



Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Kemian tekniikan korkeakoulu
Biotuotetekniikan koulutusohjelma

Juuso Loukola

**SELVITYS PUUPELLETTIEN KÄYTÖN JA VARASTOINNIN
VAIKUTUKSISTA TYÖTERVEYTEEN JA TYÖTURVALLISUUTEEN
VOIMALAITOSALUEELLA**

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 24.06.2015.**

Valvoja

Professori Olli Dahl

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Teemu Nieminen
Diplomi-insinööri Jussi Kukkonen

Tekijä Juuso Loukola

Työn nimi Selvitys puupellettien käytön ja varastoinnin vaikutuksista työterveyteen ja työturvallisuuteen voimalaitosalueella

Laitos Biotuotetekniikka

Professori Ympäristöasioiden hallinta

Professuurikoodi KM3004

Työn valvoja Olli Dahl

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) DI Jussi Kukkonen ja DI Teemu Nieminen

Päivämäärä 24.06.2015

Sivumäärä 75 + 2

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Euroopan Unionissa on asetettu tavoitteita päästöjen vähentämiseksi ja uusiutuvan energian lisäämiseksi. Helsingin kaupungin valtuusto on asettanut entiselle Helsingin Energialle, nykyiselle Helen Oy:lle, tavoitteeksi vähentää 20 % hiilidioksidipäästöjä vuoden 1990 tasosta ja lisätä uusiutuvan osuus 20 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Helen on käynnistänyt kehitysohjelman tämän tavoitteen saavuttamiseksi ja asettanut tavoitteeksi hiilidioksidineutraalintuotannon vuonna 2050.

Puupelleteistä tiedetään haihtuvan merkittäviä määriä hiilimonoksidia ja aldehydejä. Hiilimonoksidia muodostuu tyydyttämättömien rasvahappojen hapettumisreaktiosta. Reaktiomekanismia ei tunneta, mutta sen tiedetään alkavan noin plus viidessä lämpöasteessa ja kiihtyvän lämpötilan noustessa. Tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella hiilimonoksidia haihtui merkittäviä määriä, mutta aldehydipitoisuudet olivat erittäin pieniä.

Salmisaaren voimalaitosalueella suoritettussa työhygieenisessä mittauksessa Työterveyslaitos tutki pellettejä kuljettavan rekan kuljettajan altistumista. Selvityksessä todettiin, että kuljettaja altistui korkeille määrille puupölyä, mutta altistuminen kesti yhteensä vain 11 minuuttia. Selvityksen perusteella altistuminen oli kestoltaan niin lyhyt, joten merkittäviä toimenpiteitä ei nähty tarpeelliseksi.

Puupölyn noustessa ilmaan aiheuttaa se erittäin herkästi räjähtävän seoksen. Puupölyn ja ilman seoksen tarvitsema minimi syttymisenergia on kymmeniä kertoja hiilipölyn vastaavaa pienempi. Tämä tekee puhtaanapidosta erittäin tärkeätä, koska puupölyä ei saa päästä kertymään pinoille. Pölyräjähdystä vastaan hiilimyllyissä voidaan suojautua myös räjähdysen tukahduttamisjärjestelmällä. Se estäisi mahdollisen hiilimyllyssä tapahtuneen räjähdysen aiheuttamasta merkittäviä vahinkoja rakenteisiin ja parantaisi lähellä työskentelevien turvallisuutta.

Automaatiojärjestelmästä kerättyjen havaintojen perusteella hiilimonoksidin muodostuminen siiloissa ei ole kovinkaan merkittävää. Pelleteissä tunnettua itselämpenemistä ei myöskään havaittu tutkimalla siilojen vapaan ilmatilan lämpötilaa. Tutkimuksen perusteella tosin voidaan olettaa, että itselämpenemistä ei kuitenkaan pystytä havaitsemaan tutkimalla vapaan ilmatilan lämpötilaa. Itselämpenemisen havaitsemiseen tarvittaisiin monimutkaisempia siilon ympärillä tai pellettikasan keskelle ulottuvia lämpötilamittareita. Pellettien nopean kiertonopeuden takia niille ei kuitenkaan ole tarvetta.

Tämän tutkimuksen perusteella pellettien poltto tuo monia uusia erityisesti turvallisuuteen liittyviä asioita. Merkittävimpinä näistä on mahdollinen pölyräjähdys. Pelleteissä yleisesti tunnetut kaasujen syntymisen ja itselämpenemisen eivät tämän tutkimuksen perusteella aiheuta tarvetta toimenpiteille.

