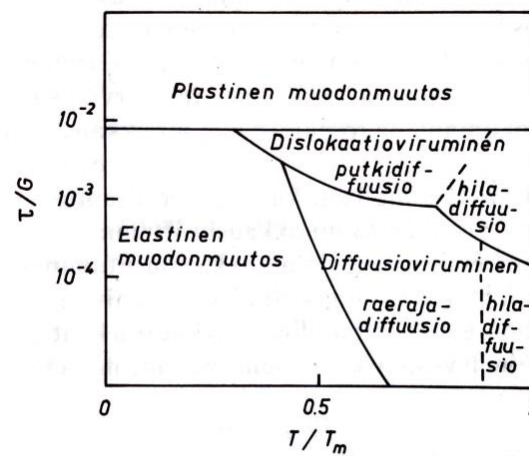
Kattilassa tulipuolella polttoaineen palamisesta syntyy savukaasuvirtaan pieniä kiintoaine-partikkeleja. Nämä pienet partikkelit liikkuvat kaasussa kovaa vauhtia, ja törmäävät kattilan metallisiin osiin. Törmätessään partikkelit irrottavat materiaalia kattilan komponenteista. Tällaista materiaalin vaurioitumista kutsutaan eroosioksi. (Lai 2007, luku 8.1.) Korkeissa lämpötiloissa eroosio voi myös nopeuttaa korroosiota, kuluttamalla komponenteista niitä suojaavan oksidikerroksen pois. Tämänlaista eroosiota kutsutaan eroosikorroosioksi. (Mts. 2007, luku 8.1.)

5.3 Viruminen

Metallit materiaaleina ovat yleensä hyvin kimmoisia matalissa lämpötiloissa, eli ne eivät koe plastista eli pysyvää muodonmuutosta ennen kuin niihin kohdistuva jännitys ylittää niiden kimmorajan. Kuitenkin lämpötilan noustessa korkealle, alkaa metalleissa tapahtua pysyvää muodonmuutosta jo todella matalilla jännityksillä. Tämä muodonmuutos tapahtuu todella hitaasti, jopa tuhansien tuntien kuluessa. Tällaista lämpötilan ja jännityksen yhteisvaikutuksesta johtuvaa muodonmuutosta kutsutaan virumiseksi. (Lindroos, Sulonen & Veistinen 1986, 734.) Höyrykattiloiden-

kin materiaaleissa esiintyy virumista. Virumismurtolujuutta käytetään määrittelevänä mitoitusarvona höyrykattiloiden komponenteille, jotka toimivat korkeissa lämpötiloissa. Virumismurtolujuus on materiaalikohtainen tilastollinen arvo. (Kiwa Inspecta, 2018.)

Virumista tapahtuu metalleissa myös matalissa lämpötiloissa, mutta silloin metallien normaalit pysyvää muodonmuutosta vastustavat mekanismit hidastavat niitä entisestään. Vasta kun toimitaan korkeissa lämpötiloissa ottavat termisesti aktivoituvat mekanismit vallan, ja virumisesta tulee metallin pääasiallinen vaurioitumismekanismi (ks. kuvio 5). (Lindroos, Sulonen, Veistinen 1986, 805.)



KUVA R 20.19. Ashbyn deformaatiokartta, muuttujina ovat normeerattu leikkausjännitys (G = liukukerroin) ja lämpötila (T_m = sulamislämpötila kelvineinä).

Kuvio 5. Deformaatiokartta

(Lindroos, ym. 1986, 805)

Lindroosin ja muiden mukaan nähdään, kuinka lämpötilan (x-akseli) noustessa kohti sulamislämpötilaa virumista alkaa tapahtumaan ennen plastista muodonmuutosta.

