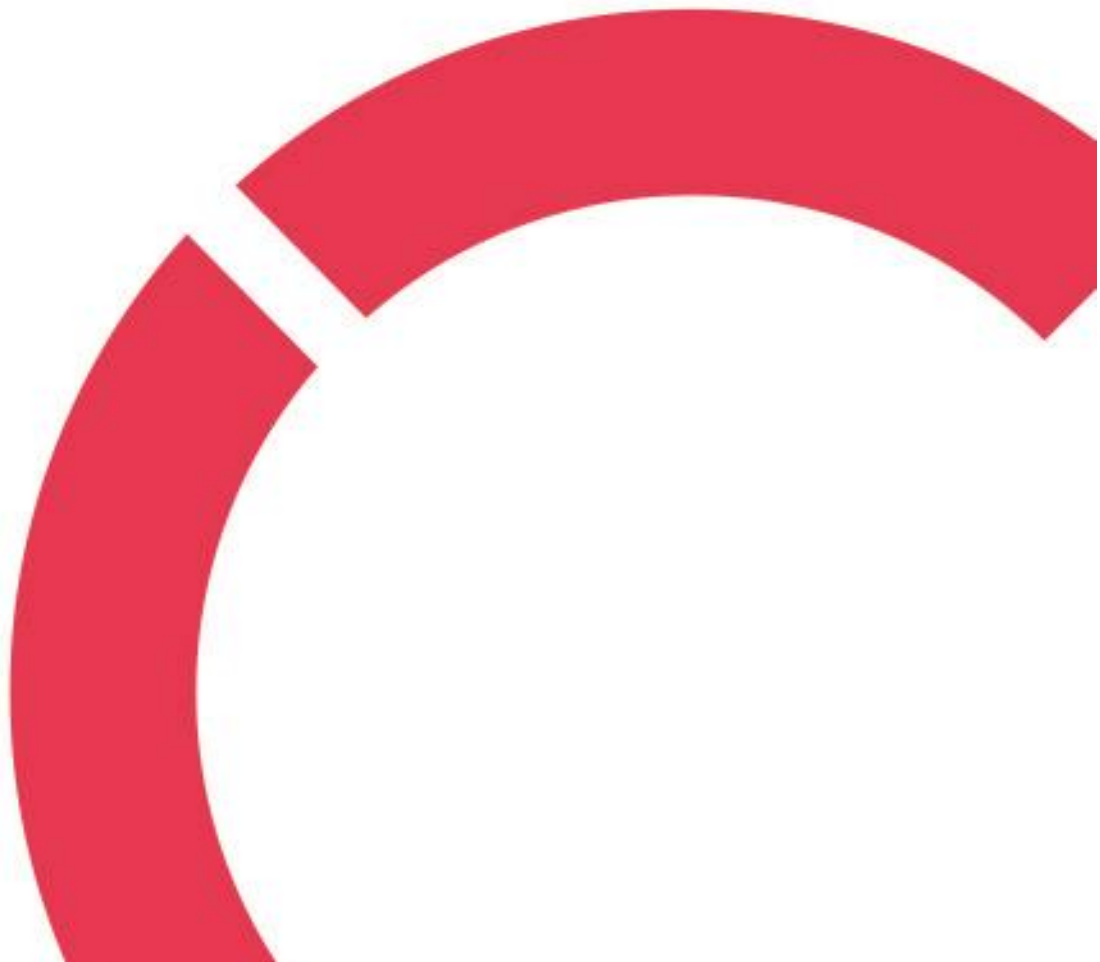


Niko Jokelainen

**KOKKOLAN ENERGIAN VOIMALAITOS POWERIN POLTTOAI-
NEKATTILAAN SYÖTETTÄVÄN RIKKIMÄÄRÄN LASKENTA**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutus
Helmikuu 2023**



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Helmikuu 2023	Tekijä/tekijät Niko Jokelainen
Koulutus Kemiantekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi KOKKOLAN ENERGIAN VOIMALAITOS POWERIN POLTTOAINEKATTILAAN SYÖTETTÄVÄN RIKKIMÄÄRÄN LASKENTA		
Työn ohjaaja Einar Nystedt		Sivumäärä 38
Työelämäohjaaja Pekka Leskinen		
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Kokkolan Energia Oy:n omistamalle voimalaitos Powerille. Turpeen käyttö energiantuotannon polttoaineena on tullut tiensä päähän turpeen poltosta aiheutuvien suurien hiilidioksidipäästöjen vuoksi. Turpeesta luopumista kiihdyttää hiilineutraali tulevaisuus, jossa keskitytään vähäpäästöisempiin polttoaineratkaisuihin. Turpeen poltosta aiheutuvista suurista hiilidioksidipäästöistä huolimatta turpeella on tärkeä rooli kattilapintoja suojaavana aineena voimalaitoksissa, jossa turvetta ja puupohjaisia biopolttoaineita käytetään seospolttoaineena. Kokkolan Energia Oy:n voimalaitos Powerilla turpeen sisältämä rikki tullaan korvaamaan rikkigranulaatilla.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella voimalaitos Powerille asennettavaa rikinsyöttöjärjestelmää ja rikinsyötön tarkoitusta sekä selvittää polttoainekattilaan syötettävä rikkimäärä. Opinnäytetyön teoriaosuudessa on tarkasteltu vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaatetta, höyrykattilan toimintaa ja tutustuttu turpeen ja puun polttoaine ominaisuuksiin sekä palamiseen. Tutkimusosiossa tarkasteltiin rikinsyötön tarkoitusta ja selvitettiin polttoainekattilaan syötettävä rikkigranulaatti määrä eri polttoaineseoksille.</p>		
Asiasanat Höyryvoimalaitos, vastapainevoimalaitos, leijukerroskattilat, turve, rikki, puupolttoaineet, kloori, rikkigranulaatti		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date February 2023	Author Niko Jokelainen
Degree programme Chemical engineering		
Name of thesis CALCULATION OF THE AMOUNT OF SULFUR FED INTO THE FUEL BOILER OF THE POWER PLANT OF KOKKOLAN ENERGIA (POWER)		
Centria supervisor Einar Nystedt	Pages 38	
Instructor representing commissioning institution or company. Pekka Leskinen		
<p>This thesis was done commissioned by the power plant (Power) owned by Kokkolan Energia Oy. The use of peat as a fuel for energy production has come to an end due to the large carbon dioxide emissions caused by burning peat. The abandonment discontinuation of peat will be accelerated by a carbon-neutral future, where the focus is on fuel solutions with lower emissions. Despite the large carbon dioxide emissions caused by the burning of peat, peat plays an important role as a protective agent for boiler surfaces in power plants where peat and wood-based biofuels are used as mixed fuel. At Kokkolan Energia Oy's power plant (Power), the sulfur contained in the peat will be replaced with sulfur granules.</p> <p>The purpose of the thesis was to examine the sulfur supply system to be installed at the power plant (Power) and the purpose of the sulfur supply, and to determine the amount of sulfur to be supplied to the fuel boiler. In the theory part of the thesis, the operating principle of the back pressure power plant, the operation of the steam boiler and the characteristics of peat and wood fuel and combustion were examined. In the research section, the purpose of sulfur feeding was examined, and the amount of sulfur granulate to be fed to the fuel boiler for different fuel mixtures was determined.</p>		
Key words Steam power plant, back pressure power plant, fluidized bed boilers, peat, sulfur, wood fuels, chlorine, sulfur granulate		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

BFB

Leijupetikattila (Bubbling fluidized bed)

CFB

Kiertoleijupetikattila (Circulating fluidized bed)

EKSOTERMINEN

Yhdisteiden tai aineiden välinen reaktio, joka luovuttaa lämpöä

ENDOTERMINEN

Yhdisteiden tai aineiden välinen reaktio, joka kuluttaa lämpöä

IAMC

IAMC (In-situ Alkali Chloride Monitor) on kaasumaisten alkalikloridien pitoisuuksien määrittämiseen käytettävä laitteisto

KJ/MOL

Kilojoulea yhtä moolia kohden

LÄMPÖARVO

Lämpöarvo ilmaisee palamisessa polttoaineesta vapautuvan lämpöenergiamäärän polttoaineen massayksikköä kohden. Ilmaistaan yleensä yksikössä MJ/kg

MASSAVIRTA

Kuvaa tietyllä ajanhetkellä virtaavan aineen massaa. Ilmoitetaan yleensä yksikössä kg/s tai kg/h

MJ/KG

Megajoulea yhtä kiloa kohden. Käytetään yleensä lämpöarvon yksikkönä

S/CL

Ilmaisee seospoltossa käytettävien polttoaineiden sisältämien rikin ja kloorin välisen moolisuhteen

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 KOKKOLAN ENERGIA OY	3
2.1 Historia.....	3
2.1.1 Kaukolämmön saapuminen.....	3
2.1.2 Kokkolan Energia Oy:n muodostuminen	4
2.2 Nykyhetki ja tulevaisuus.....	4
2.3 Kokkolan voimalaitokset	5
3 HÖYRYVOIMALAITOKSET	7
3.1 Vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaate	7
3.2 Höyrykattilat	8
3.2.1 Luonnonkiertokattilat.....	9
3.2.2 Leijukerroskattilat	10
4 KIINTEÄT POLTTOAINEET JA NIIDEN OMINAISUUDET	11
4.1 Turve	11
4.2 Puupolttoaineet.....	12
4.3 Kiinteiden polttoaineiden koostumus ja ominaisuudet	12
4.4 Kosteus ja lämpöarvo	13
5 PALAMINEN	15
5.1 Kiinteiden polttoaineiden palaminen ja palamisreaktiot	15
5.2 Polttoaineiden koostumuksen ja ominaisuuksien vaikutus palamiseen.....	16
5.3 Turpeen ja puun seospoltto	17
6 SELVITYS VOIMALAITOSTEN RATKAISUISTA TURPEEN KORVAAMISEKSI.....	18
6.1 Turpeen korvaaminen alkuaainerikillä tai puupohjaisilla biomassoilla	18
6.2 Ammoniumsulfaatin ruiskutus polttoainekattilaan.....	19
7 VOIMALAITOS POWERIN RIKINSYÖTTÖJÄRJESTELMÄ.....	20
7.1 Rikin syöttö polttoainekattilaan.....	20
7.2 Rikin ja kloorin molaarinen suhde.....	20
7.3 Rikkigranulaatti.....	21
8 LASKENTAMALLIN ESITTELY	22
8.1 Puun ja turpeen massojen määrittäminen	22
8.2 Seospolttoaineen rikki ja kloori	23
8.3 Ainemäärä ja moolimassa	23
8.4 Rikkigranulaatin määrä	24
8.5 Yhtä puupolttoainekiloa kohden tarvittava rikkigranulaattimäärä.....	25
9 RIKKIGRANULAATIN MÄÄRÄ VOIMALAITOS POWERILLA.....	27
9.1 Lähtötiedot.....	27
9.2 Tulokset.....	28

9.2.1 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineseos sisältää 70 % puuta ja 30 % turvetta.....	28
9.2.2 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineseos sisältää 80 % puuta ja 20 % turvetta.....	29
9.2.3 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineseos sisältää 90 % puuta ja 10 % turvetta.....	30
9.2.4 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineena käytetään pelkästään puuta	31
10 YHTEENVETO JA POHDINTA	33
10.1 Tulosten tarkastelu	33
10.2 Pohdinta.....	34
10.3 Opinnäytetyöprosessi	35
10.4 Loppusanat.....	36
LÄHTEET	37
 LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Höyrykattilatyypit	8
 KUVAT	
KUVA 1. Kokkolan Energia Oy:n historia	4
KUVA 2. Kokkolan Energian voimalaitos Powerin uusi savukaasulauhdutin	5
KUVA 3. Vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaate ja pääkomponentit	7
KUVA 4. Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiirin toiminta.....	9
KUVA 5. Kiertopetikattila (CFB).....	10
KUVA 6. Leijupetikattila (BFB)	10
KUVA 7. Puun koostumus.....	12
KUVA 8. Turpeen koostumus	12
KUVA 9. Puun palamisprosessi.....	15
KUVA 10. Periaatekuva puun ja turpeen seospoltosta	17
KUVA 11. Biomassan ja muovijätteen seospolton vaikutus tulistinpintoihin.....	19
KUVA 12. Ammoniumsulfaatin lisäys polttoainekattilaan, biomassaa ja muovijätettä poltettaessa	19
 TAULUKOT	
TAULUKKO 1. Kokkolan voimalaitosten tuotantokapasiteetit.....	6
TAULUKKO 2. Kiinteät polttoaineet.....	11
TAULUKKO 3. Puun ja turpeen alkuainepitoisuudet	13
TAULUKKO 4. Puun ja turpeen kosteus sekä tehollinen lämpöarvo	14
TAULUKKO 5. Voimalaitos Powerin polttoainekattilaan syötettävän seospolttoaineen massavirta....	27
TAULUKKO 6. Puun ja turpeen osuus seospolttoaineessa.....	28
TAULUKKO 7. Tulokset 1	29
TAULUKKO 8. Tulokset 2	30
TAULUKKO 9. Tulokset 3	31
TAULUKKO 10. Tulokset 4	32

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on toteutettu yhteistyössä Kokkolan Energia Oy:n kanssa. Opinnäytetyötä ja sen aihetta pohtiessani oli selvää, että opinnäytetyön tulee liittyä voimalaitostekniikkaan. Jo ammattikoulusta asti voimalaitostekniikka on kiinnostanut ja kiinnostus on lisääntynyt ammattikorkeakoulussa insinööriopintojen aikana, jossa opintojeni suuntautuminen on ollut uusiutuviissa energialähteissä sekä voimalaitostekniikassa. Kokkolan Energian voimalaitos Powerilla on määrä luopua turpeesta sen poltosta aiheutuvien suurten päästöjen vuoksi ja siksi voimalaitokselle on investoitu rikinsyöttöjärjestelmä, joka annostelee rikkigranulaattia polttoaineen sekaan. Näin ollen rikkigranulaatin määrän ja rikinsyötön tarkoituksen selvitys on ajankohtainen ja tärkeä asia, josta muodostui tämän opinnäytetyön aihe. Voimalaitos Power on sähköä, lämpöä ja höyryä tuottava vastapainevoimalaitos, joka sijaitsee Kokkolan suurteollisuusalueella. Voimalaitos käyttää energiantuotannon polttoaineena pääsääntöisesti turvetta sekä puupohjaisia biopolttoaineita.