Author Juuso Loukola

Title of thesis Report on health and safety issues of co-firing wood pellets in CHP-plants

Department Bioproduct Technology

Professorship Environmental Management

Code of professorship KM3004

Thesis supervisor Professor Olli Dahl

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) Jussi Kukkonen, M.Sc. (Tech.) and Teemu Nieminen, M.sc (Tech.)

Date 24.06.2015

Number of pages 75 +2 **Language** Finnish

Abstract

European Union has made decision that member countries need to cut their carbon dioxide emissions and increase the share of renewable energy. Helsinki city council had set goals for Helen Oy (former *Helsingin Energia*) to cut their carbon dioxide emission and increase the share of renewable energy. One way to achieve the goals is to start using biomass.

Wood pellets are known for off-gassing of carbon monoxide and aldehydes. Carbon dioxide is formed through auto-oxidative reaction of fatty acids. Actual reaction mechanism is still unknown. It starts approximately at plus five degrees and rate increases with increasing temperature. Laboratory tests made for this study confirm this theory. A lot of carbon monoxide was emitted from wood pellets, but aldehyde levels were really low.

Occupational health study was made for health hazards for the driver of wood pellet truck. Study showed that high wood dust levels were measured. Driver exposure for high levels of wood dust for 11 minutes during unloading and cleaning. Vacuuming instead of sweeping the pellets would decrease the exposure time a bit. Occupational health institute stated that exposure time is relatively short. No immediate actions need to be taken to decrease the exposure.

Wood dust is really explosive compared to coal dust. Minimum ignition energy of wood dust and air is ten times smaller than minimum ignition energy of coal and air mixture. Cleaning is important to prevent wood dust mixing with air. Explosion suppression system might decrease the damages of a possible dust explosion.

Wood pellets are known for self-heating in storages. Data collected from power plants automation system doesn't show this phenomena. Even though measuring the temperature of headspace is not accurate way to investigate self-heating. More complex temperature measuring methods need to be installed in silos in order to measure self-heating. Wood pellets doesn't play significant role in energy production so such a system doesn't seem necessary. Rotation of wood pellets is also designed to be relatively fast so self-heating doesn't occur in such a short time.

According to this study co-firing of wood pellets in Salmisaari power plant doesn't bring significant new occupational health and safety hazards. Known issues of self-heating and off-gassing can be handled with fast rotation of wood pellets. Best way to minimize the probability of dust explosion is cleaning to minimize the amount of dust

Keywords wood pellet,co-firing, biomass, workplace safety

Alkusanat

Tämä työ toteutettiin Helen Oy:n Energiatoimintojen kehitys -yksikön toimesta. Työn valvojana toimi professori Olli Dahl Aalto-yliopiston kemian tekniikan korkeakoulusta. Työn ohjaajina toimivat Jussi Kukkonen Energiatoimintojen kehityksestä ja Teemu Nieminen HelenEngineeringistä.

Haluan kiittää Helen Oy:tä tästä mahdollisuudesta tehdä diplomityö mielenkiintoisesta ja erittäin tärkeästä aiheesta. Haluan kiittää yksikköäni Energiatoimintojen kehitystä, sekä HelenEngineeringin henkilöstä siitä, että olen saanut tehdä tätä työtä kanssanne. Suuret kiitokset kuuluu ohjaajilleni Jussi Kukkoselle ja Teemu Niemiselle arvokkaista neuvoista ja kiinnostuksesta tätä työtä kohtaan. Haluan kiittää myös Novox Oy:tä ja Työterveyslaitosta tärkeistä tutkimuksista työhöni.

Haluan myös kiittää perhettä ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta koko koulutaipaleen aikana.