5.4 Väsyminen

Metallit materiaaleina kestävät hyvin lyhyitä aikoja staattista jännitystä, ja murtuvat sekä kokevat plastista muodonmuutosta vain, jos jännitys on yli materiaalin oman murtolujuuden. Kuitenkin jos materiaali altistetaan vaihteleville jännityksille usein, jotka voivat olla hyvinkin alle myötö- ja mur-

tolujuuden saattaa materiaali yllättäen murtua, kun jännityksen vaihtelujen lukumäärä kasvaa tarpeeksi suureksi. Tätä kutsutaan metallin väsymiseksi, ja siitä seuraavaa vahinkoa väsymismurtumaksi. (Lindroos, Sulonen & Veistinen 1986, 765.) Väsymistä ilmenee höyrykattiloissa mahdollisesti lämpenemisen sekä viilentymisen seurauksena. Lämpölaajeneminen aiheuttaa komponenttiin jännityksiä, jotka taas poistuvat kappaleen viilentyessä. Syklin toistuessa tarpeeksi monta kertaa on väsymismurtuma mahdollinen. (McEvily 2013, 198.)

6 Käyttöiän määrittämisen menetelmiä

Höyrykattilan kriittisten komponenttien jäljellä olevan käyttöiän tarkka tunteminen mahdollistaa laitoksen tehokkaamman käytön pidentämällä yhtenäistä ajoaikaa, koska yllättävät vauriot ja niistä seuraavat mahdolliset alasajot vähenevät. Kun ajoaika pitenee ja laitoksen kiinteät käyttökulut jakautuvat pidemmälle aikavälille, niin kokonaiskustannukset laskevat. (Merritt 2015, 299–300.) Tarkan käyttöiän määrittäminen kuitenkin vaatii ylimääräistä työtä, ja erityisesti datan keräämistä kohteista, joiden jäljellä oleva käyttöikä halutaan selvittää (Heselson 2014, 198). Dataa kerätään höyrykattilasta erilaisilla testeillä, esimerkiksi ultraäänipaksuusmittauksilla (Merritt 2015, 300). Höyrykattiloiden komponenttien käyttöiän määrittämiseen käytetään usein API 579/ASME FFS-1 -standardia. Lineaarinen regressio on tilastollinen menetelmä, jota on käytetty höyrykattiloiden käyttöiän määrittämisessä melko vähän. Tässä opinnäytetyössä lineaarinen regressio on otettu mukaan toimeksiantajan toiveesta käyttöiän määrittämiseen.

6.1 API 579/ASME FFS-1

Höyrykattiloiden käyttöiän määrittämisessä hyödynnetään myös standardeja. Yksi laajasti alalla käytetty standardi on American Petrol Industry (API) sekä American Society of Mechanical Engineersin (ASME) yhteistyönä kehittämä standardi API 579/ASME FFS-1. Kyseinen standardi antaa ohjeet höyrykattiloiden käyttöiän määrittämisen lisäksi myös muille painelaitteille, säiliöille sekä näiden putkistoille.

Standardissa käyttöiän määrittäminen aloitetaan tarkasteltavan komponentin silmämääräisellä tarkistuksella. Jos silmämääräisen tarkistuksen jälkeen todetaan kohteessa olevan vaurioita, siirrytään arvioimaan näiden luonnetta ja vakavuutta. Määritettäessä jäljellä olevaa käyttöikää voimme olettaa, että kohteen vauriot ovat sellaisia, joiden kanssa voidaan jatkaa toimintaa ja käyttöikää on vielä

jäljellä. Seuraavaksi tarkistetaan kohteen käyttötarkoitus ja ympäristö, jossa kohde toimii. Kun tämä on tiedossa, valitaan se vauriomekanismi, joka on vahingon aiheuttanut, ja näiden vaurioiden vakavuus. Vauriomekanismista riippuen standardi tarjoaa erilaisia laskennallisia metodeja määrittää käyttöikä kohteelle. Jokaisella vauriomekanismilla on kolme käyttöiän arviointitasoa, ja taso nousee kohteen vaurioiden vakavuuden mukaan. (API 579/ASME FFS-1:2016, 58.)

Arviointitaso 1

Arviointitasolla 1 kohteen vauriot ovat vähäiset, ja komponentin kulumisen oletetaan olevan mallista myös jatkossa. Jäljellä olevan käyttöiän tarpeeksi tarkkaan määrittämiseen riittää silloin yksinkertainen ja konservatiivinen ennuste. Ennusteen voi muodostaa pienellä määrällä dataa, esimerkiksi kohteen suunnittelutiedoilla ja viimeisimmällä paksuusmittauksella. (API 579/ASME FFS-1:2016, 55.)