Opinnäytetyö koostuu teoriaosuudesta sekä tutkimusosuudesta. Teoriaosuus keskittyy vastapainevoimalaitoksen toimintaan, höyrykattiloiden toimintaan ja voimalaitoksissa käytettävien turpeen sekä puupolttoaineiden ominaisuuksiin. Teoriaosuudessa käsitellään myös palamisprosessia sekä turpeen ja hakkeen seospoltoa. Tutkimusosiossa on perehdytty voimalaitos Poweriin asennettavan rikinsyöttöjärjestelmän toimintaan sekä rikinsyötön tarkoitukseen. Tutkimusosiossa esitellään myös teoreettinen laskentamalli, jolla voidaan määrittää polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin massavirta eri polttoaineseoksille.

Suomen hallitus on tehnyt osana päästökauppasopimusta ja hiilineutraalia tulevaisuutta päätöksen, jonka mukaan turpeen käytön energiantuotannon polttoaineena tulee puolittua vuoteen 2030 mennessä. Turve on tärkeä polttoaine voimalaitoksissa, jotka käyttävät turvetta ja puupolttoaineita seospolttoaineena. Seospoltossa turpeen sisältämä rikki neutralisoi puupolttoaineiden sisältämät alkalikloridiyhdisteet ja täten ehkäisee kattilapintojen vaurioitumista. Lisäksi seospoltolla voidaan vähentää turpeen poltosta aiheutuvia rikkidioksidipäästöjä. Seospolttoon tarkoitetuissa polttoainekattiloissa turpeen käytön vähentäminen voi aiheuttaa kattilapintojen korroosiota ja likaantumista. Tämän vuoksi Suomen voimalaitoksissa on aloitettu erilaisten vaihtoehtojen kartoittaminen, joilla turve voidaan korvata. Kokkolan Energian voimalaitos Powerilla turve korvataan rikkigranulaatilla.

Kokkolan Energia on investoinut voimalaitos Powerille uuden rikinsyöttöjärjestelmän, jonka tarkoituksena on annostella polttoainekattilaan rikkigranulaattia. Tämän avulla on tarkoitus vähentää turpeen käyttöä siten, että polttoainekattilat ja etenkin kattiloiden pinnat säästyvät likaantumiselta ja korroosiolta. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua Kokkolan Energian voimalaitos Powerin rikinsyöttöjärjestelmään ja vastata kysymyksiin, miksi rikkiä pitää syöttää polttoainekattilaan ja kuinka paljon rikkiä syötetään tietyn polttoaineseoksen sekaan. Opinnäytetyössä esitellään teoreettinen laskentamalli polttoainekattilaan syötettävän rikimäärän selvittämiseksi sekä saadut tulokset polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrästä eri polttoaineseoksille.

2 KOKKOLAN ENERGIA OY

Tässä luvussa esitellään opinnäytetyön toimeksiantaja Kokkolan Energia Oy. Luvussa perehdytään yhtiön toimintaan, historiaan, nykyhetkeen ja tulevaisuuteen sekä esitellään yhtiön omistamat voimalaitokset. Kokkolan Energia Oy on Kokkolan kaupungin omistama energia-alan yritys, joka vastaa sähkön, lämmön ja höyryn myynnistä, jakelusta sekä tuotannosta omistamallaan voimalaitoksilla. Yhtiön liiketoimintaan kuuluvat rakentamisen ja palveluiden liiketoiminta, sähkönsiirtoliiketoiminta, tuotanto-liiketoiminta, sähköliiketoiminta ja asiakkuusliiketoiminta. Liiketoiminnan osa-alueista vastaavat itse emoyhtiö Kokkolan Energia Oy:n lisäksi tytäryhtiöt Kokkolan Energiaverkot Oy ja Kokkolan voima Oy. (Kokkolan Energia Oy 2022a.)

2.1 Historia

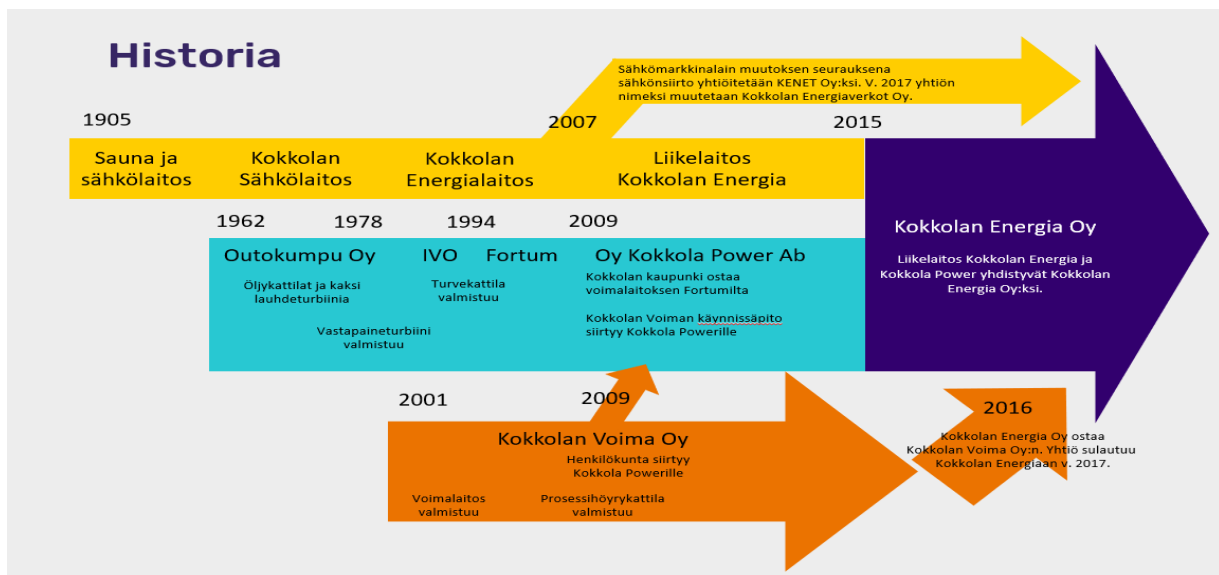
Kokkolan Energian historia juontaa juurensa sauna- ja sähkölaitoksesta, joka perustettiin vuonna 1904 parantamaan kaupungin katuvalaistusta. Yhtiö sai nimensä vuonna 1905 käyttöönotetusta sähkölaitoksen rakennuksesta, jonka yläkerrassa sijaitsi kaupungin yleinen sauna. Vuodesta 1905 lähtien yhtiö vastannut sähkön ja lämmön tuotannosta sekä niiden jakelusta. Sähkön ja lämmön kysyntä oli merkittävää aina sotavuosiin asti ja kysyntää kasvatti entisestään uusi dieselgeneraattori, joka otettiin käyttöön vuonna 1929. Sotavuodet olivat vaikeita aikoja ympäri Suomen myös sähkön osalta. Kokkolassa sähköpulaan saatiin helpotusta Länsi-Suomen Voiman kanssa solmitun sähkönostosopimuksen myötä. Sähkönostosopimuksen myötä Kokkolaan saatiin sähköä Länsi-Suomen Voiman vesivoimalaitokselta Harjavallasta. (Kokkolan Energia Oy 2022b.)

2.1.1 Kaukolämmön saapuminen

Sodan päätyttyä sähkön kysyntä jatkoi kasvuaan aina 1970-luvulle asti, jolloin energialaitos vahvisti sähköverkkoa uusilla investoinneilla. Kaukolämmön saapuminen oli merkittävä asia niin kokkolalaisille kuin myös itse energialaitokselle. Vuonna 1976 energialaitos allekirjoitti kaukolämmön toimitussopimuksen Kokkolan suurteollisuusalueella sijaitsevan Outokumpu Oy:n kanssa, joka omisti Kokkolan suurteollisuusalueella sijaitsevan voimalaitoksen. Kaukolämmön toimitussopimus siirtyi Imatran Voiman vastuulle vuonna 1991, yhtiön ostettua Outokumpu Oy:n omistaman voimalaitoksen, joka lopulta siirtyi 2000-luvun alussa Fortumin omistukseen. (Kokkolan Energia Oy 2022b.)

2.1.2 Kokkolan Energia Oy:n muodostuminen

2000-luvun alussa suurteollisuusalueelle valmistui toinen voimalaitos, joka oli Pohjolan Voiman omistama Kokkolan Voima Oy. Voimalaitoksen toiminta perustui sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Fortum myi omistamansa voimalaitoksen vuonna 2009 Kokkolan kaupungin omistamalle Ab Kokkola Power Oy:lle, jonka seurauksena Kokkolan Voima Oy:n henkilöstö siirtyi kyseisen yhtiön palvelukseen. Vuonna 2015 tapahtui yhtiöittäminen, jonka seurauksena syntyi lopulta Kokkolan Energia Oy. (Kokkolan Energia Oy 2022b.) Kuva 1 esittää Kokkolan Energia Oy:n historian vuodesta 1905 lähtien.



KUVA 1. Kokkolan Energia Oy:n historia (Kokkolan Energia Oy 2022b)

2.2 Nykyhetki ja tulevaisuus

Kokkolan Energia Oy:n toiminnan kivijalkana on sähkön, höyryn ja lämmön tuotanto sekä edellä mainittujen hyödykkeiden jakelu ja myynti. Kaukolämpöä yhtiö jakaa Kokkolan alueella ja Sähkön jakelu tapahtuu koko Suomen alueella. Sähköä ja kaukolämpöä yhtiö tuottaa omilla voimalaitoksillaan. Sähkön ja lämmön lisäksi voimalaitokset tuottavat prosessihöyryä Kokkolan suurteollisuusalueella toimivien tuotantolaitosten käyttöön. Vuonna 2021 yhtiö teki liikevaihtoa 65,6 miljoonaa euroa ja työllisti 108 henkilöä. (Kokkolan Energia Oy 2022c.)

Kokkolan Energia Oy on mukana myös toiminnassa, joka sisältää erilaisia uusiutuvaan energiaan liittyviä kehityshankkeita. Yhtiön tavoitteena on päästä eroon fossiilisista polttoaineista sekä vähentää hiidioksidipäästöjä 80 % vuoteen 2028 mennessä. (Kokkolan Energia Oy 2022c.)

Vuonna 2020 voimalaitos Powerille investoitiin savukaasujen lauhdutus- ja lämmöntalteenottolaitteisto (KUVA 2). Savukaasujen lauhdutus- ja lämmöntalteenottolaitteisto on yksi uusi askel kohti vähäpäästöisempää energiatuotantoa. Laitteiston avulla voidaan erotella syntyvistä savukaasuista kiintoainetta ja täten vähentää haitallisia päästöjä kuten esimerkiksi rikkidioksidipäästöjä. Lisäksi savukaasuissa oleva lämpö hyödynnetään voimalaitosprosessissa ja fossiilisten polttoaineiden kuten turpeen käyttö vähenee. (Kokkolan Energia Oy 2020.)



KUVA 2. Kokkolan Energian voimalaitos Powerin uusi savukaasulauhdutin (Kokkolan Energia Oy 2020)

2.3 Kokkolan voimalaitokset

Kokkolan Energia Oy omistaa kaksi voimalaitosta, Power ja Voima. Voimalaitokset sijaitsevat Kokkolan suurteollisuusalueella. Voimalaitos Power on vuonna 1962 toimintansa aloittanut voimalaitos ja voimalaitos Voima on käynnistynyt vuonna 2001. Voimalaitosten toiminta perustuu sähkön- ja lämmönyhteistuotantoon sekä prosessihöyryn tuotantoon. Molempiin laitoksiin kuuluu polttoainekattila sekä höyryturbiini. Lisäksi voimalaitoksilta löytyy eritehoisia öljykattiloita, prosessilämmön talteenottolaitteistot ja prosessihöyrykattilalaitteisto. Voimalaitosten polttoainekattilat käyttävät polttoaineinaan turvetta ja erilaisia puupohjaisia biopolttoaineita kuten haketta. Öljykattiloissa käytetään polttoaineena kevytpolttoöljyä. (Kokkolan Energia Oy 2021.)

Kokkolan Energian voimalaitosten tuotantokapasiteetit on esitetty taulukossa 1. Alla olevasta taulukosta käyvät ilmi Kokkolan Energian voimalaitosten teholluvut ja turbiineista saatavat maksimitehot, jotka on merkattu taulukkoon sulkeisiin. Voimalaitos Powerin pääkomponentteihin kuuluvat kiertoleijupetikattila (C5), öljykattilat (C4, C6 & C7) sekä höyryturbiini (T3). Voima-voimalaitokseen pääkomponentteihin kuuluvat leijupetikattila (K1), höyryturbiini (K1), lämminvesikattila, prosessilämmön talteenottolaitteisto sekä prosessihöyrykattilalaitos (K2). (Kokkolan Energia Oy 2021.)