Helsingissä 24.6.2015

Juuso Loukola

Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Taustaa.....	1
1.2.	Työn tavoite ja rakenne	3
1.3.	Työn rajaukset.....	3
2.	PUUPELLETIN JA KIVIHIILEN SEOSPOLTTO	5
2.1.	Puun käyttö seospoltossa	5
2.2.	Seospolton hyödyt	7
2.3.	Seospolton ongelmat	8
2.4.	Eri seospolttotavat	9
2.4.1.	Suora seospoltto	9
2.4.2.	Epäsuoraseospoltto	9
2.4.3.	Rinnakkaiseospoltto	10
2.5.	Eri pellettilaadut.....	10
2.5.1.	Valkoinen puupelletti.....	10
2.5.2.	Paahtopelletti.....	11
2.5.3.	Höyrypelletti	12
2.6.	Pellettien valmistus.....	13
2.7.	Pellettien varastointi.....	13
3.	VALKOISTEN PUUPELLETTIEN KÄYTÖN JA VARASTOINNIN TYÖTERVEYSRISKIT	15
3.1.	HTP-arvot	15
3.2.	Haihtuvat yhdisteet.....	15
3.2.1.	Hiilimonoksidi.....	16
3.2.1.1.	Terveyshaitat	17
3.2.1.2.	Muodostuminen ja siihen vaikuttavat tekijät	19
3.2.2.	Aldehydit.....	20
3.2.2.1.	Terveyshaitat	21
3.2.2.2.	Muodostuminen ja siihen vaikuttavat tekijät	22
3.2.3.	Muut.....	23
3.2.3.1.	Biologiset tekijät	23
3.2.3.2.	Orgaaniset hapot	24
3.3.	Puupöly	24
3.3.1.	Pelletin mekaaninen kestävyys.....	24
3.3.2.	Terveysvaikutukset	25
3.3.2.1.	Puupölyn aiheuttamat sairaudet.....	26
3.3.2.2.	Puupölyn karsinogeeniset vaikutukset.....	27
4.	PUUPELLETIN KÄYTÖN JA VARASTOINNIN TURVALLISUUSRISKIT	29
4.1.	Lämpeneminen	29
4.1.1.	Itsesyttyminen	31

4.1.2.	Tulipalon sammuttaminen.....	32
4.2.	Pölyräjähdys.....	32
4.2.1.	Teoriaa pölyräjähdyksestä.....	33
4.2.2.	Räjähdyksen voimakkuuteen vaikuttavat tekijät.....	35
4.3.	Onnettomuudet.....	36
4.3.1.	Häkämyrkytys merikuljetuksessa.....	36
4.3.2.	Tulipalo Tilburyssä Englannissa.....	37
4.3.3.	Pölyräjähdys Tanskassa puupellettitehtaalla.....	38
5.	LABORATORIOANALYYSI – VALKOISISTA PUUPELLETEISTÄ HAIHTUVAT YHDISTEET	40
5.1.	Näytteet.....	40
5.1.1.	Ilomantsi.....	40
5.1.2.	Vilppula.....	41
5.2.	Menetelmät.....	41
5.2.1.	Pelleteistä haihtuvat orgaaniset yhdisteet.....	41
5.2.2.	Pellettien varastoinnista haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet.....	42
5.3.	Tulokset.....	42
5.3.1.	Pelleteistä haihtuvat orgaaniset yhdisteet.....	42
5.3.2.	Pellettien varastoinnista haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet.....	44
6.	PELETTIEN VARASTOINTI SALMISAAREN VOIMALAITOKSELLA.....	47
6.1.	Salmisaaren pellettilaitteisto.....	47
6.2.	Siilon varastotilan analysointia.....	48
6.2.1.	Siilojen lämpötila ja pellettien itselämpeneminen.....	50
6.2.2.	Hiilimonoksidin muodostuminen.....	51
6.2.2.1.	Siilo 1.....	51
6.2.2.2.	Siilo 2.....	54
6.2.2.3.	Yhteenveto ja kehitysehdotuksia.....	55
6.3.	Siilojen teoreettinen hiilimonoksidipitoisuus.....	56
6.4.	Työterveys.....	58
6.4.1.	Pellettikuorman purkaminen.....	59
6.5.	Turvallisuuden parantaminen.....	61
6.5.1.	CO-mittaus.....	62
6.5.2.	Räjähdyksen tukahduttamisjärjestelmä.....	63
6.5.3.	Kantoilman lämpötilan laskeminen.....	64
6.5.4.	Pölyräjähdysten estäminen.....	64
6.5.5.	Pellettierien kosteusmittaus.....	66
6.5.6.	Työturvallisuus.....	67
6.5.7.	Työterveys.....	67
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	68
8.	YHTEENVETO.....	75

LÄHDELUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Runkopuu	Puuaines, joka ei sisällä oksia, juuria tai kuorta
Biomassa	Elollinen materiaali
Tehollinen lämpöarvo	Aineen sisältämä energia, kun palamisen jälkeen aineessa ollut vesi oletetaan vesihöyryksi
Valkoinen puupelletti	Puupelletti, jonka raaka-ainetta ei ole lämpöesikäsitelty. Tarkoittaa yleisesti kotitalouslaatuista pellettiä.
Paahtopelletti	Torrefioimalla paahdettua biomassaa, joka on puristettu pelletin muotoon
Höyrypelletti	Höyryräjäyttämällä esikäsiteltyä biomassaa, joka on puristettu pelletin muotoon
PCFB	Kivihiilipölyä polttava kattila (<i>engl. Pulverized coal-fired boiler</i>)
Hypoksia	Vähentyneestä hapen saannista johtuva keskushermoston hapenpuute
HTP-arvo	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus, Sosiaali- ja terveysministeriön raja-arvot eri ilman epäpuhtauksille
Ototoksinen	Sisäkorvalle myrkyllinen
Karsinogeeninen	Syövälle altistava aine
IARC	Kansainvälinen syöpätutkimus järjestö (<i>engl. International Agency for Research on Cancer</i>)
ACGIH	Yhdysvaltalainen työterveys järjestö (<i>engl. American Conference of Industrial Hygienist</i>)
TTL	Työterveyslaitos

WHO	YK:n kansainvälinen terveysjärjestö (<i>engl. World Health Organization</i>)
Adheesio	Kahden eri aineen välinen vetovoima
Koheesio	Aineen sisäinen vetovoima
Alveoli	Keuhkorakkula
PPM	<i>engl. Parts per million</i>
Hygroskooppisuus	Kyky imeä ilmasta kosteutta
p.p.	Painoprosentti
Endotoksiini	Gramnegatiivisen bakteerin ulkokalvon myrkkyaaine, joka aiheuttaa esim. kuumetta
Aldehydi	Yhdisteet, jotka sisältävät karbonyyliryhmän
SNCR	Käytetään typenoksidien vähentämiseen voimalaitoksissa (<i>Selective Non-Catalytic Reduction</i>)
Kuivajää	Hiilidioksidin kiinteä olomuoto
Genotoksinen	Aine, joka vaurioittaa geneettistä informaatiota
Epidemiologia	Lääketieteen ala, jossa tutkitaan tautien esiintyvyyden suhdetta vaaratekijöihin käyttäen hyväksi tilastollista aineistoa.

YHDISTEET

CO	Hiilimonoksidi
CH ₄ O	Metanoli
CH ₂ O ₂	Muurahaishappo
CH ₂ O	Formaldehydi eli metanaali
C ₆ H ₁₄	Heksaani
C ₆ H ₁₂ O	Heksanaali
C ₅ H ₁₀ O	Valeraldehydi eli pentanaali
CH ₄	Metaani
H ₂ S	Rikkivety

1. JOHDANTO

1.1. Taustaa

Uusiutuvan energian lisääminen energiantuotannossa on poliittisen paineen alla. Biomassan käyttö lasketaan hiilidioksidineutraaliksi polttoaineeksi ja nykyiset Euroopan Unionin ilmastopoliittiset päätökset yrittävät ajaa energiayrityksiä kohti hiilineutraalia energiantuotantoa. Euroopan unioni on päättänyt, että vuoteen 2020 mennessä EU:n kokonaisenergiasta 20 % tulisi olla uusiutuvista lähteistä, kasvihuonekaasupäästöjä tulee pudottaa 20 % vuoden 1990 tasosta ja energiatehokkuutta tulee lisätä 20 %. Tätä kutsutaan niin sanotuksi 20–20–20 – tavoitteeksi. Suomelle on määrätty tavoitteeksi nostaa uusiutuvan energian käyttö 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Biomassan käytön lisäämisellä on merkittävä rooli tämän tavoitteen saavuttamisessa.

Euroopan Unioni päättää tänä vuonna uudesta 2030 – paketista Pariisin ilmastokokouksessa. Uudessa paketissa on esitetty jokaiselle jäsenmaalle sitovaa päästövähennystavoitetta: -40 % vuoden 2005 tasosta. Uusiutuvan energian tavoitteeksi on asettumassa 27 % Euroopan Unionin kulutuksesta, mutta jäsenmaakohtaisista tavoitteista luovuttaisiin.

Biomassan käyttöön liittyy kuitenkin monia teknistaloudellisia ongelmia, kuten huonompi energiatiheys ja siitä aiheutuva kuljetuskustannusten nousu. Erilaisilla esikäsittelymenetelmillä pyritään pienentämään biomassan kosteusprosenttia ja näin lisäämään energiatihelyttä. Yksi tällainen vaihtoehto on biomassan kuivaus ja puristaminen tiheämpään muotoon eli biomassan pelletöinti. Tämä vähentää biomassan kosteutta ja samalla nostaa energiatihelyttä, joka pienentää kuljetuskustannuksia.