Arviointitaso 2

Toisen tason arvioinnilla kohteen vauriot ovat jo selkeästi havaittavissa. Vaurion vakavuuden vuoksi voi olla aiheellista selvittää tarkemmin kohteen käyttöikä. Tällöin turvaudutaan yksityiskohtaisempiin laskentam metodeihin. Ennusteeseen tarvittava datan määrä ja laatu ovat pääasiassa samat, kuin ensimmäisellä tasolla, mutta kaavat, joilla ennustetta lasketaan ovat monimutkaisempia. (API 579/ASME FFS-1:2016, 55–56.)

Arviointitaso 3

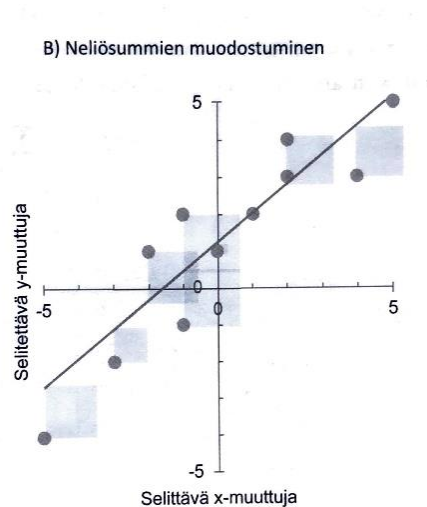
Arviointitaso kolme on käyttöiän ennusteen muodostamiseen kaikista syvällisin. Arviointitasolla kolme kohteen vauriot ovat vakavia, eikä sen toiminnasta ja jäljellä olevasta käyttöiästä voida olla täysin varmoja. Tämän arviointitason laskennalliset menetelmät ovat aikaisempia tasoja yksityiskohtaisempia, ja vaativat enemmän dataa kohteesta. (API 579/ASME FFS-1:2016, 56.)

6.2 Lineaarinen regressio

Toimeksiantajalta saatu paksuusmittausaineiston data voidaan kuvata myös pistemäärinä, eli jonkin komponentin mitattu paksuus millimetreissä ja mittausvuosi tämän pisteen koordinaatteina. Nämä arvot muuttuvat ajan kuluessa, eli ovat muuttujia, ja näiden kahden välistä riippuvuutta voidaan pyrkiä selittämään kehittämällä malli kuvaamaan sitä. Aineistosta valitaan selittävä muuttuja, ja selitettävä muuttuja. Yleisesti selittävänä muuttujana toimivat x-muuttujat, ja selitettävänä muuttujana y-muuttujat. Toisin sanoen y-akselin muuttujien muutosta pyritään selittämään x-akselin muuttujien muutoksella. Tällä tavalla syntyneellä matemaattisella mallilla voidaan myös laskea ennusteita. Tätä menettelyä kutsutaan regressioanalyysiksi. (Nummenmaa 2021, 439.)

Pienimmän neliösumman menetelmä

Opinnäytetyön työkalu hyödyntää pienimmän neliösumman menetelmää, joka on lineaarisen regression menetelmä. Pienimmän neliösumman menetelmässä pyritään piirtämään aineiston pistemääriä mahdollisimman läheltä kulkeva suora tai jokin muu käyrä. Kuitenkin aineistosta riippuen pistemääriä täydellisesti kuvaavaa käyrää ei voida muodostaa. Tällöin tarvitaan jokin kriteeri, minkä perusteella voidaan arvioida muodostetun käyrän sopivuutta aineistoon. Pienimmän neliösumman menetelmässä kriteerinä toimii pienin neliösumma. (Nummenmaa 2021, 441.) Pienin neliösumma muodostetaan ottamalla pistemäärä, ja laskemalla erotus sen läheltä kulkevaan käyrään. Tämä erotus neliöidään negatiivisten tulosten poistamiseksi, jolloin saadaan pelkästään posi-



Kuvio 6 Neliösumman muodostaminen
(Nummenmaa 2021, 441)

tiivisia arvoja kriteerille. Mitä pienempi käyrän neliösummasta tulee, sitä tarkemmin se kuvaa aineiston pistemääriä. (Nummenmaa 2021, 441). Kuviossa 6 nähdään kuinka neliösummat muodostuvat.