TAULUKKO 1. Kokkolan voimalaitosten tuotantokapasiteetit (Kokkolan Energia Oy 2021)

VOIMALAITOSTEN TUOTANTOKAPASITEETIT						
			Polttoainetehto	Kaukolämpöteho	Sähköteho	Prosessihöyry
POWER						
Kiertoleijupetikattila (C5) + Höyryturbiini (T3)			108 MW	80 MW	35MW (52MW)	35 MW (100 MW)
Öljykattilat (C4, C6 & C7)			200 MW, 2x12,5 MW			
VOIMA						
Kerrosleijupetikattila (K1) + Höyryturbiini (K1)			80 MW	50 MW	20 MW	
Prosessihöyrykattilalaitos (K2)			18 MW			15 MW
Lämminvesikattila				12 MW		
Prosesiteollisuuden lämmöntalteenotto				15 MW		

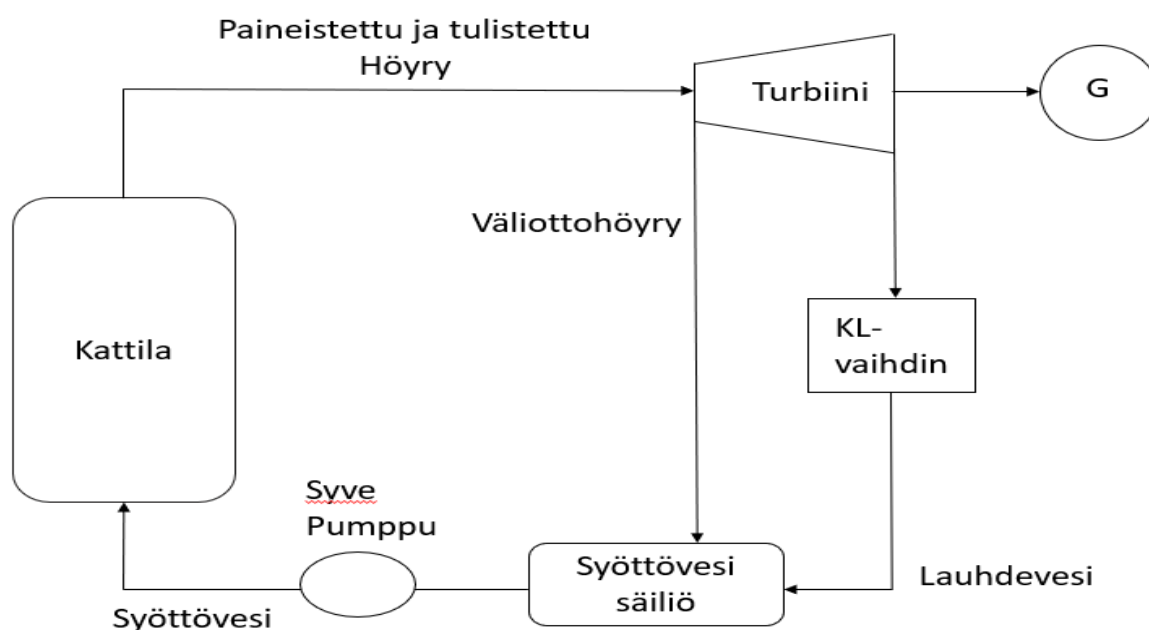
3 HÖYRYVOIMALAITOKSET

Höyryvoimalaitokset voidaan luokitella lauhdutusvoimalaitoksiin ja vastapainevoimalaitoksiin. Edellä mainitut voimalaitostyyppit erotellaan toisistaan turbiinista ulostulevan höyrynpaineen mukaan. Lauhdutusvoimalaitokset on optimoitu vain sähkön tuotantoon, sillä lauhdevoimalaitoksissa höyrynpaine sekä lämpötila ovat todella alhaiset. Nykyään kuitenkin Suomessa sijaitsevia pelkästään sähköä tuottavia lauhdevoimalaitoksia on aika vähän, sillä suurin osa on muutettu sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksiksi. Vastapainevoimalaitokset ovat höyryn, lämmön ja sähkön tuotantoon erikoistuneita höyryvoimalaitoksia. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 12, 89.) Tässä luvussa tutustutaan vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaatteeseen sekä höyrykattilan toimintaan, yleisimpään vesihöyrypiiritratkaisuun sekä leijukerroskattiloiden eroavaisuuksiin.

3.1 Vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaate

Yksinkertaisimmillaan vastapainevoimalaitoksen toiminta perustuu veden lämmitykseen, höyrystykseen ja tulistukseen höyrykattilassa sekä höyryn paisuntaan turbiinissa. Yksinkertaistettu voimalaitosprosessi pitää sisällään kuvan 3 mukaiset komponentit.

Vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaate



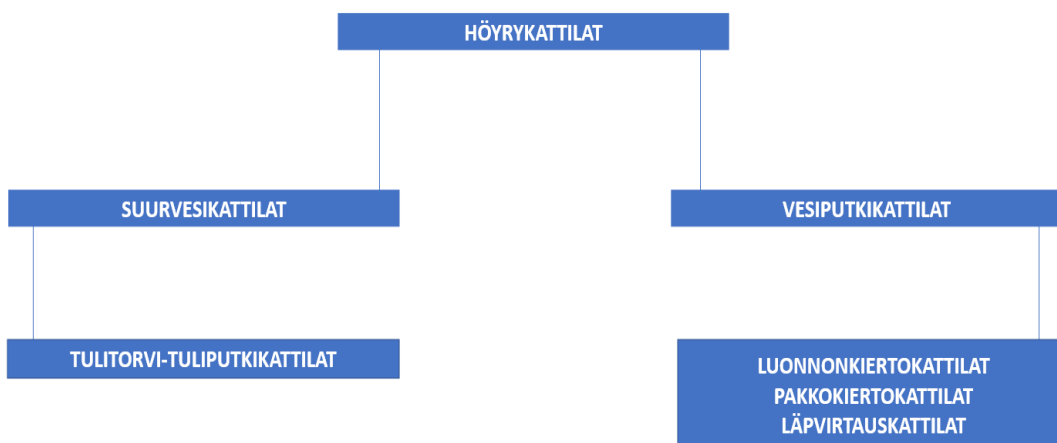
KUVA 3. Vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaate ja pääkomponentit (Mukaiillen: Kokkolan Energia 2021)

Vastapainevoimalaitos toimii kuvan 3 mukaisesti. Syöttövesisäiliössä varastoidaan ja puhdistetaan höyrykattilassa höyrystettävä vesi. Syöttövesi puhdistetaan kattilapintojen korroosiota aiheuttavien yhdisteiden ja kaasujen vuoksi. Syöttövesi lämmitetään turbiinista otettavalla väliottohöyryllä, jolloin kaasujen liukoisuus vähenee. Kaasut poistetaan syöttövesisäiliön päällä olevan kaasunpoistokuvun kautta. Puhdistettu vesi pumpataan syöttövesipumpulla höyrykattilan, jossa alkaa veden höyrystys ja tulistusprosessi. (Huhtinen ym. 2008, 23.)

Kattilan pääasiallinen tarkoitus on tuottaa sinne syötetystä vedestä höyryä. Ensimmäinen vaihe on veden lämmitys. Lämmityksen jälkeen syöttövesi höyrystetään ja tulistetaan, ennen kuin se ohjataan turbiinille. Veden höyrystyksen eri vaiheet kuluttavat energiaa ja tarvittava energia saadaan kattilassa poltetusta polttoaineesta. Tulistettu, korkeapaineinen höyry kulkeutuu turbiinin läpi. Turbiinissa höyry paisuu ja höyryn energiasisältö muutetaan turbiinia pyörittäväksi mekaaniseksi liike-energiaksi, joka edelleen muutetaan sähköksi turbiiniin liitetyllä generaattorilla. Turbiinista tuleva matalapainehöyry kulkeutuu kaukolämmönvaihtimelle, jossa se lämmittää kaukolämpöveden ja palautuu lauhteena takaisin syöttövesisäiliöön ja takaisin prosessiin. (Huhtinen ym. 2008, 22,24.)

3.2 Höyrykattilat

Höyrykattiloiden historia on pitkä, ja ensimmäisten höyrykattiloiden rakenne on muuttunut paljon nykypäivän höyrykattiloihin verrattuna. Eräs merkittävä parannus höyrykattilatekniikassa oli suurvesikattiloiden kehittäminen. Ensimmäiset höyryturbiinit ja sähkön tuotanto johtivat ensimmäisten vesiputkikattiloiden käyttöönottoon. Höyrykattilat voidaan luokitella vesihöyrypiirin mukaan suurvesi- ja vesiputkikattiloihin (KUVIO 1). (Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2004, 111.)

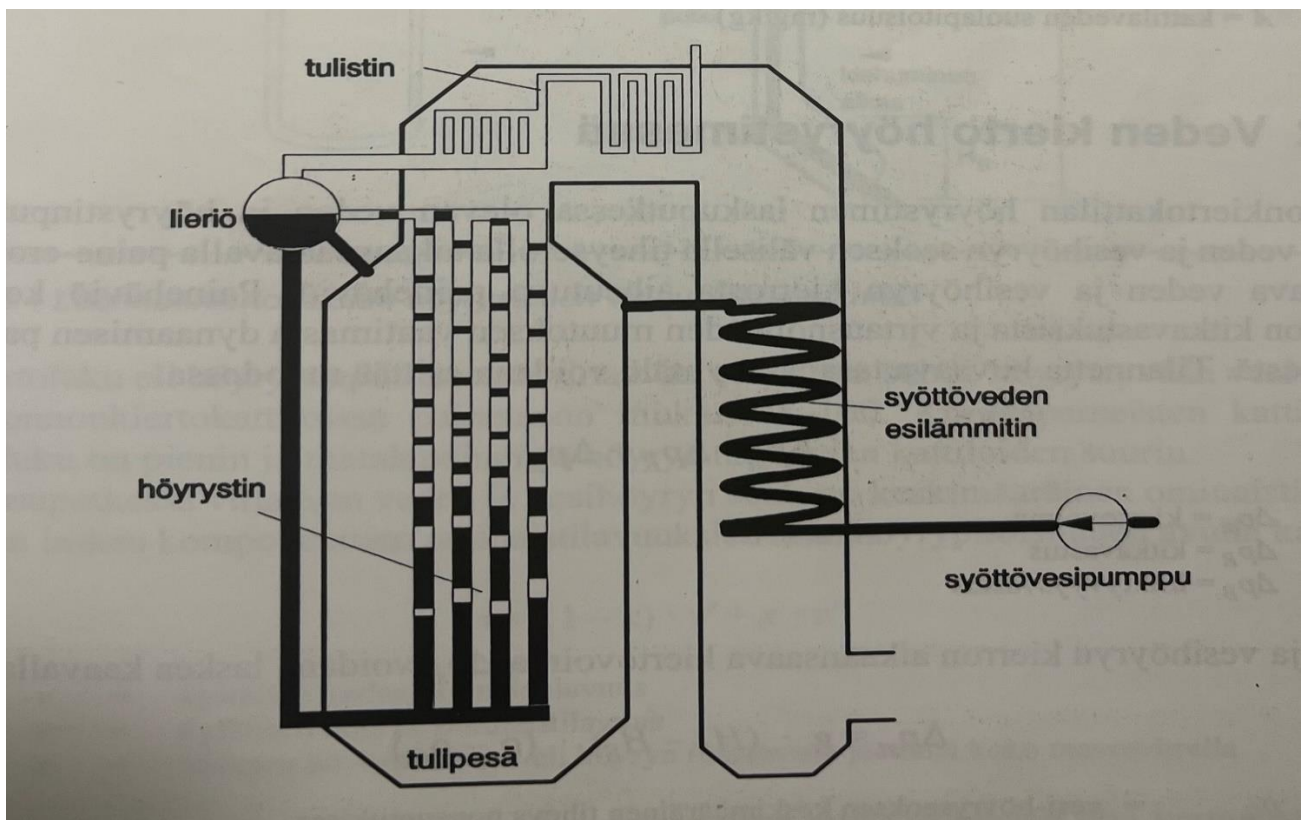


KUVIO 1. Höyrykattilatyypit (Huhtinen ym. 2004, 111.)

Suurvesikattilat ja vesiputkikattilat poikkeavat toisistaan siten, että vesiputkikattiloissa syöttövesi höyrytetään höyrystinputkien sisällä, kun taas suurvesikattiloissa syöttövesi kulkee höyrystinputkiston ulkopuolella ja veden höyrystävät höyrystinputkiston sisäpuolella olevat savukaasut. Voimalaitoksissa käytettävät polttoainekattilat lukeutuvat yleisesti vesiputkikattiloihin, kattilassa vallitsevan suuren paineen vuoksi. Suurvesikattilat soveltuvat taas paremmin matalapainehöyryn tuotantoon. Vesiputkikattilat jaetaan vielä vesihöyrypiirin eli vedenkierron mukaan luonnonkiertokattiloihin, pakkokiertokattiloihin sekä läpivirtauskattiloihin (KUVIO 1). (Huhtinen ym. 2004, 111.)

3.2.1 Luonnonkiertokattilat

Kokkolan voimalaitosten höyrykattilat kuuluvat luonnonkiertokattiloihin, joten tässä opinnäytetyössä on tarkemmin tutustuttu vain tämän kyseisen kattilatyypin vesihöyrypiirin toimintaan. Muitakin kattilatyyppejä kuitenkin on, ja ne on mainittu luvussa 3.2. Vesiputkikattiloihin kuuluvat luonnonkiertokattilat ovat yleisiä voimalaitostekniikassa. Luonnonkiertokattilassa syöttövesi höyrytetään höyrystinputkissa alla olevan kuvan 4 mukaisesti. (Huhtinen ym. 2004, 113.)

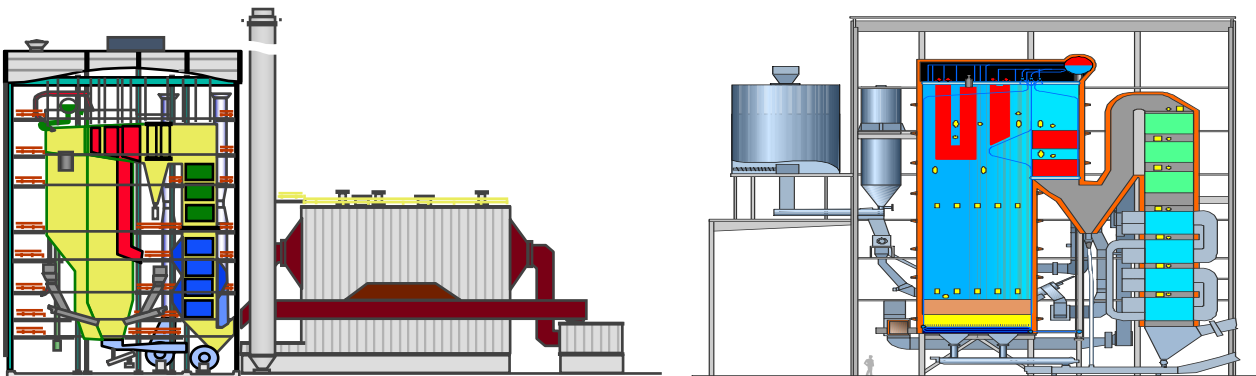


KUVA 4. Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiirin toiminta (Huhtinen ym. 2004, 113.)

Luonnonkiertokattilassa syöttövesi pumpataan aluksi syöttöveden esilämmitykseen. Syöttöveden esilämmitys toteutetaan savukaasuilla. Esilämmityksen tavoitteena on saada syöttövesi lämmitettyä, mutta myös parantaa kattilan hyötysuhdetta. Seuraavassa vaiheessa vesi höyrystetään tulipesän höyrystinputkissa, jonka jälkeen osa vedestä on vesihöyryä ja osa kylläistä vettä. Vedestä erotettu höyry palautetaan lieriöön, josta se kulkeutuu lieriön yläosan kautta höyryn tulistukseen. (Huhtinen ym. 2004, 113.)

3.2.2 Leijukerroskattilat

Kokkolan voimalaitosten höyrykattilat ovat vesihöyrypiiriltään luonnonkiertokattiloita, mutta polttoprosessia perustuu leijukerrospolttoon. Leijukerrospoltto on yleistynyt merkittävästi viime vuosikymmenien aikana ja siksi se on yleisin polttotekniikka suuremmissa voimalaitoksissa. Leijukerrospoltto perustuu polttoaineen palamiseen, jossa polttoaine palaa ilman avulla leijutettavan hiekkapetin seassa. Kuvissa 5 ja 6 on esitetty vasemmalla puolella kiertopetikattila (CFB) ja oikealla puolella leijupetikattila (BFB). Kyseiset kattilat ovat monipolttoainekattiloita ja kattilat soveltuvat myös kosteille polttoaineille hiekkapetin suuren lämpökapasiteetin vuoksi. (Huhtinen ym. 2008, 36.)