Helsingin kaupunginvaltuusto hyväksyi Helsingin kaupungin energiapoliittiset linjaukset tammikuussa 2008. Silloisen Helsingin Energian (nykyinen Helen Oy) täytyy vuonna 2020 tuottaa 20 % energiasta uusiutuvilla energiamuodoilla ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta. Helsingin Energia käynnisti

tähän liittyen kehitysohjelman, jolla päästäisiin tavoitteeseen. Kehitysohjelmassa tähdätään hiilidioksidineutraaliin tulevaisuuteen, joka saavutettaisiin viimeistään vuonna 2050. Kaupunginvaltuusto hyväksyi silloisen Helsingin Energian kehitysohjelman joulukuussa 2010.

Kehitysohjelman ensimmäisessä vaiheessa puupelletin poltto kivihiilen rinnalla aloitettiin Salmisaaren voimalaitos alueella tammikuussa 2015 ja Hanasaassa vastaavasti vuoden 2016 alusta. Tavoitteena on, että pelleteillä tuotetun energian määrä on noin 5 - 7 % kivihiililaitosten kokonaisenergiantuotannosta.

CLEEN on suomalainen energia- ja ympäristöalan yhtiöiden SHOK-keskittymä (*Strategisen huippuosaamisen keskittymä*). CLEENin missio on saattaa energia- ja ympäristömarkkinoilla Suomen kilpailukyky kansainväliselle huipputasolle. Siihen kuuluu yhteensä 28 yritystä ja 18 instituutiota. CLEENillä on yhteensä kahdeksan eri tutkimusohjelmaa, joista BEST (*Sustainable Bioenergy Solutions for Tomorrow*) on yksi. Tämä työ on osa BEST – tutkimushanketta.

Suomessa on korkea osaaminen bioenergia-alalla. BEST-tutkimushankkeen visio on tuoda toimijat yhteen. Hankkeen tavoitteena on myös edistää bioenergian käyttöä ja luoda uusia ratkaisuja bioenergiasektorille. Ohjelmassa halutaan luoda uutta ja kestävä bioenergialiiketoimintaa Suomeen ja ulkomaille.

Suomessa monet ajattelevat biomassan olevan uusiutuvaa ja täysin puhdasta. Biomassaa on käytetty Suomessa kotien lämmittämiseen vuosisatojen ajan. Ihmisille on tullut mielikuva turvallisesta ja puhtaasta kotimaisesta polttoaineesta. Puupelletin käyttö ja varastointi suuressa mittakaavassa on kuitenkin vasta alkamassa. Tosiasiassa puupelletin käyttöön ja varastointiin liittyy monenlaisia vaaroja ja terveydellisiä riskejä. Näistä suurimmat liittyvät pelleteistä haihtuviin yhdisteisiin kuten hiilimonoksidiin, joka voi johtaa ilman hapen määrän merkittävään vähenemiseen ja aiheuttaa pahoinvointia ja huimausta. Puupölylle altistumisen tiedetään lisäävän allergisia oireita sekä lisäävän joidenkin erittäin harvinaisten syöpien riskiä. Puupölyn tiedetään myös ilmaan sekoittuessa olevan erittäin räjähdysherkkää.

(Helen, 2014)

1.2. Työn tavoite ja rakenne

Helen kuuluu työterveyslaitoksen Nolla tapaturmaa – foorumiin, minkä tavoitteena on edistää työturvallisuutta ja vähentää työtapaturmien määrää. Pellettien seospolton aloittaminen kivihiiuvoimalaitoksilla tuo paljon uusia haasteita liittyen työterveys- ja turvallisuus asioihin. Nämä johtuvat puun erilaisesta rakenteesta, minkä takia puun käyttö ja varastointi voimalaitoksilla eroaa merkittävästi kivihiiulestä.

Tässä tutkimuksessa tutkitaan kirjallisuudesta mitä haittoja ja vaaroja pellettien käytöstä tiedetään syntyvän. Kirjallisuuden tuloksia tutkitaan laboratoriossa käyttäen Salmisaaren voimalaitoksella käytettäviä puupellettejä. Laboratoriotuloksista saatuja havaintoja verrataan käytännön olosuhteisiin Salmisaarella ja samalla tutkitaan ovatko teoreettiset riskit mahdollisia myös käytännön olosuhteissa. Käytännön työterveysriskejä kartoitetaan Työterveyslaitoksen suorittamalla mittauksilla liittyen pellettien purkuun. Se on ainut työvaihe, jossa ihminen on aina läsnä. Pölyäminen on myös merkittävä juuri purettaessa, koska pelletit tippuvat rekasta syöttötaskuun ja niihin kohdistuu mekaaninen rasitus.