7 Laskimen kehittäminen

7.1 Aineiston käsittely

Työkalun ohjelmoimista ja testaamista varten saatiin toimeksiantajalta aiemmin mitattua paksuusmittausaineistoa höyrykattiloista ja näiden komponenteista. Aineisto oli tallessa toimeksiantajan omassa pilvitalennuspalvelussa. Lisäksi tarpeen vaatiessa aineistoa toimitettiin lisää opinnäytetyön tekijälle sähköpostitse.

Paksuusmittausaineisto on toimeksiantajalla jaettu asiakkaan, höyrykattilan, ja näiden komponenttien mukaan. Lisäksi mittaukset ovat taulukoitu järjestyksessä uusimmasta vanhimpaan, ja mittapisteen nousevassa suuruus- tai aakkosjärjestyksessä, asiakkaan omasta komponenttien nimeämistavasta riippuen. Työkalun oikeanlaisen toiminnan takia kuitenkin yksittäisen mittapisteen mittaushistoria tarvitaan, joten aineistotaulukkoa järjesteltiin esittämään tulokset aina jonkin tietyn mittapisteen mukaan.

7.2 Työkalun ohjelmointi

Opinnäytetyön osana kehitettävän työkalun alustaksi valittiin Microsoft Excel. Excel valittiin koska ohjelma on helppokäyttöinen ja selkeästi ymmärrettävä, pystyy käsittelemään paljon dataa kerralla sekä ultraäänipaksuusmittauslaitteet tuovat mitatun datan suoraan sovellukseen taulukkona. Näiden syiden lisäksi opinnäytetyön tekijällä sekä toimeksiantajalla on aiempaa kokemusta Excelin kanssa toimimisesta.

Työkaluun haluttiin laskumenetelmiä, jotka huomioivat myös mitattavan pisteen aiemmat mitaustulokset ennustusta laskiessaan. Tällöin kohteelle laskettava käyttöiän ennuste olisi datasta riippuen tarkempi, kun sen laskennassa pystyttäisiin hyödyntämään kohteen aiempi data ja historia. Esimerkkinä kappale, joka kuluu kovalla vauhdilla höyrykattilassa vallitsevien olosuhteiden ta-

kia, mutta syystä tai toisesta olosuhteet kattilassa muuttuvatkin leudommiksi. Tällöin myös kulumisnopeus hidastuu. Kulumisnopeuden hidastumisen takia kappale saattaisi saada pidemmälle kestäväen käyttöiän ennusteen, jos kappaleen koko historia saataisiin hyödynnettyä ennusteen laskennassa. Tällaisessa tilanteessa, jossa halutaan selvittää kahden muuttujan välistä riippuvuutta, voidaan hyödyntää regressiota.

Työkaluun syötetään halutun mittapisteen mittausdata taulukkona. Laskimen vaatimat tiedot käyttäjältä ovat mittausvuodet, mitatut paksuudet, sekä kyseisen kappaleen ohuin sallittu paksuus. Laskimen pohjana toimii Excelin makrotoiminto, joka suorittaa käyttäjän puolesta funktioiden kirjoittamisen, ennustuksen laskemisen sekä tulosten esittämisen kaaviossa. Makro-toiminnot ovat yhdistetty lomakkeenohjausobjekteihin, ja niitä klikkaamalla voidaan valita haluttu datasta laskettava käyrän muoto. Työkalu ilmoittaa käyttäjälle R-luvun, joka kuvaa kuinka tarkasti käyrä kuvaa syötettyä dataa, ja jonka perusteella käyttäjä voi valita dataan parhaiten sopivan käyrän muodon.