KUVA 5 & 6. Kiertopetikattila (CFB) ja kerrosleijukattila (BFB) (Kokkolan Energia Oy 2021)

Leijupetikattilan ja kiertopetikattilan toimintaperiaatteet ovat melko samanlaiset. Ainoa eroavaisuus on hiekkapetin käyttäytymisessä ja täten myös leijutusilman määrässä, joka syötetään tulipesään kattilan alaosaan. Polttoaine syötetään kattilan tulipesään, jossa se palaa hiekkapetissä. Leijupetikattilassa syötettävä ilma määrä saa hiekkapetin leijumaan, kun taas kiertopetikattilassa leijutusnopeus kasvaa ja hiekka kulkee kaasuvirran mukana. Kiertopetikattilassa hiekka kulkeutuu leijutusnopeuden vaikutuksesta yhdessä kaasujen kanssa sykloniin, jossa ne erotellaan ja hiekka palautuu takaisin tulipesään. (Huhtinen ym. 2008, 36.)

4 KIINTEÄT POLTTOAINEET JA NIIDEN OMINAISUUDET

Voimalaitokset käyttävät yleisesti kiinteitä, nestemäisiä tai kaasumaisia polttoaineita. Kokkolan Energian voimalaitoksilla käytetään puupohjaisia biopolttoaineita ja turvetta, jotka kuuluvat kiinteisiin polttoaineisiin. (TAULUKKO 2.) Viime vuosien kehitys kohti hiilineutraalisuutta on vaikuttanut myös merkittävästi polttoainevalintoihin. Tavoitteet kohti hiilineutraalisuutta on vaikuttanut siihen, että nykyään polttoaineen valinnassa on otettava huomioon polttoaineen uusiutuvuus sekä polttoaineesta aiheutuvat päästöt, kun taas aikaisemmin tarkasteltiin lähinnä polttoaineen hintaa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 36.) Polttoaineet syötetään kattilan tulipesään, jossa ne reagoivat hapen kanssa vapauttaen lämpöenergiaa veden lämmitykseen, höyrystykseen sekä tulistukseen. Polttoaineita voidaan polttaa yksitellen tai seospolttona. (Huhtinen ym. 2004, 27.)

TAULUKKO 2. Kiinteät polttoaineet (Huhtinen ym. 2004, 27)

Kiinteät polttoaineet	
Turve	Puupolttoaineet
Jyrsinturve	Hake
Palaturve	Sahanpuru
	Kuori

4.1 Turve

Turve on hitaasti uusiutuva eloperäinen maalaji, jota esiintyy märillä suoalueilla. Turve muodostuu suokasvien kuolleista osasista. Polttoaineturve voidaan jakaa jyrsinturpeeseen ja palaturpeeseen. Nykyisin jyrsinturpeella on energiantuotannossa huomattavasti suurempi rooli kuin palaturpeella. Kokkolan Energian voimalaitoksilla polttoturpeena käytetään jyrsinturvetta, jonka vuoksi alla olevissa taulukoissa on huomioitu vain jyrsinturpeen ominaisuudet (TAULUKKO 3 & 4). Turvelajit eroavat toisistaan tuotantomenetelmien perusteella. Jyrsinturpeen tuotannossa suon pinnasta jyrsitään ohuita kerroksia, kun taas palaturpeen tuotannossa turve irrotetaan noin puolen metrin syvyydestä. Palaturve muokataan vielä haluttuun muotoon turpeen irrotuksen jälkeen. Molemmissa tuotantomenetelmissä nostettu turve kuivataan ja aumataan. (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 117–118.)

Suomessa tupeen käyttö energiantuotannon polttoaineena on alkanut jo 1970-luvulla. Turpeen osuus energiantuotannosta oli parhaimmillaan 2000-luvun alussa, jonka jälkeen käyttö on vähentynyt huomattavasti päästöjen vähentämiseen liittyvien tavoitteiden takia. Suomessa turpeen osuus energiantuotannosta on nykyään noin 3–4 %. (Leinonen 2010, 12–13.) Turpeen rooli energiantuotannossa on ollut uhattuna jo usean vuoden ajan, johtuen turpeen poltosta syntyvistä suurista päästöistä. Turpeesta aiheutuvat päästöt ovat noin 10–15 prosenttia suuremmat kuin kivihiilestä aiheutuvat päästöt tuotettua energiayksikköä kohden. (Suomen luonnonsuojeluliitto 2022.) Tästä syystä hallitus on päättänyt, että turpeen käytön energiantuotannossa tulee puolittua vuoteen 2030 mennessä. Päätöksen myötä voimalaitoksissa joudutaan miettimään uusia ratkaisuja ja tekemään uusia investointeja turpeen ominaisuuksien korvaamista varten. (Haho 2021, 1.)

4.2 Puupolttoaineet

Nykyisin useimmat Suomessa sijaitsevat voimalaitokset käyttävät polttoaineenaan puupohjaisia biopolttoaineita. Voimalaitoksissa käytettävät puupohjaiset polttoaineet muodostuvat sahanpurusta, puun kuoresta sekä hakkeesta. Kyseisiä puupohjaisia polttoaineita syntyy metsäteollisuuden sekä puunjalostuksen sivuvirroista. (Maa- ja metsätalousministeriö 2022.) Viime vuosina puupolttoaineiden käyttö on kasvanut merkittävästi johtuen fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisestä. Puupolttoaineiden osuus energiantuotannosta oli vuonna 2021 noin 30 %. (Motiva 2022a.)

4.3 Kiinteiden polttoaineiden koostumus ja ominaisuudet

Kuvissa 7 ja 8 on esitetty puun ja turpeen koostumukset. Kuvista nähdään, että puu ja turve koostuvat pääasiassa tuhkasta, hiilestä, haihtuvista-aineista sekä vedestä (KUVA 7 & 8). Haihtuvien aineiden osuus vaikuttaa merkittävästi polttoaineen lämpöarvoon. Mitä suurempi on haihtuvien aineiden osuus, sitä pienempi on lämpöarvo. Esimerkiksi puu sisältää enemmän haihtuvia aineita kuin turve ja täten omaa pienemmän lämpöarvon. (Alakangas ym. 2016, 54, 121.)



KUVA 7 & 8. Puun ja turpeen koostumus (Alakangas ym. 2016, 55, 120)

Puun ja turpeen alkuainekoostumus on melko samanlainen pieniä poikkeuksia lukuun ottamatta. Molemmat polttoaineet koostuvat pääasiassa hiilestä, hapestä, vedystä sekä typestä. Edellä mainittujen alkuaineiden lisäksi turve ja puu sisältävät klooria ja rikkiä, joiden suhde vaikuttaa polttoainekattilaan syötettävään rikkigranulaatin määrään ja siksi kyseiset alkuaineet ovat tässä opinnäytetyössä ja etenkin polttoainekattilaan syötettävän rikkimäärän selvityksessä tärkeässä roolissa. Molemmilla alkuaineilla on myös tärkeä rooli turpeen ja puun seospoltossa. (Alakangas ym. 2016, 56, 122.) Polttoaineessa olevat alkuaineet rikki, vety, typpi ja hiili reagoivat kattilan tulipesässä hapen kanssa ja toimivat täten palavina komponentteina. Haitallisia alkuaineita ovat rikki ja typpi, jotka aiheuttavat hapen kanssa reagoidessaan ja palaessaan haitallisia rikki- ja typpioksidipäästöjä. Polttoaineiden koostumuksella on merkittävä vaikutus polttoprosessiin sekä savukaasuihin. (Huhtinen ym. 2004, 37–38.) Taulukossa 3 on esitetty puun ja turpeen alkuainepitoisuudet.

TAULUKKO 3. Puun ja turpeen alkuainepitoisuudet (Huhtinen ym. 2004, 38)

Puun ja turpeen alkuainepitoisuudet (%)					
Polttoaine	Hiili (C)	Vety (H)	Happi (O)	Typpi (N)	Rikki (S)
Puu	50,4	6,2	42,5	0,5	0,02
Jyrsinturve	55	5,5	32,6	1,7	0,22

4.4 Kosteus ja lämpöarvo

Voimalaitoksissa käytettävien kiinteiden polttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia polttoprosessin kannalta ovat kosteus sekä polttoaineen lämpöarvo. Kosteus kuvaa polttoaineen kuiva-aineen sisältämää vesimäärää. Polttoaineessa kosteus esiintyy sekä sisäisenä että ulkoisena kosteutena. Sisäisellä kosteu-della tarkoitetaan sitä, että kosteus on sitoutunut polttoaineessa oleviin huokosiin. Useimmissa voimalaitoksissa on polttoaineenkuivaus laitteisto, jossa suuren kosteuspitoisuuden omaavat polttoaineet voidaan kuivata ennen polttoainekattilaan syöttöä. Jos polttoaineen kosteus on suuri voi se vaikuttaa merkittävästi polttoaineen palamiseen, savukaasuihin sekä polttoaineen lämpöarvoon, jolloin myös polttoaineesta saatava lämpöenergian määrä on pienempi. (Huhtinen ym. 2004, 39–40.) Kun polttoainekattilassa poltetaan kostea polttoainetta, olisi savukaasun lauhdutus- ja lämmöntalteenottolaitteistosta hyö-tyä, koska tällöin lämpöä saadaan otettua talteen savukaasuista.

Lämpöarvo kuvaa poltettavasta polttoaineesta vapautuvan energian määrää polttoaineen massayksikköä kohden. Useimmiten lämpöarvo ilmoitetaan kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona, jonka yksikkö on MJ/kg. Toinen vaihtoehto on ilmoittaa lämpöarvo kalorimetrisenä lämpöarvona. (Motiva 2022b.) Kalorimetrinen lämpöarvo on aina suurempi kuin kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, koska tehollisen lämpöarvon laskennassa otetaan huomioon polttoaineessa olevan kosteuden haihduttamiseen kuluva energiamäärä. Näin ollen kalorimetrinen lämpöarvo ei myöskään vastaa todellista polttoaineesta saatavaa lämpöarvoa. Puun koostumuksen ja puun sisältämien haihtuvien aineiden vuoksi puun lämpöarvo on pienempi kuin turpeen lämpöarvo. (Huhtinen ym. 2004, 43.) Taulukossa 4 on esitetty puupolttoainneiden ja turpeen tyypillisimmät kosteudet sekä teholliset lämpöarvot.

TAULUKKO 4. Puun ja turpeen kosteus sekä tehollinen lämpöarvo (Huhtinen ym. 2004, 38, 45)

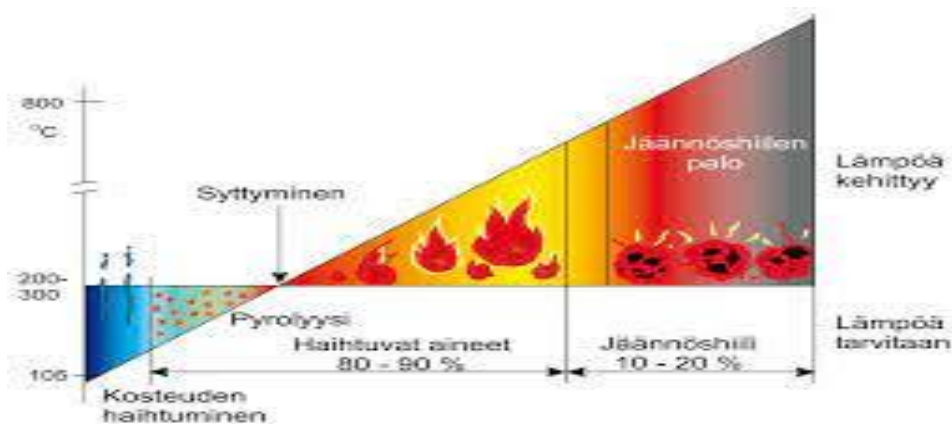
Puun ja turpeen kosteus sekä tehollinen lämpöarvo		
Polttoaine	Kosteus (%)	Tehollinen lämpöarvo (MJ/kg)
Puu	55	19,1
Jyrsinturve	50	20,8

5 PALAMINEN

Voimalaitosten polttoprosessin kannalta merkittäviä asioita ovat polttoaine, palamisilma sekä tarpeeksi suuri lämpötila. Polttoaineen palamista voidaan kuvata reaktiolla, jossa palava aine ja happi reagoivat keskenään muodostaen lämpöä ympäristöön. Kiinteiden polttoaineiden palamisprosessissa polttoaineen sisältämät hiili, rikki, typpi ja vety ovat aineita, jotka saavat polttoaineen palamaan. Edellä mainitut alkuaineet reagoivat palamisilman sisältämän hapen kanssa muodostaen eksotermisiä tai endotermisiä reaktioita. (Huhtinen ym. 2004, 79.) Luvussa tutustutaan kiinteiden polttoaineiden palamiseen sekä palamisessa syntyviin reaktioihin. Luvussa on esitetty myös esimerkki turpeen ja puupolttoaineiden seospoltosta.

5.1 Kiinteiden polttoaineiden palaminen ja palamisreaktiot

Kiinteiden polttoaineiden palaminen tapahtuu yleensä useassa eri vaiheessa. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki puun palamisesta sekä lämpötilan muutoksista palamisprosessin aikana. Palamisprosessi alkaa polttoaineen lämpenemisellä, jolloin siihen sitoutunut kosteus, haihtuvat aineet sekä kaasumaiset komponentit vapautuvat ympäristöön. Ensimmäistä vaihetta voidaan kutsua myös pyrolyysi vaiheeksi, joka kuvaa polttoaineessa olevien haihtuvien aineiden vapautumista. Polttoaineen palamisen seuraavat vaiheet sisältävät polttoaineesta vapautuvien kaasumaisten komponenttien syttymisen sekä palamisen. Kaasumaisten komponenttien palamisessa vapautuu veden höyrystämiseen tarvittava lämpöenergia. Viimeisenä vaiheena on polttoaineen palamisessa muodostuneen jäännöshiilen palaminen. (Huhtinen ym. 2004, 83.)



KUVA 9. Puun palamisprosessi (Alakangas, Erkkilä & Oravainen 2008, 41–42)

Palamisprosessissa polttoaineessa olevat alkuaineet ja palamisilman sisältämä happi muodostaa reagoissaan erilaisia ketjureaktioita. Alla olevissa reaktioissa on kuvattu hiilen, vedyn ja rikin reaktiot hapen kanssa. Reaktioissa on esitetty lähtöaineet ja lopputuotteet, joita voidaan hyödyntää myös tarvittavan palamisilman määrittämisessä sekä muodostuneiden savukaasujen määrittämisessä. Reaktioyhtälö 1 kuvaa hiilen ja hapen välistä reaktiota. Kun hiili palaa täydellisesti, muodostaa se hapen kanssa reagoissaan hiilidioksidia. (Huhtinen ym. 2004, 84.)