Työn tärkeimpänä tavoitteena on käydä läpi riskit työntekijöiden terveyteen ja turvallisuuteen liittyen, jotta voidaan välttyä tapaturmilta. Jokaisella on oikeus ja velvollisuus lähteä töistä yhtä terveenä kuin ovat sinne tulleetkin. (Helen, 2014)

1.3. Työn rajaukset

Tässä työssä käsitellään valkoisen puupelletin turvallisuus- ja terveysvaikutuksia Salmisaaren voimalaitosalueella. Tällä hetkellä käytössä on kaksi pellettisiiloa, mutta tätä tutkimusta voidaan soveltaa myös, mikäli pelletin seospolton osuutta lisätään merkittävästi.

Tällä hetkellä käytetään ainoastaan valkoista puupellettiä, joten työ rajataan käsittelemään sitä. Lämpökäsitellyt puupelletit eroavat merkittävästi valkoisista

pelleteistä joten, työn havaintoja ei voida suoraan siirtää lämpökäsiteltyihin pelletteihin ilman jatkotutkimusta.

Työssä keskitytään Salmisaaren voimalaitosalueeseen, mutta monia käytäntöjä voi soveltaa myöhemmin myös muilla voimalaitoksilla, koska pellettien käyttö ja varastointimenetelmät vastaavat hyvin toisiaan.

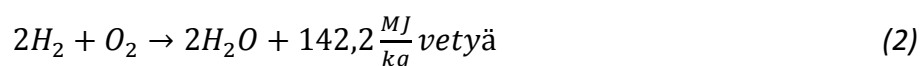
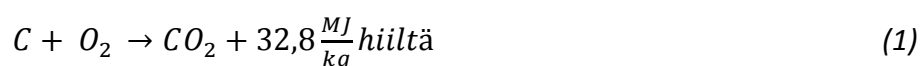
2. PUUPELLETIN JA KIVIHIILEN SEOSPOLTTO

Pellettien käyttö kivihiilen rinnalla seospoltossa on monilta osin mielenkiintoinen tutkimuksen kohde johtuen pellettien rakenteesta ja koostumuksesta. Pelletit koostuvat monista pienistä partikkeleista ja näin ollen teoriassa ne pystytään jauhamaan hiilimyllyissä ja polttamaan kivihiilen rinnalla pölykattiloissa. (Bergman, 2005) Puupellettien seospolttoa kivihiilivoimalaitoksissa tukee suhteellisen pienet investoinnit, koska vanhoja polttoaineen käsittelyjärjestelmiä pystytään hyödyntämään puupellettien poltossa. (Koppejan & Van Loo, The handbook of Biomass Combustion & Co-Firing, 2008)

Seospoltolla pystytään käyttämään hyväksi vanhan voimalaitoksen infraa ja polttoaineen käsittelyjärjestelmiä. Tämä mahdollistaa biomassan polttamisen aloittamisen verrattain pienillä investoinneilla. Lisäinvestoinneilla pystytään kasvattamaan biomassan osuutta entisestään. Suurissa hiilivoimaloissa on myös korkea hyötysuhde, mikä mahdollistaa pienienkin biomassa osuuden polton korkealla hyötysuhteella.

2.1. Puun käyttö seospoltossa

Puun energiasisältö riippuu sen kemiallisesta koostumuksesta. Mitä enemmän puussa on hiili- ja vety-yhdisteitä sitä suurempi on sen lämpöarvo. Hiili- ja vety-yhdisteisiin on sitoutunut auringon energiaa. Poltettaessa suljetussa tilassa, kuten kattilassa, voidaan tämä energia kerätä talteen. Selluloosa sisältää hiiltä 44,4 % ja vetyä 6,2 %. Vastaavasti ligniinissä on hiiltä 64,3 % ja vetyä 5,9 %. Poltettaessa energiaa vapautuu kaavojen yksi ja kaksi mukaisesti:

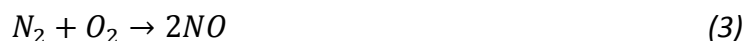


Kokonaishiilipitoisuus havupuilla on 51 % ja vastaavasti lehtipuilla 49 %, vetypitoisuus vastaavasti 6,2 % ja 6,0 %. Havupuut sisältävät enemmän korkean lämpöarvon uuteaineita, minkä takia tehollisissa lämpöarvoissa ei ole merkittävää eroa. (Knuuttila, 2003)

Puussa on myös muita aineita, jotka huonontavat sen lämpöarvoa, kuten typpeä ja erilaisia mineraaliaineita. Määrällisesti tärkeimpiä mineraaleja ovat kalsium, kalium, fosfori ja magnesium. Ne alentavat kukin osuutensa mukaisesti puunlämpöarvoa.