7.3 Laskimen toiminta ja perusteet

Työkalu hyödyntää Excelin LINREGR-funktiota, joka valitun laskumenetelmän perusteella sovittaa annettuun dataan käyrän, ja selvittää tämän vakiot. Kyseiset funktion vakiot mahdollistavat ennusteen laskemisen. Kun tiedämme nämä funktion vakiot sekä paksuuden, jolle haluamme määrittää jäljellä olevan käyttöiän ennusteen, voimme ratkaista funktiosta vuosimuuttujan ja laskea ennusteen. Seuraavaksi käydään läpi työkaluun ohjelmoidut laskentamenetelmät, joiden avulla laskin sovittaa annetulle datalle erimuotoisia käyriä.

7.3.1 Lineaarinen

Ensimmäinen mahdollinen käyrän sovituskäymalli on lineaarinen. Lineaarisen käyrän muoto on suora viiva, joka pyrkii kulkemaan mahdollisimman läheltä jokaista pistettä. Lineaarinen käyrän muoto sopii parhaiten komponenteille, jotka kuluvat tasaiseen tahtiin koko ajan. Lineaarisen funktion kaava 1 sekä käyttöiän ennusteen laskennan kaava 2 ovat alla:

$$y = kx + b \tag{1}$$

ja

$$x = \frac{y-b}{k} \quad (2)$$

missä y = paksuusmuuttuja

k = kerroin 1, toisin sanoen kulmakerroin

x = vuosimuuttuja

b = vakio

7.3.2 Eksponentiaalinen

Eksponentiaalisesta käyrästä laskettava ennustus sopii komponenteille, joissa kulumisnopeus on alussa todella nopea, mutta hidastuu ajan myötä. Eksponentiaalisen yhtälön kaava 3 sekä käyttöään ennusteen laskennan ratkaistu kaava 4 ovat alla:

$$y = k * e^{bx} \quad (3)$$

ja

$$x = \frac{\ln(\frac{y}{k})}{b} \quad (4)$$

missä y = paksuusmuuttuja

k = vakio kerroin

b = vakio

e = Neperin luku

x = vuosimuuttuja

7.3.3 Logaritminen

Logaritminen funktio on edellä mainitun eksponentiaalisen funktion käänteisfunktio. Työkalussa käytetyn logaritmisien funktion kantaluku on Neperin luku. Logaritmisesta käyrästä ja funktiosta laskettava käyttöiän ennuste sopii sellaisille komponenteille, joiden kulumisnopeus hidastuu hitaasti. Logaritmisien funktion kaava 5 sekä käyttöiän ennusteen kaava 6 ovat alla:

$$y = k * \ln(x) + b \quad (5)$$

ja

$$x = e^{\left(\frac{y-b}{k}\right)} \quad (6)$$

missä y = paksuusmuuttuja

k = kerroin

b = vakio

e = Neperin luku

x = vuosimuuttuja

7.3.4 Potenssifunktio

Potenssifunktiosta laskettava käyttöiän ennuste sopii komponenteille, joiden kulumisnopeus on koko käyttöiän nopea, ja mahdollinen hidastuminen on vasta lopussa, jos ollenkaan. Potenssifunktion kaava 7 sekä siitä ratkaistavan käyttöiän ennusteen kaava 8 ovat alla:

$$y = k * x^b \quad (7)$$

ja

$$x = \sqrt[b]{\frac{y}{k}} \quad (8)$$

missä y = paksuusmuuttuja

k = vakiokerroin

b = vakio

x = vuosimuuttuja

7.3.5 Toisen asteen polynomifunktio

Toisen asteen polynomifunktiossa on kaksi muuttujaa x -muuttujaa vakion lisäksi. Toisen asteen polynomifunktiosta laskettava ennuste sopii miltei kaikille komponenteille. Kuitenkin työkaluun syötettävästä datasta riippuen polynomifunktio ei välttämättä anna tuloksia lainkaan. Toisen asteen polynomifunktion kaava 9 sekä siitä ratkaistu käyttöään ennusteen kaava 10 ovat alla:

$$y = a * x^2 + b * x + c \quad (9)$$

ja

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 * a * (c - y)}}{2 * a} \quad (10)$$

missä y = vuosimuuttuja

a = kerroin 1

b = kerroin 2

c = vakio

x = vuosimuuttuja

8 Tulokset

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää työkalu, joka määrittää höyrykattiloille näiden jäljellä olevaa käyttöikää paksuusmittausdatan perusteella. Erityisesti tavoitteena oli ohjelmoida työkaluun useampi erilainen laskentamenetelmä, jolloin näiden menetelmien antamia tuloksia pystytään vertailemaan keskenään, ja löytämään niistä sopivin kyseiselle kohteelle. Tämän lisäksi tavoitteena oli tutkia, miten muut toimeksiantajan alalla toimivat käyttävät paksuusmittausdataa käyttöiän määrittämisessä.