Hiili voi palaa myös epätäydellisesti. Epätäydellinen hiilen palaminen tarkoittaa sitä, että reaktiossa on liian vähän happea. Hiilen epätäydellisen palamisen tuotteena muodostuu ympäristölle haitallista hiilimonoksidia (CO). Täydellinen hiilen palamisreaktio tuottaa lämpöä 411 kilojoulea yhtä moolia kohti (kJ/mol). Seuraavissa reaktioyhtälöissä on esitetty vedyn ja rikin palamisreaktiot. Vedyn reagoissa hapen kanssa syntyy reaktion tuotteena vesihöyryä ja reaktiossa vapautuu lämpöä 242 kilojoulea yhtä moolia kohti (kJ/mol). Rikin ja hapen reaktio muodostaa haitallista rikkidioksidia, josta muodostuu lämpöä 9,2 kilojoulea yhtä moolia kohti (kJ/mol). (Huhtinen ym. 2004, 84.)



5.2 Polttoaineiden koostumuksen ja ominaisuuksien vaikutus palamiseen

Polttoaineiden koostumuksella sekä fysikaalisilla ja kemiallisilla ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus polttoaineen palamiseen. Luvussa 4.3.1 todettiin, että kosteus on yksi polttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia. Kosteus vaikuttaa polttoaineen syttymiseen eli mitä kosteampaa polttoaine on, sitä enemmän tarvitaan energiaa kosteuden haihduttamiseen. Kosteuden lisäksi polttoaineen tuhkapitoisuus vaikuttaa palamisprosessiin. Suuri tuhkapitoisuus estää polttoaineen kuiva-aineksen palamisen, jolloin myös polttoaineen lämpöarvo pienenee. Näihin ominaisuuksiin pyritään vaikuttamaan polttoaineen esikäsittelyllä, mutta yksi tapa on myös polttaa polttoainekattilassa turpeen ja puun seospolttoainetta. Seospolttoon tutustutaan seuraavassa luvussa.

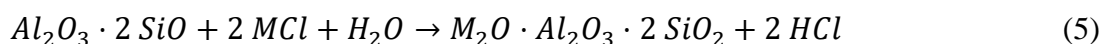
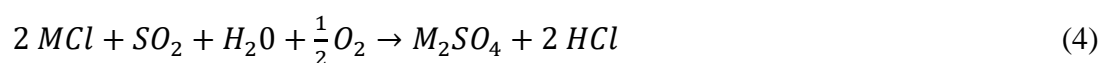
5.3 Turpeen ja puun seospolttu

Seospoltossa polttoainekattilassa poltetaan vähintään kahta eri polttoainetta, kuten esimerkiksi turvetta ja puupolttoaineita. Seospoltolla pyritään ehkäisemään puupolttoaineiden poltosta aiheutuvaa kattilapintojen likaantumista ja korroosiota. Kattilapintojen likaantuminen ja korroosio johtuvat lähinnä puupolttoaineiden sisältämästä kloorista ja alkaleista, jotka jäätyessään kiinnittyvät kattilan tulistinpinnoille. Lisättäessä turvetta puupolttoaineen sekaan, saadaan kattilapintoja suojaavaksi aineeksi rikkiä. Turvetta ja puupolttoaineita poltettaessa turpeen sisältämä rikki sitoo itseensä puupolttoaineiden sisältämiä alkaliklorideja ja ehkäisee näin kloorin kiinnittymisen kattilapintoihin sekä mahdollisen korroosion. (KUVA 10.) Puupolttoaineiden sisältämät alkalit taas vähentävät turpeen sisältämästä rikistä johtuvia päästöjä. Kuvassa 10 on esitetty periaatekuva puun ja turpeen seospoltosta. (Alakangas ym. 2016, 200–201.)



KUVA 10. Periaatekuva puun ja turpeen seospoltosta (Alakangas ym. 2016, 201)

Alla esitetyt reaktiot kuvaavat kattilapintoja suojaavia reaktioita. Puupolttoaineiden sisältämät klooriyhdisteet jakautuvat pääsääntöisesti kaliumklorideihin tai natriumklorideihin, joita on alla olevissa reaktioyhtälöissä merkitty kirjaimella (M). Ensimmäisessä reaktiossa turpeen sisältämä rikki reagoi polttoaineen sisältämän veden, hapen sekä klooriyhdisteiden kanssa muodostaen vetykloridia sekä natrium- tai kaliumhyposulfaattia (REAKTIO 4). Toinen reaktio kuvaa alumiinisilikaatin reaktiota klooriyhdisteiden ja veden kanssa (REAKTIO 5). (Alakangas ym. 2016, 201–202.)



6 SELVITYS VOIMALAITOSTEN RATKAISUISTA TURPEEN KORVAAMISEKSI

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto eli Sitra toteutti vuonna 2020 tutkimuksen, jonka tarkoituksena oli selvittää turpeen roolia ja turpeen energiakäytön vähentämisen vaikutuksia voimalaitoksissa. Tutkimuksessa on esitetty erilaisia vaihtoehtoja turpeen energiankäytön korvaajaksi. Puupohjaiset biopolttoaineet, uusiutuvat energialähteet kuten aurinko-, vesi- ja tuulivoima sekä energiatehokkuuden parantaminen voisivat toimia turpeen korvaajina. Turpeen korvaaminen puupohjaisilla polttoaineilla sekä turpeen nopea alasajo aiheuttaa kuitenkin erilaisia polttoteknisiä ongelmia höyrykattiloille puupolttoaineiden sisältämän kloorin vuoksi. (Auvinen, Heinonen, Johansson, Judl, Karhinen, Kopsakangas-Savolainen, Lehtoranta, Räsänen, Sankelo, Savolainen, Sederholm & Soimikallio 2020, 66,69.) Luvuissa 6.1 ja 6.2 on esitetty esimerkkejä ratkaisuista, joilla voimalaitokset pyrkivät korvaamaan turpeen ja ehkäisemään polttoainekattilan likaantumista ja korroosiosta sekä näistä aiheutuvia ongelmia.

6.1 Turpeen korvaaminen alkuainerikillä tai puupohjaisilla biomassoilla

Useissa Suomen voimalaitoksissa turpeen aikakausi alkaa olla ohitse turpeen poltosta aiheutuvien päästöjen vuoksi ja näin ollen turpeelle etsitään aktiivisesti korvaajaa. Oulun Energian voimalaitoksilla turvetta pyritään korvaamaan erilaisilla puupohjaisilla biomassoilla sekä kierrätyspolttoaineella. (Oulun Energia 2022.) Myös Raumalla sijaitsevassa Pohjolan Voiman ja Rauman Energian omistamalla biovoiman voimalaitoksella on aloitettu fossiilisten polttoaineiden korvaaminen. Biovoiman voimalaitoksella on suoritettu erilaisia koeajoja auringonkukan siemenien kuoripelletillä sekä puusta saatavalla bioligniinillä. Koeajoilla pyritään selvittämään kyseisten polttoaineiden soveltuvuutta fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi. (Pohjolan Voima 2021.)

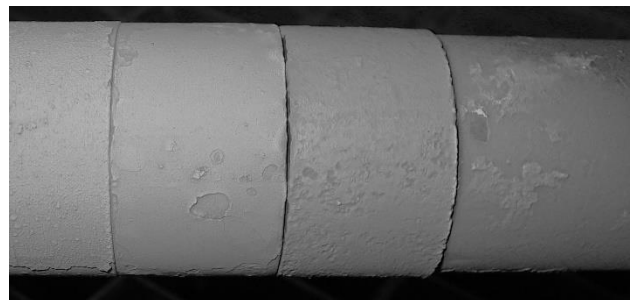
Suomessa sekä Ruotsissa on muutamia voimalaitoksia, jotka käyttävät rikkigranulaattia turpeen korvaajana. Kun turpeen osuutta seospoltossa vähennetään ja tilalle syötetään rikkigranulaattia, toimii se samalla tavalla kuin turve, korroosiolta ja likaantumiselta suojaavana aineena. (Haho 2021, 1.) Liekissä ja Forssassa sijaitsevat Nevel Oy:n voimalaitokset ovat korvanneet turpeen rikkigranulaatilla, jonka vuoksi laitoksille on investoitu rikinsyöttölaitteistot. Syötettävän rikkigranulaatin määrä on riippuvainen kattilaan syötettävän polttoaineen massasta ja polttoaineseoksen puu-turvesuhteesta. Lisäksi rikkimäärään vaikuttaa polttoaineeseen sitoutunut kloorin ja mahdollisen rikin määrä. Nevel Oy:n omistamat voimalaitokset ovat polttoaineteholtaan 30 ja 70 megawatin voimalaitoksia, joissa polttoainekattilaan syötettävä rikkimäärä on noin 0,4–10 kg/h. riippuen edellä mainituista tekijöistä. (Vähä-

Savo 2022.) Ruotsissa sijaitseva Krafringen Energi Lund on myös yksi niistä voimalaitoksista, jotka käyttävät rikkiä turpeen korvaamiseen. Kyseisellä voimalaitoksella rikkiä syötetään polttoainekattilaan noin 10–30 kg/h. (Heinikainen 2019, 45–46.)

6.2 Ammoniumsulfaatin ruiskutus polttoainekattilaan

Vattenfall AB:n tytäryhtiö ChlorOut Ab on patentoinut kattilapintojen korroosiota ehkäisevän tekniikan, jossa ammoniumsulfaattia ((NH₄) SO₄) ruiskutetaan polttoainekattilaan. Kattilaan ruiskutettu ammoniumsulfaatti reagoi savukaasuissa olevien alkalikloridien kanssa samalla tavalla kuin rikki. Ammoniumsulfaatin ja alkalikloridien välisen reaktion tuotteena muodostuu vähemmän haitallisia alkalisulfaatteja. Ammoniumsulfaatilla on myös positiivinen vaikutus polttoprosessissa syntyviin typpipäästöihin. (Vattenfall 2022.)

Kattilaan ruiskutettavan ammoniumsulfaatin määrä voidaan määrittää IACM (In-situ Alkali Chloride Monitor) tekniikan avulla. IACM-järjestelmää käytetään savukaasuissa olevien alkalikloridien pitoisuuksien sekä typpipäästöjen mittaamiseen. Savukaasuissa olevien kalium- ja natriumkloridien yhtenlaskettujen pitoisuuksien mukaan säädellään ruiskutettavan ammoniumsulfaatin määrää. Kyseistä menetelmää käytetään esimerkiksi Ruotsissa ja Saksassa sijaitsevilla voimalaitoksissa (Vattenfall 2022). Kuvissa 11 & 12 on esitetty ammoniumsulfaatin vaikutus kattilapintojen korroosion ehkäisyssä. Kuva 11 esittää biomassan ja muovijätteen seospoltosta aiheutunutta korroosiota ilman ammoniumsulfaattia. Kuvassa 12 polttoaineseos on sama, mutta polttoainekattilaan on ruiskutettu ammoniumsulfaattia korroosion ehkäisemiseksi. (Vattenfall 2022.)



KUVA 11 & 12. Biomassan ja muovijätteen seospolton aiheuttama korroosio tulistinpinnalla sekä ammoniumsulfaatin lisäys poltettaessa samaa polttoaineseosta (Vattenfall 2022)

7 VOIMALAITOS POWERIN RIKINSYÖTTÖJÄRJESTELMÄ

Kokkolan Energian voimalaitoksilla katseet ovat kääntyneet jo tulevaisuuteen, jossa turpeen käytöstä luovutaan ja siirrytään uusiin vähäpäästöisimpiin ratkaisuihin. Tällä hetkellä voimalaitos Powerilla käytetään polttoaineena jrsinturvetta sekä männystä ja kuusesta saatavia biopohjaisia puupolttoaineita. Voimalaitos Powerilla turpeesta luopuminen tarkoittaa käytännössä sitä, että puun ja turpeen seospoltossa turpeen osuutta vähennetään ja turpeen sisältämä rikki korvataan rikkigranulaatilla. (Leskinen 2022.)

Voimalaitos Powerille on investoitu rikinsyöttöjärjestelmä turpeen vähentämisen vuoksi. Rikinsyöttöjärjestelmällä annostellaan polttoaineen sekaan rikkigranulaattia, joka korvaa turpeesta saatavan rikin. Rikki saapuu voimalaitokselle suurissa säkeissä, joita varten tarvitaan myös säkkien vastaanottoasema. Vastaanottoasema koostuu tyhjennysasemasta, alipainesäiliöstä, alipainepuhaltimesta, puhdistusjärjestelmästä ja keskussuodattimesta. Voimalaitokselle asennettavan rikinsyöttöjärjestelmän on toimittanut Sumitomo SHI FW. (Leskinen 2022.)

7.1 Rikin syöttö polttoainekattilaan

Rikkigranulaatti kulkeutuu suursäkeistä pneumaattisesti annostelulaitteistolle, joka annostelee rikkiä polttoainekuljettimien kautta polttoainekattilaan. (Leskinen 2022.) Kun turvetta vähennetään seospoltossa, vähenee myös polttoaineessa oleva rikin määrä ja korroosioriski kasvaa. Rikkigranulaattia syöttämällä, voidaan kuitenkin korvata tarvittava rikkimäärä. Annosteltavan rikkigranulaatin määrään vaikuttaa seospolttoaineen massa ja polttoaineseoksen puu-turvesuhde. Lisäksi tulee ottaa huomioon polttoaineeseen sitoutuneiden rikin ja kloorin molaarinen suhde eli puhutaan S/Cl-suhteesta. (Vähä-Savo 2022.)

7.2 Rikin ja kloorin molaarinen suhde

Rikin ja kloorin molaarista suhdetta voidaan kuvata S/Cl-indeksillä. S/Cl-indeksin avulla voidaan määrittää seospolttoaineeseen tarvittava turpeen ja puupolttoaineen osuus, jotta vältetään kattilapintojen korroosiolta sekä suurilta rikkipäästöiltä. (Alakangas ym. 2016, 202.) Luvussa 4.2 käsiteltiin turpeen ja puun seospolttoa sekä seospolton aikana tapahtuvia reaktioita. Reaktiossa 4 on esitetty rikin ja kloorin

välinen reaktio, jonka mukaan yksi mooli rikkiä pystyy hajottamaan kaksi moolia klooria. Tällöin rikin ja kloorin molaariseksi suhdeluvuksi saataisiin 0,5.