Typen hapettuminen lisää NO_x – päästöjä. Puussa typpeä on noin 0,1 – 0,4 %, mutta lehdissä jopa 1 – 2 %. Erityisesti leppälehdet sisältävät huomattavan paljon typpeä, koska se pystyy käyttämään hyödyksi ilmakehästä saatavaa typpeä. Hiileen verrattuna runkokuussa on merkittävästi pienempiä määriä typpeä, hiilen typpipitoisuus on noin 0,8 – 1,2 %. Pelkkä typen määrä ei kerro kuitenkaan NO_x – päästöjen suuruutta, vaan siihen vaikuttaa erityisesti myös polttoaineen palaminen ja lämpötila. Puunpoltolla voidaan savuttaa pienemmät NO_x – päästöt, mikäli polttimet ja kattila soveltuvat puunpolttoon.

Typenoksidi voi muodostua kahdesta eri lähteestä, polttoilman molekyylytypestä tai orgaanisesta tyyppistä eli polttoaineen tyyppistä. Polttoilman molekyylytppi muodostaa typenoksideja reaktioketjun avulla, jonka happimolekyyli käynnistää. Reaktiota kutsutaan sen keksijän mukaan Zeldovichin mekanismiksi. Tätä kutsutaan yleisesti termiseksi typenoksidiksi. (Raiko;Saastamoinen;Hupa;& Kurki-Suonio, 2002, ss. 304-306)



Polttoaineessa typpeä on huomattavasti vähemmän kuin polttoilmassa, mutta se on huomattavasti reaktiivisempaa. Pyrolysoituessa osa polttoaineen tyyppistä vapautuu ja muodostaa pienimolekyyllisiä HCN ja NH₃ yhdisteitä. Hapen läsnä ollessa yhdisteet hapettuvat edelleen typpimonoksidiksi. Tällä reaktiolla muodostuvia typenoksideja kutsutaan polttoaineen typenoksideiksi. (Raiko;Saastamoinen;Hupa;& Kurki-Suonio, 2002, s. 308)

Puun polton merkittävä ongelma on kloori. Puuaineksessa ei ole klooria merkittäviä määriä, mutta metsähakkeessa, joka sisältää neulasia sitä voi olla hyvinkin paljon. Kloori muodostaa alkaaliklorideja kalsiumin ja kaliumin kanssa kattilassa. Alkaalikloridit kasaantuvat tulistin pinnoille aiheuttaen hapetus- ja

korroosioreaktioita. Natriumin ja kaliumin kanssa muodostuneen kloridiseoksen alin ensisulamispiste on 515 °C astetta. Tulistaminen pintalämpötila ylittää tämän, minkä takia yhdisteet kertyvät tulistin pinnoille aiheuttaen korroosiovaurioita. (Raiko;Saastamoinen;Hupa;& Kurki-Suonio, 2002, s. 286)

Ongelmaa voidaan kiertää käyttämällä runsasrikkisiä polttoaineita, koska alkalit reagoivat mieluummin rikin kuin kloorin kanssa. Tällöin kloori muodostaa suolahapon (*HCl*) vedyn kanssa ja siirtyy savukaasujen mukana pois kattilasta. Näin ollen haitallisia alkaliklorideja ei muodostu kattilassa, eikä niitä pääse kertymään kattilan eri pinnoille. (Knuuttila, 2003) Suolahappo päästöt voivat nousta haasteeksi, jos EU hyväksyy uudessa LCP BREF dokumentissaan niille päästöarvot. Hiilivoimalaitoksille on ehdotettu päästörajaksi 1 – 5 mg/Nm³. (European Commission, 2013, s. 755)

2.2. Seospolton hyödyt

Biomassa lasketaan hiilidioksidineutraaliksi polttoaineeksi. Kasvaessaan biomassa sitoo saman määrän hiilidioksidia kuin mitä poltettaessa vapautuu. Kasvihuonekaasupäästöjä syntyy kuitenkin kuljetuksesta ja esikäsitteystä, mutta niitä ei oteta laskuissa huomioon. Biomassan käytöllä pystytään tehokkaasti vähentämään laskennallisia hiilidioksidipäästöjä. Laskeneet hiilidioksidipäästöt laskevat päästöoikeuteen käytettyjä kustannuksia.