Opinnäytetyötä varten kehitetty työkalu sisältää toimeksiantajan tavoitteeksi asetetut useat laskentamenetelmät käyttöiän määrittämiseen, ja ylimääräisenä ominaisuutena se myös esittää tulokset visuaalisesti Excelin kaavioiden avulla. Työkalu on ohjelmoitu helppokäyttöisyys ja käyttäjän mukavuus mielessä. Työkalua voidaan hyödyntää käyttöiän määrittämisessä myös muillekin kohteille ja komponenteille, joissa esiintyy kulumista ja joista kerätään paksuusmittausdataa. Työkalu on toteutettu Exceliin, jolloin se on helppo siirtää ja integroida toimeksiantajan jo olemassa oleviin järjestelmiin. Kuitenkin kehitetystä työkalusta jäi uupumaan mahdollisuus määrittää käyttöikä usealle kohteelle samanaikaisesti. Liitteessä 1 on nähtävissä työkalun käyttäjänäkymä, jossa on laskettu ennuste kohteelle toisen asteen polynomifunktion avulla.

Tutkimuksen tuloksena menetelmiä käyttöiän määrittämiseen höyrykattiloille löytyi runsaasti. Kuitenkin monet löydetyistä menetelmistä hyödyntävät paksuusmittauksien tuloksia vain yhtenä arvona muiden arvojen lisäksi yksityiskohtaisemmissa laskennoissa käyttöiän määrittämiseksi. Tästä johtuen niiden metodeja ei hyödynnetty työkalun kehityksessä. Tutkimusta tehtäessä ilmeni myös, että monet lödytetyt menetelmät olivat osa API-579/ASME FFS-1 standardia.

9 Pohdinta

Tutkimuksen tavoitteina oli kehittää käyttöiän määrittämiseen työkalu, joka määrittäisi höyrykattilan komponentin jäljellä olevan käyttöiän siitä kerättyyn paksuusmittausaineistoon perustuen. Toisena tavoitteena tutkimukselle oli selvittää, kuinka näistä mittauksista muut alan toimijat muodostavat käyttöiän ennusteita. Nämä kaksi tavoitetta kulkivat opinnäytetyötä tehtäessä käsi kädessä, ja menetelmien selvittäminen toimi työkalun kehittämisen perustana.

Työn edetessä ilmeni, että pelkästään paksuusmittauksiin perustuvia käyttöiän määrittämisen menetelmiä ei ole kovinkaan monia, ja suuri osa näistä menetelmistä oli jo entuudestaan toimeksiantajan tietoisuudessa. Paksuusmittauksia käytetään käyttöiän määrittämisessä alalla paljon, mutta osana jotakin muuta yksityiskohtaisempaa laskentamenetelmää. Käyttöiän määrittämisen menetelmiä kartoittaessa vastaan tuli useasti API 579/ASME FFS-1 standardi. Kyseinen standardi onkin todella kattava, ja tarjoaa yksityiskohtaisia menetelmiä käyttöiän määrittämiseen miltei kaikille painelaitteille, säiliöille, putkistoille ja höyrykattiloille mitä voikaan löytyä sellutehtailta, voimalaitoksilta, tai jalostamoilta ja niin edelleen. Jos käyttöiän määrittämiselle ilmenee tarve, suosittelisin perehtymään tähän kyseiseen standardiin, jos vain mahdollista.