Reaktion 4 mukainen S/Cl-suhde on kuitenkin vain teoreettinen suhdeluku. Vuonna 2012 tehdyn VTT:n tutkimuksen mukaan rikin ja kloorin välinen turvallinen suhdeluku olisi 3 (Aho 2012). Myöhemmin on kuitenkin todettu, että rikin ja kloorin välinen suhdeluku tulisi olla 4–5, jolloin turpeen osuus seospoltossa olisi noin 15–35 %. Suhdeluku vaihtelee eri turve- ja puulajien mukaan. (Alakan-gas ym. 2016, 202.)

7.3 Rikkigranulaatti

Yleisesti rikki on hyvin herkästi syttyvä aine ja rikkipölyn reagoidessaan ilman kanssa rikkipöly muodostaa suuren räjähdysvaaran. Polttoainekattilaan syötettävä rikki voi olla granulaattia tai jauhemaista alkuainerikkiä. Voimalaitos Powerilla rikki tullaan annostelemaan polttoainekattilaan granulaattina. Rikkigranulaatti on raemainen, kiinteä ja kellertävä aine, jota voidaan käyttää esimerkiksi voimalaitoksissa korroosiota ehkäisevänä lisäaineena. Rikkigranulaatin käsittely, varastointi sekä käyttö ominaisuuudet ovat paremmat kuin jauhemaisella alkuainerikillä. Rikkigranulaatti ei ole niin räjähdysherkkä kuin jauhemainen alkuainerikki ja kiinteän rikkigranulaatin varastointi, käsittely sekä kuljetus on turvallisempaa ja helpompaa. (Työterveyslaitos 2022.)

8 LASKENTAMALLIN ESITTELY

Polttoainekattilaan syötettävä rikkigranulaatin määrä voidaan määrittää joko teoreettisesti reaktioyhtälöiden avulla tai kokeellisesti polttoaineen tuhkanäytteiden ja savukaasutietojen perusteella. Turpeesta luopuminen on ajanut Kokkolan Energian voimalaitoksen tilanteeseen, jossa seospoltossa käytettävä turve ja sen sisältämä rikki korvataan rikkigranulaatilla. Rikkigranulaattia ei voi kuitenkaan syöttää saman verran kuin turvetta vähennetään, vaan syötettävän rikkigranulaatin määrä selvitetään tässä opinäytetyössä ainemäärälaskennan avulla. Laskennassa hyödynnetään luvussa 5.2 esitettyä rikin ja kloorin välistä reaktioyhtälöä. Näin ollen laskelmissa käytetään rikin ja kloorin molaarisena suhdelukuna arvoa 0,5. Tässä luvussa tarkastellaan tekijöitä, jotka vaikuttavat polttoainekattilaan syötettävään rikkigranulaatin määrään. Lisäksi luvussa esitellään laskentamalli, jolla voidaan määrittää polttoainekattilaan syötettävä rikkigranulaatin määrä yhtä polttoainekiloa kohden.

8.1 Puun ja turpeen massojen määrittäminen

Useimmissa voimalaitoksissa polttoaineena käytetään turpeen ja puupohjaisten biopolttoaineiden seospolttoainetta. Kun seospolttoaineen sekaan syötetään rikkigranulaattia, täytyy polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrä selvittää huomioiden rikkimäärään vaikuttavat tekijät. Syötettävän rikkigranulaatin määrä on riippuvainen seospolttoaineen massasta, joka voidaan selvittää massavirran avulla. Massavirta on yleensä ilmoitettu yksikössä kg/s. Lisäksi tulee tietää seospolttoaineen sisältämä turpeen- ja puun osuus. Mitä vähemmän seospolttoaine sisältää turvetta, sitä enemmän tulee syöttää rikkigranulaattia. Kun tiedetään polttoainekattilaan syötettävän seospolttoaineen massa ja se, kuinka monta prosenttia seospolttoaineesta on puuta ja turvetta, voidaan turpeen ja puun massa laskea kaavalla 1.

$$m = \frac{x \% \cdot m_{pa}}{100} \quad (1)$$

Jossa x % kuvaa turpeen tai puun osuutta seospolttoaineessa, m_{pa} kuvaa seospolttoaineen massaa, joka ilmoitetaan kilogrammoina ja m kuvaa turpeen tai puun massaa seospolttoaineessa.

8.2 Seospolttoaineen rikki ja kloori

Turpeen ja puun massatietojen ohella polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrä on riippuvainen myös seospolttoaineen sisältämästä rikistä ja kloorista. Seospolttoaineen sisältämä rikki on suurimmaksi osaksi sitoutunut turpeeseen, ja kloori taas on sitoutunut suurimmaksi osaksi puupolttoaineisiin. Klooria on myös turpeessa ja rikkiä puupolttoaineissa, mutta määrät ovat niin minimaalisia, ettei niitä ole laskennassa huomioitu. Turpeen sekä puupolttoaineiden rikki- ja klooripitoisuudet vaihtelevat turve- ja puulajin mukaan. Turvelajeista jyrshinturpe omaa suuremman rikkipitoisuuden kuin palaturve. Puulajeista kuusi ja mänty ovat puita, jotka sisältävät suurimmat klooripitoisuudet (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 56, 58).

Jotta saadaan selvitettyä polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrä, täytyy selvittää turpeeseen sitoutunut rikin määrä ja puuhun sitoutunut kloorin määrä. Rikin ja kloorin määrät saadaan selvitettyä turpeen ja puun massojen sekä kloori- ja rikkipitoisuuksien avulla. Kun tunnetaan turvelaji, rikkipitoisuus ja turpeen massa seospolttoaineessa, voidaan kaavalla 1 laskea seospolttoaineen sisältämä rikin määrä kilogrammoina. Seospolttoaineen sisältämä kloorin määrä voidaan laskea kaavalla 2, kun tunnetaan puun massa seospolttoaineessa, käytettävä puulaji ja sen klooripitoisuus.

$$m_{cl} = c_{cl} \cdot m_{puu} \quad (2)$$

Jossa c_{cl} on puupolttoaineen sisältämä klooripitoisuus yksikössä mg/kg, m_{puu} on seospolttoaineen sisältämä puupolttoaineen massa kilogrammoina ja m_{cl} on puupolttoaineen sisältämä kloorin massa kilogrammoina. Rikin ja kloorin massoja tarvitaan, jotta seuraavassa vaiheessa pystytään ratkaisemaan kyseisten aineitten ainemäärät.

8.3 Ainemäärä ja moolimassa

Alkuaineet ja yhdisteet koostuvat erilaisista rakenneosista, joiden lukumäärää kuvataan ainemäärällä. Ainemäärän yksikkönä käytetään yleisesti moolia (mol). Moolimassa taas kertoo tietyn alkuaineen massan yhtä moolia kohden. Kaikille alkuaineille on ilmoitettu jokaiselle ominainen moolimassa kemian jaksollisessa järjestelmässä yksikössä g/mol. (Hänninen, Karppinen, Leskelä & Pohjakallio 2019, 40–41.) Esimerkiksi rikin moolimassa on 32,06 g/mol ja kloorin moolimassa on 35,45 g/mol. Ainemäärä on riippuvainen aineen massasta sekä moolimassasta (KAAVA 3).

$$n = \frac{m}{M} \quad (3)$$

Jossa m on aineen massa, M on aineen moolimassa ja n on aineen ainemäärä.

Tässä opinnäytetyössä ainemäärien laskennassa hyödynnetään polttoainekattilassa tapahtuvaa rikin ja kloorin välistä reaktiota (REAKTIO 4). Kun tunnetaan reaktioon osallistuvat aineet ja toisen aineen ainemäärä, voidaan reaktioon osallistuvan toisen aineen ainemäärä selvittää alla olevalla kaavalla (KAAVA 4). Tässä tapauksessa reaktioon osallistuvat tunnetut aineet ovat rikki ja kloori. Lisäksi tulee tietää reagoivien aineiden välinen moolisuhde.

$$n = k \cdot n \quad (4)$$

Jossa k on reagoivien aineiden välinen suhdeluku ja n kuvaa reaktioon osallistuvien aineiden ainemäärää. Kaavalla 4 saatu ainemäärä kertoo tunnettuun reaktioon tarvittavan aineen ainemäärän, jotta reaktio pysyy tasapainossa.

8.4 Rikkigranulaatin määrä

Ennen varsinaisen rikkigranulaatin massavirran määrittämistä, täytyy selvittää, kuinka paljon rikkigranulaattia tarvitaan polttoainekattilaan. Kyseinen rikkigranulaatti määrä on riippuvainen edellisessä luvussa (8.3) selvitetystä rikin ainemäärästä sekä rikin moolimassasta (KAAVA 5).

$$m_{s2} = n \cdot M \quad (5)$$

Jossa n on rikin ainemäärä, M on rikin moolimassa ja m_{s2} on rikkigranulaatin massa. Saatu vastaus kertoo siis sen rikkigranulaatin massan, joka tarvitaan reagoimaan polttoainekattilassa olevan kloorin kanssa ja siten ehkäisemään mahdollista korroosioriskiä. Kun tiedetään, polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin massa ja turpeen sisältämän rikin massa, voidaan määrittää polttoainekattilaan sekunnissa syötettävän rikkigranulaatin määrä (KAAVA 6).

$$m_{s3} = m_{s2} - m_{s1} \quad (6)$$

Jossa m_{s1} kuvaa turpeen sisältämän rikin massaa kiloina, m_{s2} kuvaa rikkigranulaatin massaa kiloina ja m_{s3} kuvaa polttoainekattilaan sekunnissa syötettävän rikkigranulaatin määrää kiloina.

Kaavalla 6 saadaan ratkaistua sekunnissa syötettävä rikkimäärä, jolla voidaan korvata turpeen sisältämä rikki. Tämä voidaan ilmoittaa myös yksikössä kg/h kaavan 7 avulla.

$$\dot{m}_{s2} = \dot{m}_{s1} \cdot 3600 \quad (7)$$

Jossa \dot{m}_{s1} kertoo polttoainekattilaan sekunnissa syötettävän rikkigranulaatin määrän ja \dot{m}_{s2} kertoo polttoainekattilaan tunnissa syötettävän rikkigranulaatin määrän. Rikkigranulaattimäärät on ilmoitettu kilogrammoina.

8.5 Yhtä puupolttoainekiloa kohden tarvittava rikkigranulaattimäärä

Laskentamallin esittelyn perusteella voidaan havaita, että polttoainekattilaan syötettävä rikkimäärä on riippuvainen seospolttoaineen massasta, seospolttoaineen sisältämästä turpeesta ja puusta sekä puupolttoaineeseen sitoutuneesta kloorista. Voidaan ajatella, että voimalaitoksella turpeen käytöstä luovutaan kokonaan, jolloin polttoainekattilaan syötetään vain puupolttoainetta. Kun turvetta ei käytetä ollenkaan, voidaan olettaa myös, ettei polttoainekattilaan mene rikkiä polttoaineen mukana. Voimalaitoksella käytettävä puupolttoaine on kuusesta ja männystä koostuvaa haketta, jolloin klooripitoisuuden keskiarvoksi saadaan 1799,5 mg/kg. Haketta syötetään polttoainekattilaan sekunnissa 1 kg. Hakkeessa oleva kloorimäärä saadaan kaavasta 2.

$$m_{cl} = \frac{1799,5 \frac{mg}{kg} \cdot 1kg}{1\,000\,000} = 0,0017995 \approx 0,0018 \text{ kg}$$

Kaavassa 2 lukua miljoona käytetään, jotta saadaan milligrammat muutettua kilogrammoiksi. Eli 1 kg puupolttoainetta sisältää 0,0018 kg klooria. Seuraavaksi tulee selvittää kyseisen kloorimäärän ainemäärä, kloorin massaa ja moolimassaa hyödyntämällä. Luvussa 8.3 on mainittu kloorin moolimassa, joka on 35,45 g/mol eli 0,03545 kg/mol.

$$n_{cl} = \frac{0,0018 \text{ kg}}{0,03545 \frac{kg}{mol}} = 0,0508 \text{ mol}$$

Kun kloorin ainemäärä tiedetään, voidaan selvittää rikin ainemäärä (KAAVA 4). Rikin ja kloorin moolarisena suhdelukuna käytetään arvoa 0,5, joka selviää reaktiosta 4. Tästä voidaan jo päätellä, että rikin ainemäärä tulee olla puolet kloorin ainemäärästä.

$$n_s = 0,5 \cdot 0,0508 \text{ mol} = 0,0254 \text{ mol}$$

Kaavalla 4 saatu vastaus kertoo, kuinka paljon rikkiä tarvitaan reagoimaan polttoainekattilassa olevan kloorin kanssa. Kun tunnetaan tarvittavan rikin ainemäärä sekä moolimassa, voidaan selvittää polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin massa. (KAAVA 5). Luvussa 8.3 on annettu rikin moolimassa, joka on 32,06 g/mol eli 0,03206 kg/mol.

$$m_{s2} = 0,0254 \text{ mol} \cdot 0,03206 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0,0008 \text{ kg}$$

Tiedetään, että polttoainekattilaan syötetään sekunnissa 1 kg puupolttoainetta. Tiedetään myös, että kilossa puupolttoainetta on klooria 0,0018 kg. Koska turvetta ei polttoainekattilaan syötetä, voidaan tehdä oletus, ettei myöskään rikkiä polttoainekattilassa ole. Tällöin tulee rikkigranulaattia syöttää polttoainekattilaan sekunnissa 0,0008 kg. Eli rikin massavirraksi saadaan 0,0008 kg/s. Kaavalla 7 voidaan selvittää syötettävä rikkimäärä tunnissa.

$$\dot{m}_{s2} = 0,0008 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s} = 2,9 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Tämä ratkaisu kertoo siis sen rikkigranulaatin määrän, joka tulee syöttää polttoainekattilaan yhtä puupolttoainetta kiloa kohden, kun tiedetään käytettävä puulaji ja sen klooripitoisuus. Kyseisen rikkimäärän tulisi teoriassa ehkäistä alkaliklorideista aiheutuvaa kattilapintojen likaantumista sekä korroosiota. Seuraavassa luvussa on esitetty tulokset voimalaitos Powerin polttoainekattilaan syötettävästä rikkigranulaatin määrästä.

9 RIKKIGRANULAATIN MÄÄRÄ VOIMALAITOS POWERILLA

Tämä luku käsittelee opinnäytetyön tutkimuksellista osuutta, jonka tarkoituksena on selvittää voimalaitos Powerin polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrä, tietyn polttoaineseoksen ja polttoaineen massan mukaan. Nämä tulokset kertovat siis tarvittavan rikkimäärän tiettyä seospolttoaineen massaa kohden, kun tiedetään, kuinka monta prosenttia seospolttoaine sisältää turvetta ja puuta. Saadut tulokset on taulukoitu luvussa 9.2. Laskelmissa on hyödynnetty luvussa 8 esitettyä laskentamallia.