Opinnäytetyössä kehitetty työkalu ylittää sille asetettuihin tavoitteisiin hyvin. Työkaluun syötetään sen komponentin koko paksuusmittaushistoria, jonka jäljellä oleva käyttöikä halutaan määrittää, jolloin kaikki aiemmat tulokset tulevat huomioituiksi. Työkalua on helppo käyttää, sillä siihen on mahdollista lisätä uusia laskentametodeja pienellä vaivalla. Sen lisäksi työkalu esittää saadut tulokset visuaalisesti. Tulosten visuaalisesta esittämisestä voi olla erityistä hyötyä, kun käyttöiän määrittämisen tuloksia esitetään asiakkaalle, esimerkiksi yksittäisen vakavasti vaurioituneen kohteen tapauksessa. Kuitenkin työkalusta jää vielä puuttumaan usean ennusteen samanaikaisen laskennan ominaisuus. Usean ennusteen laskeminen samanaikaisesti edellyttäisi automaattisen nimeämisjärjestelmän kehittämistä aineistolle, jotta Excel ymmärtää missä yhden tietyn komponentin data alkaa ja loppuu. Tätä vaaditaan, jotta monen eri Excelin funktion samanaikainen soveltaminen yhteen dynaamiseen taulukkoon onnistuu.

Käyttöiän määrittämisessä lasketut ennusteet lasketaan paksuusmittausdatasta, jota on saatu seisakkien aikana höyrykattiloiden komponenteista (Paksuusmittaukset ja materiaalit 2021). Nykypäi-

vän ultraäänipaksuusmittarit voivat saavuttaa jopa $\pm 0,001$ mm tarkkuuden (Benefits of Ultrasonic Thickness Gauging 2020). Mutta yleensä mitattu tulos on pikemminkin tarkkuusalueella $\pm 0,05$ mm (Lehtinen 2021). Mittauksesta saatavaan tulokseen vaikuttaa mittalaitteen kalibrointi, joka tehdään materiaalikohtaisesti, mittaaja ja hänen kokemuksensa mittaamisesta, mitattavan kohdan muoto, materiaalin puhtaus, mahdollisten epäpuhtauksien aiheuttamat kerrostumat mitattavassa kohteessa, sekä mittalaitteen ja mitattavan osan väliaineen oikea koostumus. Näistä muuttujista johtuen mittaustulos samasta mittapistestä voi joskus olla paksumpi, kuin aikaisemmin on mitattu. Toimeksiantajan edustajan (J., Järvi, 2022) mukaan datan laatu on yleensä vaihtelevaa aiemmin mainittujen syiden takia. Tällaisten välttämättömien mittavirheiden painoarvo ennusteessa kuitenkin vähenisi, jos paksuusmittauksien määrää saataisiin kasvatettua. Tällä hetkellä paksuusmittausdataa saadaan vain noin 1–2 vuoden välein, kun höyrykattila ajetaan alas seisakin ajaksi. Jos datan määrä olisi suurempi, ennusteet olisivat tarkempia ja pienet mittavirheet vain kohtina tarkempien mittauksien joukossa. Tällöin myös käyttöiän määrittämisen tulosten kriittinen tarkastelu olisi helpompaa.

Työkalu pääsee käyttöön toimeksiantajalla silloin kun käyttöikää määritetään kohteille, jotka tarvitsevat tarkempaa käyttöiän ennustetta. Laajempaan käyttöön työkalu otetaan, kun se saadaan ohjelmoitua laskemaan ennusteet usealle kohteelle samanaikaisesti. Myös tuloksena löydetty standardi API 579/ASME FFS-1 ja sen tarjoamiin menetelmiin syvempi kouluttautuminen saattaisi olla kannattavaa, erityisesti kun toimeksiantajalle tulee kansainvälisiä toimeksiantoja.

Toimeksiantajan kanssa on sovittu työkalun jatkokehityksestä opinnäytetyön jälkeen. Käyttöiän ennusteen muodostaminen usealle kohteelle samanaikaisesti on ensimmäinen toteutettava toimenpide. Integrointi toimeksiantajan olemassa olevaan järjestelmään olisi seuraava osuus. Voisi olla kannattavaa kehittää käyttöiän määrittämistä varten oma sovellus. Tällöin ei tarvitsisi ohjelmoida Exceliä suorittamaan monia funktioita samaan aikaan isolle määrälle dataa. Suuri määrä dataa, monien laskutoimitusten ja funktioiden laskenta samanaikaisesti on hidasta. Myös käyttökavuus lisääntyisi, kun datan syöttö, sekä ennustuksien laskenta olisi helppoa ja nopeaa. Sovelluksen voisi myös ohjelmoida tuomaan tulokset suoraan Exceliin, jossa paksuusmittausaineistoa säilytetään. Myös paksuuksien mittaamisesta olisi hyvä karsia muuttujia pois, mikäli se on mahdollista.

Lähteet

Advancing CFB technology. N.d. Esite Sumitomon sivustolla. Viitattu 16.12.2021. https://www.shi-fw.com/wp-content/uploads/Brochure_CFB.pdf

API 579/ASME FFS-1. Fitness-for-service engineering assessment procedure. Julkaistu 13.7.2016. Viitattu 13.12.2021. Amerikkalainen standardi, Replico Oy.

Benefits of Ultrasonic Thickness Gauging. 2020. Artikkelin Olympus sivustolla. Viitattu 20.1.2022. <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness-gauge/benefits/>

Bubbling fluidized bed boilers. N.d. Esite Sumitomon sivustolla. Viitattu 16.12.2021. https://www.shi-fw.com/wp-content/uploads/2020/12/Factsheet_BFB.pdf

Drum Boilers Overview. N.d. Artikkelin Mitsubishi Powerin sivustolla. Viitattu 16.12.2021 <https://power.mhi.com/products/boilers/lineup/circulation>

Heselton, K. 2014. Boiler Operator's Handbook. 2. p. USA: The Fairmont Press. Viitattu 10.1.2022. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/reader.action?docID=3239083&>

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. uud. p. Edita: Koulutushallitus

Järvi, J. 2022. Toimitusjohtaja. Replico Oy. Henkilökohtainen tiedonanto 11.2.2022.

Kananen J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja -sarja.

Korroosio-käsikirja. 2008. 4. p. Kunnossapitoyhdistys. Rajamäki: KP-Media

Lai, G. 2007. High-temperature corrosion and materials applications. USA: ASM International.

Lehtinen, M. Asiantuntija. Replico Oy. Henkilökohtainen tiedonanto 18.8.2021.

Lindroos, V., Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. Uudistettu Miekko-ojan metallioppi. Helsinki: Otava.

McEvily, A. 2013. Metal Failures: Mechanisms, analysis, prevention. 2. p. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Viitattu 22.2.2022. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/reader.action?docID=1365051>

Merritt, C. 2015. Process Steam Systems: A Practical Guide for Operators, Maintainers, and Designers. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Viitattu 10.1.2022. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/reader.action?docID=4436074&>

Nummenmaa, L. 2021. Tilastotieteen käsikirja. EU: Tammi.

Ojasalo, K., Moilanen, T., & Ritakoski, J. 2015. Kehittämistyön menetelmät – uudenlaista osaamista liiketoimintaan. 3–4 p. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Paksuusmittaukset ja materiaalit, tietokanta, Excel. Replico Oy. Viitattu 16.7.2021.

Vakkilainen, E. 2005. Kraft recovery boilers - Principles and practice. Helsinki: Suomen Soodakattilayhdistys. Viitattu 14.8.2021. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/111915/KRBFull.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Vakkilainen, E. 2017. Steam generation from biomass: construction and design of large boilers. Amsterdam: Butterworth-Heinemann

Voimalaitosten korkean lämpötilan komponenttien virumisen hallinta. 2018. Artikkeliki Kiwa Inspectan sivustolla. Viitattu 7.3.2022. <https://www.mynewsdesk.com/fi/inspecta- finland/news/voimalaitosten-korkean-laempeutilan-komponenttien-virumisen-hallinta-322858>

XXL size recovery boilers – present status and future prospects. Artikkeliki Valmetin sivustolla. Viitattu 16.12.2021 https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/xxl_size_recovery_boilers_whitepaper.pdf

Liitteet

Liite 1. Kuva työkalusta