9.1 Lähtötiedot

Voimalaitos Powerin polttoainekattilassa (C5) poltetaan lähinnä jyrshinturpeen ja kuusen sekä männyn seospolttoainetta. Laskelmia varten sain Kokkolan Energialta tiedot polttoaineen massavirrasta aikavälillä 11.12.2022 klo 00.00–23.00 (TAULUKKO 5).

TAULUKKO 5. Voimalaitos Powerin polttoainekattilaan syötettävän seospolttoaineen massavirta (Muokattu lähteestä: Leskinen 2022)

Voimalaitos Powerin polttoainekattilaan syötettävän seospolttoaineen massavirta		
Aika 11.12.2022	K1 (kg/s)	K2 (kg/s)
00.00	6,6	6,6
03.00	6,3	6,3
06.00	6,2	6,2
09.00	6,9	6,9
12.00	6,6	6,6
15.00	6,9	6,9
18.00	7,4	7,4
21.00	7	7
23.00	7,2	7,3
Keskiarvo	6,8	6,8

Voimalaitos Powerilla polttoaine syötetään kattilaan kahdella kolakuljettimella. Molempien kuljettimien kautta, syötetyn polttoaineen massavirran keskiarvo on ollut 11.12.2022 klo 00.00–23.00 6,8 kg/s. Eli polttoaineen massavirran yhteenlaskettu keskiarvo kyseisenä päivänä on ollut 13,6 kg/s. Polttoaineen massavirrasta saadaan selvitettyä sekunnissa käytettävän seospolttoaineen massa, joka on 13,6 kg. Laskelmissa käytettävä seospolttoaineen massa pysyy koko ajan vakiona.

Seospolttoaineen massavirtatietojen lisäksi sain tiedot, siitä kuinka monta prosenttia seospolttoaine sisältää turvetta ja puuta kussakin laskelmassa (TAULUKKO 6). Taulukosta 6 nähdään, että jokaisessa laskelmassa turpeen osuus seospolttoaineessa vähenee kymmenen prosenttia ja päinvastoin puupolttoaineiden osuus kasvaa kymmenen prosenttia. Tästä voidaan päätellä jo se, että syötettävän rikkigranulaatin määrä kasvaa jokaisessa laskelmassa.

TAULUKKO 6. Puun ja turpeen osuus seospolttoaineessa (Leskinen 2022)

Puun ja turpeen osuus seospolttoaineessa (%)		
Laskelma	Puun osuus	Turpeen osuus
1	70	30
2	80	20
3	90	10
4	100	0

9.2 Tulokset

Alla olevissa luvuissa on esitetty taulukkomuodossa tulokset, joista selviää eri polttoaineosuuksille syötettävä rikkigranulaatti määrä. Laskelmissa käytetyt polttoaineseokset ovat 70/30, 80/20, 90/10 ja 100/0, jotka kuvaavat seospolttoaineen puu-turvesuhdetta. (TAULUKKO 6).

9.2.1 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineseos sisältää 70 % puuta ja 30 % turvetta

Ensimmäiseksi lasketaan polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrä, kun seospolttoaineena käytetään 70 % puuta ja 30 % turvetta. Tuloksista käy ilmi, että rikkigranulaattia ei tarvitse polttoainekattilaan syöttää, kun polttoaineseos sisältää 70 % puuta ja 30 % turvetta. (TAULUKKO 7.)

Ensimmäiseksi selvitetään turpeen ja puun massat. Taulukosta 7 nähdään, että 13,6 kg seospolttoainetta sisältää 9,52 kg puupolttoainetta ja 4,08 kg turvetta. Voimalaitos Powerin seospolttoaine sisältää jyrshinturvetta ja kuusen sekä männyn haketta. Laskelmissa on oletettu, että polttoaineessa oleva rikki on sitoutunut ainoastaan turpeeseen ja kloori puuhun. Jyrshinturpeen rikkipitoisuus on 0,22 % ja kuusen sekä männyn yhteenlasketun klooripitoisuuden keskiarvo on 1799,5 mg/kg. Näillä tiedoilla pystyttiin selvittämään seospolttoaineen rikin ja kloorin massat. 9,52 kg puuta sisältää klooria 0,017 kg ja 4,08 kiloa turvetta sisältää rikkiä 0,009 kg. (TAULUKKO 7.)

Rikin ja kloorin massoja hyödyntämällä selvitetään seuraavaksi edellä mainitun kloorimäärän aine-
määrä, joka on 0,482 moolia. Rikin ja kloorin välinen molaarinen suhdeluku voidaan selvittää reaktiosta 4 ja arvoksi saadaan 0,5. Koska rikin ja kloorin välisessä reaktiossa rikkiä on yksi mooli ja klooria kaksi moolia, täytyy rikin ainemäärän olla puolet kloorin ainemäärästä eli 0,241 moolia. Kyseinen moolimäärä rikkiä tarvitaan, jotta rikin ja kloorin välinen reaktio pysyy tasapainossa. Rikin ainemäärän avulla pystyin ratkaisemaan seuraavaksi sen rikin massan, joka tarvitaan reagoimaan taulukossa 7 lasketun kloorimäärän kanssa. Rikkiä tarvitaan polttoainekattilaan 0,0077 kg eli noin 0,008 kg. Polttoainekattilaan syötetään turvetta 30 %, joka sisältää rikkiä 0,009 kg. Näin ollen rikkigranulaattia ei tarvitse syöttää kattilaan, jos seospolttoaine suhde on 70/30. (TAULUKKO 7.)

TAULUKKO 7. Tulokset 1

Rikkigranulaatin määrä, kun seospolttoaineena käytetään 70 % puuta ja 30 % turvetta	
Polttoaineen massa (kg)	13,6
Puun massa (kg)	9,52
Turpeen massa (kg)	4,08
Seospolttoaineen sisältämä kloorin massa (kg)	0,017
Seospolttoaineen sisältämä rikin massa (kg)	0,009
Kloorin ainemäärä (mol)	0,482
Rikin ainemäärä (mol)	0,241
Reaktioon tarvittava rikkimäärä (kg)	0,008
Rikkigranulaatin määrä sekunnissa (kg)	Ei tarvita rikkigranulaattia, koska turpeen sisältämä rikki riittää reagoimaan puupolttoaineessa olevan kloorin kanssa.

9.2.2 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineseos sisältää 80 % puuta ja 20 % turvetta

Seuraavaksi määritetään polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrä, kun seospolttoaineena käytetään 80 % puuta ja 20 % turvetta. Seospolttoaineen massa pysyy samana (TAULUKKO 8). Taulukosta 8 nähdään, että turpeen määrän vähentyessä 10 %:lla, vähenee myös polttoainekattilassa oleva rikin määrä, koska rikki on pääsääntöisesti sitoutunut turpeeseen. Voidaan siis todeta, että syötettävän rikkigranulaatin tarve kasvaa. Kun seospolttoaineen massa pysyy samana, on puun osuus seospolttoaineesta 10,88 kg ja näin ollen turpeen osuudeksi jää 2,72 kg. Tässä puun määrässä klooria on 0,01957 kg eli noin 0,020 kg ja turpeessa on rikkiä 0,00598 kg eli noin 0,006 kg. Eli polttoaineessa on rikkiä

noin 0,003 kiloa vähemmän kuin taulukossa 7 esitettyissä laskelmissa. Rikin ja kloorin ainemäärien perusteella, saatiin sekunnissa syötettävän rikkigranulaatin määräksi 0,00287 kg eli 0,003 kg. Näin ollen rikkigranulaatin massavirta on 0,003 kg/s, kun seospolttoaine sisältää 80 % puuta ja 20 % turvetta.

Rikkigranulaatin massavirta voidaan ilmoittaa myös yksikössä kg/h, jolloin vastaukseksi saadaan 10,8 kg/h. (TAULUKKO 8.)

TAULUKKO 8. Tulokset 2

Rikkigranulaatin määrä, kun seospolttoaineena käytetään 80 % puuta ja 20 % turvetta	
Polttoaineen massa (kg)	13,6
Puun massa (kg)	10,88
Turpeen massa (kg)	2,72
Seospolttoaineen sisältämä kloorin massa (kg)	0,020
Seospolttoaineen sisältämä rikin massa (kg)	0,006
Kloorin ainemäärä (mol)	0,552
Rikin ainemäärä (mol)	0,276
Reaktioon tarvittava rikkimäärä (kg)	0,009
Syötettävä rikkigranulaatin määrä sekunnissa (kg/s)	0,003
Syötettävä rikkigranulaatin määrä tunnissa (kg/h)	10,8

9.2.3 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineseos sisältää 90 % puuta ja 10 % turvetta

Taulukossa 9 on esitetty saadut tulokset polttoainekattilaan syötettävästä rikkimäärästä, kun seospolttoaine sisältää 90 % puuta ja 10 % turvetta. Polttoaineseoksella, jossa turpeen osuus on 10 % eli noin 1,36 kg ja puun osuus 90 % eli 12,24 kg, on myös polttoainekattilassa oleva rikin määrä minimaalinen. Kyseisen polttoaineseoksen sekaan tulee syöttää rikkigranulaattia sekunnissa 0,0070 kg. Näin ollen tunnissa syötettävä rikkimäärä on 25,2 kg. (TAULUKKO 9.)

TAULUKKO 9. Tulokset 3

Rikkigranulaatin määrä, kun seospolttoaineena käytetään 90 % puuta ja 10 % turvetta	
Polttoaineen massa (kg)	13,6
Puun massa (kg)	12,24
Turpeen massa (kg)	1,36
Seospolttoaineen sisältämä kloorin massa (kg)	0,022
Seospolttoaineen sisältämä rikin massa (kg)	0,003
Kloorin ainemäärä (mol)	0,621
Rikin ainemäärä (mol)	0,310
Reaktioon tarvittava rikkimäärä (kg)	0,010
Syötettävä rikkigranulaatin määrä sekunnissa (kg/s)	0,007
Syötettävä rikkigranulaatin määrä tunnissa (kg/h)	25,2

9.2.4 Syötettävä rikkimäärä, kun polttoaineena käytetään pelkästään puuta

Lopuksi selvitetään polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrä, kun polttoainekattilassa poltetaan sata prosenttisesti puupolttoainetta. Luvussa 8.2 esitettiin laskentamalli, jossa selvitettiin yhtä puupolttoainekiloa kohden syötettävä rikkigranulaattimäärä. Luvusta 8.2 selviää, että yhtä puu polttoainekiloa kohden on rikkigranulaattia syötettävä sekunnissa 0,0008 kg eli 2,93 kg tunnissa. Nyt puupolttoaineen osuus on 13,6 kg, joten tarvittava rikkigranulaatin määrä saadaan kertomalla luku 0,0008 puupolttoaineen massalla. Tulokseksi saadaan 0,011 kg, eli rikkigranulaattia tulee syöttää polttoainekattilaan sekunnissa 0,011 kg, kun kattilassa poltetaan 13,6 kg sekunnissa puupolttoainetta. Tunnissa syötettävä rikkigranulaattimäärä on 39,6 kg/h. (TAULUKKO 10.)

TAULUKKO 10. Tulokset 4

Rikkigranulaatin määrä, kun poltetaan 13,6 kg puupolttoainetta	
Syötettävä rikkigranulaatin määrä sekunnissa yhtä puupolttoainekiloa kohden (kg/s)	0,0008
Syötettävä rikkigranulaatin määrä tunnissa yhtä puupolttoainekiloa kohden (kg/h)	2,9
Syötettävä rikkigranulaatin määrä sekunnissa poltettaessa 13,6 kg puupolttoainetta (kg/s)	0,011
Syötettävä rikkigranulaatin määrä tunnissa poltettaessa 13,6 kg puupolttoainetta (kg/h)	39,6

10 YHTEENVETO JA POHDINTA

Turvetta on käytetty voimalaitoksissa energiantuotannon polttoaineena aina 1970-luvulta lähtien. Viime vuosina turve ja sen poltosta aiheutuvat päästöt ovat yhä useammin nousseet otsikoihin negatiivisessa mielessä. Turpeen poltto aiheuttaa suuret hiilidioksidipäästöt suhteessa tuotettuun energiamäärään ja nämä päästöt ovat suuremmat kuin esimerkiksi kivihiilen poltosta aiheutuvat päästöt. Tästä syystä hallitus on päättänyt, että turpeen käyttö energiantuotannossa tulee puolittua vuoteen 2030 mennessä. Päätöksen myötä useimmilla voimalaitoksilla alkaa uusi vähäpäästöisempi aikakausi.

Päästöistä huolimatta turve on tärkeä polttoaine voimalaitoksissa, joissa käytetään turpeen ja hakkeen seospolttoainetta. Turve toimii seospolttoaineessa niin sanottuna suojaolttoaineena kattilapintojen likaantumista ja korroosiota vastaan. Tämän vuoksi voimalaitoksilla joudutaan kartoittamaan uusia vähäpäästöisempiä ratkaisuja, joilla korvata turve ja sen sisältämät polttoainekattilaa suojaavat ominaisuudet. Erilaisten tutkimusten mukaan turve voitaisiin korvata uusiutuvilla energialähteillä, biopohjaisilla puupolttoaineilla tai erilaisilla lisäaineilla.

Kokkolan Energian voimalaitos Powerilla turpeen korvaajaksi on valikoitunut rikkigranulaatti, joka on kiinteä, raemainen ja kellertävä aine. Rikkigranulaattia annostellaan polttoaineen sekaan Sumitomo SHI FW:n toimittamalla rikinannostelulaitteistolla. Polttoainekattilaan annosteltava rikkigranulaatin määrä on lähtökohtaisesti riippuvainen polttoaineen massasta sekä turpeen ja puupolttoaineiden välistä suhteesta.

10.1 Tulosten tarkastelu

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus selvittää, mihin rikinsyöttöjärjestelmää tarvitaan ja miksi polttoainekattilaan täytyy syöttää rikkiä. Lisäksi tehtävänäni oli selvittää tietyn polttoaineseoksen sekaan syötettävän rikkigranulaatin määrä. Itse rikinsyöttöjärjestelmää tarvitaan rikkigranulaatin annostelua varten ja rikkigranulaattia täytyy syöttää polttoainekattilaan tietty määrä, jotta voidaan korvata turpeen sisältämä rikki. Rikkigranulaatti toimii siis turpeen tavoin suojaavana lisäaineena puupolttoaineiden aiheuttamaa kattilapintojen likaantumis- ja korroosioriskiä vastaan.

Polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrän selvityksessä oli otettava huomioon polttoaineseoksen massa, seoksen puu/turve suhde ja polttoaineeseen sitoutunut rikki- ja kloorimäärä. Rikkigranulaatin määrä laskettiin seuraaville puu/turvesuhteille: 70/30, 80/20, 90/10 ja 100/0. Jokaisessa laskelmassa polttoaineseoksen massa pysyi vakiona. Syötettävät rikkigranulaattimäärät edellä mainituille polttoaineseoksille ovat seuraavat: 0 kg/h, 10,8 kg/h, 25,2 kg/h ja 39,6 kg/h. Ensisilmäyksellä voidaan havaita, että turpeen määrän vähentyessä kasvaa myös syötettävän rikkigranulaatin määrä. Saadut tulokset ovat siis teoreettisia ja kertovat sen, kuinka paljon rikkigranulaattia täytyy teoriassa syöttää tietyn polttoaineseoksen sekaan, jotta voidaan ehkäistä puupolttoaineiden aiheuttamaa likaantumisen ja korroosioriskiä. Todellisuudessa polttoaineen massa ei pysy vakiona vaan vaihtelee jatkuvasti, mutta luvussa 8 esitetyn laskentamallin avulla voidaan laskea rikkigranulaattimäärä mille tahansa polttoaineen massalle.

10.2 Pohdinta

Arvioni mukaan saadut tulokset ovat suuruusluokaltaan oikeat, mutta niissä on otettava huomioon muutamia eri tekijöitä, jotka vaikuttavat tulosten luotettavuuteen. Ensimmäinen tulosten luotettavuuteen vaikuttava tekijä on rikin ja kloorin välinen molaarinen suhdeluku. Omissa laskelmissani hyödynsin rikin ja kloorin välistä reaktioyhtälöä, josta sain rikin ja kloorin väliseksi molaariseksi suhdeluvuksi arvon 0,5. Erilaisten VTT:n tutkimusten ja raporttien mukaan edellä mainittu suhdeluku tulisi olla noin 3–5. Jos seospolttoaine sisältää 15–35 % turvetta, tulisi puupolttoaineiden aiheuttama kattilapintojen likaantumisen ja korroosioriski olla lähes olematon eikä ylimääräisiä lisäaineita tarvittaisi. Kun puu-turvesuhde on 70/30 saatiin polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin massavirraksi tässä opinnäytetyössä 0 kg/h. Tällöin siis VTT:n raporteissa mainittu kommentti, ettei lisäainetta tarvita turpeen osuuden ollessa 15–35 %, tukisi tätä tulosta.

Toinen tulosten luotettavuuteen vaikuttava tekijä on puupolttoaineen klooripitoisuus. Tiesin, että voimalaitos Powerilla käytettävä puupolttoaine on kuusen ja männyn haketta. Näin ollen käytin laskelmissa kyseisten puulajien klooripitoisuuden keskiarvoa. Keskiarvoa käytettäessä ei saada aivan tarkkaa arvoa. Lisäksi laskelmissa ei huomioitu turpeeseen sitoutunutta klooria eikä puupolttoaineisiin sitoutunutta rikkiä. Työn voisi toteuttaa myös ottamalla polttoaineena käytettävästä turpeesta ja puupolttoaineesta näytteitä, joiden avulla pystytään määrittämään näytteiden tarkka rikki- ja klooripitoisuus. Käyttämällä näytteistä saatuja pitoisuuksien arvoja ja molaarisena suhdelukuna arvoa 3–5, voisi mielestäni tulosten luotettavuus kasvaa huomattavasti. Itse olen kuitenkin tyytyväinen saatuihin tuloksiin ja siihen, että pystyin tiedostamaan saatuihin tuloksiin ja niiden luotettavuuteen vaikuttavat tekijät.

10.3 Opinnäytetyöprosessi

Tämä opinnäytetyöprosessi sai alkunsa hieman yllättäenkin syksyllä 2022, kun elämäntilanteeni muuttui ja kalenteriin jäi niin sanotusti tilaa opinnäytetyön tekemistä varten. Opinnäytetyöprosessi oli kokonaisuudessaan suunnittelusta loppusanojen kirjoittamiseen asti erittäin mielenkiintoinen ja opettavainen prosessi. Opinnäytetyöni aihe oli erittäin kiinnostava ja itselleni mieluisa, mutta myös haastava ja siksi työtä oli mukava tehdä. Huomasin työn aikana, että yksi tärkeimmistä asioista koko opinnäytetyöprosessissa on itse aihevalinta. Kun aihe on mieluisa, pysyy motivaatio ja kiinnostus työtä kohtaan yllä koko prosessin ajan. Lisäksi opin opinnäytetyöprosessin aikana paljon uusia asioita kuten esimerkiksi sen, että hyvällä ja tarkalla alkusuunnittelulla voi helpottaa työskentelyä ja itse kirjoitusprosessia sekä säästää aikaa.

Opinnäytetyön lähtökohdat olivat hyvät, sillä olin tutustunut jo aikaisemmin Kokkolan Energian voimalaitoksiin työharjoittelun yhteydessä. Lisäksi olin juuri ennen opinnäytetyön aloittamista tutkinut turpeen roolia energiantuotannon polttoaineena ja voimalaitoksiin kohdistuvia vaikutuksia, kun turpeesta luovutaan. Turpeen korvaaminen rikkigranulaatilla oli kuitenkin minulle suhteellisen uusia asiaa. Olin aiemmin kuullut ja lukenut, että tällainen on mahdollista, mutta oli hienoa päästä itse tutkimaan tätä asiaa. Näistä lähtökohdista oli hyvä aloittaa opinnäytetyön työstäminen.

Ennen kirjoitusprosessin alkua ajatukset olivat ristiriitaiset, sillä en ole koskaan ollut kirjoittajatyyppejä. Lähdin liikkeelle teoriaosuuden kirjoittamisesta ja tässä asiassa minua auttoi hyvän rungon suunnittelu ja aiempi tuntemus voimalaitostekniikasta. Teoriaosuudessa perehdyin vastapainevoimalaitoksen ja höyrykattilan toimintaan, voimalaitoksissa käytettävien turpeen ja puupolttoaineiden ominaisuuksiin ja polttoaineen palamiseen. Vaikka nämä asiat olivat itselleni jo melko tuttuja, oli kuitenkin tärkeää perehtyä näihin asioihin kunnolla. Uusina asioina minulle tulivat turpeen korvaaminen lisäaineilla ja seospoltossa tapahtuva reaktio. Teoriaosuutta oli mielenkiintoista kirjoittaa ja se sujui mielestäni sujuvasti ja mutkattomasti.

Opinnäytetyön haastavin osuus oli ehdottomasti laskentaosuus, jossa selvitin polttoainekattilaan syötettävän rikkigranulaatin määrän. Laskelmat perustuivat perusmatematiikkaan ja kemiaan. Haastavuutta tuotti se, etten löytänyt aluksi luotettavaa tietoa kyseisestä aiheesta. Lopulta pääsin laskelmissa kuitenkin alkuun Kokkolan Energian tuotanto- ja kehitysinsinööri Pekka Leskisen avulla. Vaikka las-

kelmien työstäminen oli välillä haastavaa ja vaati pitkiä päiviä, oli se myös todella opettavaista. Lopulta oli hienoa nähdä, että oikeanlaisella asenteella, motivaatiolla ja kovalla työllä voi saada aikaiseksi tällöisen työn ja vastata vaikeisiin kysymyksiin.

10.4 Loppusanat

Opinnäytetyöprosessi opetti minulle kärsivällisyyttä, oikeanlaisen asennoitumisen tärkeyden ja priorisointia. Opin myös sen, että oikeanlaisella asenteella ja motivaatiolla voi saavuttaa hyviä tuloksia ja omat tavoitteensa. Mielestäni opinnäytetyöni onnistui hyvin ja johdannossa esitettyihin tutkimuskysymyksiin vastattiin selkeästi. Vaikka suurimmaksi osaksi työ sujui helposti ja johdonmukaisesti, hiipi loppuvaiheessa mieleeni ajatus siitä, valmistuuko työ suunnitellun aikataulun mukaisesti. Ohjaajieni avulla ja tuella pääsin kuitenkin haluttuun lopputulokseen ja tästä suuri kiitos heille.

Lopuksi haluan kiittää Kokkolan Energiaa yhteistyöstä ja etenkin Kokkolan Energian tuotanto- ja kehitysinsinööri Pekka Leskistä asiantuntevasta ja erinomaisesta toimeksiantajan tehtävästä. Lisäksi haluan kiittää Centrian ammattikorkeakoulun prosessitekniikan lehtori Einar Nystedtiä avusta, asiantuntevasta ja erinomaisesta ohjauksesta koko opinnäytetyöprosessin aikana. Erityiset kiitokset myös puolisololleni ja ystävilleni tuesta sekä tsemppauksesta.

LÄHTEET

- Aho, M. 2012. *Indeksilukujen soveltaminen likaantumisen ja korroosion alun ennustamiseen puu/turve-seoksilla. Osa 1: Sama turve, erilaiset puubiomassat*. Jyväskylä: VTT 2012. Tutkimusraportti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/9797603-Indeksilukujen-soveltaminen-likaantumisen-ja-korroosion-alun-ennustamiseen-puu-turve-seoksilla-osa-1-sama-turve-erilaiset-puubiomassat.html> . Viitattu 3.1.2023
- Alakangas, E., Erkkilä, A. & Oravainen, H. 2008. *Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijälämmitys. Polttopuun tuotanto ja käyttö*. Jyväskylä: VTT 2008. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf> . Viitattu 24.11.2022
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. Tampere: Juvenes Print. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf> . Viitattu 24.11.2022
- Auvinen, K., Heinonen, T., Johansson, A., Judl, J., Karhinen, S., Kopsakangas-Savolainen, M., Lehtoranta, S., Räsänen, S., Sankelo, P., Savolainen, H., Sederholm, C. & Soimikallio, S. 2020. *Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa*. Helsinki: Sitra 2020. Tekninen raportti. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/app/uploads/2020/06/turpeen-rooli-ja-sen-kaytosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa-tekninen-raportti.pdf> . Viitattu 3.1.2023
- Haho, O. 2021. *Turpeen poltosta luopumisen vaikutukset voimalaitosten toimintaan*. Tampere: Tampereen yliopisto. Tekniikan- ja luonnontieteiden tiedekunta. Kandidaatintyö. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202104223278> . Viitattu 20.11.2022
- Heinikainen, A. 2019. *Turpeesta luopuminen Pursiala 1 voimalaitoksessa*. Lappeenranta: Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019041011837> . Viitattu 27.1.2023
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2004. *Höyrykattilatekniikka*. 6., muuttamaton painos. Helsinki: Opetushallitus.
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. *Voimalaitostekniikka*. Keuruu: Opetushallitus.
- Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2019. *Tekniikan kemia*. Painos 14.–15. Helsinki: Edita.
- Kokkolan Energia Oy. 2022a. Yritys. Yrityksen verkkosivut. Saatavissa: <https://www.kokkolanenergia.fi/fi/yritys/> . Viitattu 11.11.2022
- Kokkolan Energia Oy. 2022b. Historia. Yrityksen verkkosivut. Saatavissa: <https://www.kokkolanenergia.fi/fi/yritys/historia/> . Viitattu 11.11.2022
- Kokkolan Energia Oy. 2022c. Yritysesittely. Power Point. Viitattu 12.11.2022
- Kokkolan Energia Oy. 2020. Powerin voimalaitoksen energiatehokkuutta parantavan savukaasulauhduttimen piippu ja lauhdutinosa asennettu. Yrityksen verkkosivut. Saatavissa: <https://www.kokkolanenergia.fi/fi/yritys/ajankohtaista/powerin-voimalaitoksen-savukaasulauhduttimen-piippu-ja-lauhdutinosa-asennettu/> . Viitattu 13.11.2022

Kokkolan Energia Oy. 2021. Kesätyöntekijöiden perehdytys. Power Point. Viitattu 14.11.2022

Leinonen, A. 2010. Turpeen tuotanto ja käyttö: Yhteenveto selvityksistä. Espoo: VTT. Verkkojulkaisu. Saatavissa: <https://www.bioenergia.fi/wp-content/uploads/2020/05/Turpeen-tuotanto-ja-k%C3%A4ytt%C3%B6-yhteenveto-selvityksist%C3%A4-VTT-tiedotteita-2550-.pdf> . Viitattu 24.11.2022

Leskinen, P. 2022. Rikinsyöttöjärjestelmä. Yksityinen sähköposti. 14.12.2022. Viestin saaja Niko Jokelainen.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2022. *Puupolttoaineet energiantuotannossa*. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto> . Viitattu 24.11.2022

Motiva. 2022a. *Energian kokonaiskulutus*. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian-kaytto-suomessa/energian-kokonaiskulutus> . Viitattu 24.11.2022

Motiva. 2022b. *Biopolttoaineiden lämpöarvoja*. Saatavissa: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva-energia/bioenergia/tietolahteita/biopolttoaineiden-lampoarvoja> . Viitattu 24.1.2023

Mäkelä, V-M. & Tuunanen, J. 2015. *Suomalainen kaukolämmitys*. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. Oppimateriaali. Viitattu 22.12.2022

Oulun Energia. 2022. *Oulun Energia katsoo jo turpeen jälkeiseen tulevaisuuteen*. Yrityksen verkkosivut. Saatavissa: <https://www.ouluenergia.fi/ajankohtaista/blogi/ouluenergia-katsoo-jo-turpeen-jalkeiseen-tulevaisuuteen/> . Viitattu 11.12.2022

Pohjolan Voima. 2021. *Pohjolan Voima testaa fossiilisia korvaavia polttoaineita Raumalla*. Yrityksen nettisivut. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/pohjolan-voima-testaa-fossiilisia-korvaavia-polttoaineita-raumalla/> . Viitattu 11.12.2022

Suomen luonnonsuojeluliitto. 2022. *Turve*. Verkkosivut. Saatavissa: <https://www.sll.fi/mita-me-teemme/suot/nain-toimimme/turve/> . Viitattu 28.11.2022

Työterveyslaitos. 2022. Rikki. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/ova/rikki> . Viitattu 29.12.2022

Vattenfall. 2022. ChlorOut. Yrityksen verkkosivut. Saatavissa: https://group.vattenfall.com/what-we-do/business_model/chlorout#reference_plants . Viitattu 29.12.2022

Vähä-Savo, N. 2022. Rikin syöttö. Yksityinen sähköposti. 21.12.2022. Viestin saaja Niko Jokelainen