Biomassa sisältää vähemmän rikkiä ja typpeä kuin kivihiili. Seospoltto osuuden kasvattaminen vähentääkin SO₂ - ja teoriassa myös NO_x -päästöjä. (Wang, ym., 2011) NO_x – päästöihin vaikuttaa paljon muitakin asioita kuin polttoaineen typpipitoisuus, joten suoraa päästövähennemää ei välttämättä saada biomassaa lisättäessä (Dayton, 2002).

Monissa maissa biomassan rinnakkaispoltto on helpoin tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä ja samalla riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Tällöin pystytään lisäksi hyödyntämään vanhojen hiililaitosten korkeaa hyötysuhdetta, ilman merkittäviä investointeja (Koppejan & Van Loo, The handbook of Biomass Combustion & Co-Firing, 2008)

2.3. Seospolton ongelmat

Biomassa sisältää paljon alkaleja ja klooria. Seospoltto osuuden kasvaessa nämä aiheuttavat merkittävää kuonaantumista ja korroosiota kattilassa ja tulistinputkilla. Kuonaantuminen huonontaa lämmönjohtoa, mikä laskee voimalan hyötysuhdetta ja aiheuttaa näin ollen taloudellisia tappioita. (Wang, ym., 2011)

Hiilivoimaloiden lentotuhkaa käytetään yleisesti sementtiteollisuudessa. Yhdysvaltalainen ASTM kuitenkin kieltää biomassan lentotuhkan käytön. Euroopan komissio taas sallii biomassan tuhkan käytön. (Wang, ym., 2011) Puupelletin lisääminen kivihiilen joukkoon voi huonontaa hiilen jauhaantumista, mikä lisää palamattoman hiilen osuutta lentotuhkassa. Mikäli palamattoman hiilen osuus ylittää 5 p-% sen eteenpäin myynti sementtiteollisuuteen vaikeutuu, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia voimalaitoksille. (Grönroos, 2013)

Poliittiset päätökset biomassan hiilidioksidineutraaliuteen saattavat vaikuttaa merkittävästi biomassan käytön tulevaisuuteen. Biomassan on poliittisella päätöksellä päätetty olevan hiilidioksidineutraalia ja biomassalla tuotetut päästöt lasketaan päästökaupassa nollapäästöiksi eli niille ei tarvitse ostaa päästöoikeuksia. Päätös liittyy oletukseen, että poltettaessa biomassaa siitä vapautuu saman verran hiiltä kuin se on sitonut itseensä kasvaessaan.

Biomassan hiilineutraaliuden poistaminen on kuitenkin noussut Euroopan Unionissa esille. RED-direktiivi (*Renewable Energy Directive*) ei tällä hetkellä määrittele kestävyyskriteereitä biomassalle, jota käytetään sähkön ja lämmön tuotantoon. Tämä voi kuitenkin muuttua vuoden 2020 jälkeen. Komissio on ehdottanut kestävyyskriteerejä kiinteille ja kaasumaisille biomassoille. Tällä hetkellä ainoastaan nestemäisillä biopolttoaineilla on kestävyyskriteerit, jotka pitää saavuttaa jotta biopolttoaine lasketaan nollapäästöiseksi. Käytännössä tämä koskee ainoastaan lentoliikennettä, koska maakuljetukset ovat Euroopan Unionin päästökaupan ulkopuolella. (European Environmental Bureau, 2015) Mikäli muille biomassoille tulee kestävyyskriteerit vuoden 2020 jälkeen, saattaa se muuttaa biomassan käyttöä sähkön ja lämmön tuotannosta.

2.4. Eri seospolttotavat

Suurin osa maailmalla poltettavasta biomassasta poltetaan suurissa kivihiilipölykattiloissa, joiden kaltaisia ovat myös Salmisaaren ja Hanasaaren voimalaitosten kattilat. Pölykattiloiden seospoltto voidaan jakaa kolmeen eri alakategoriaan: suoraan, epäsuoran ja rinnakkaiseen seospolttoon. (Koppejan & Van Loo, The handbook of Biomass Combustion & Co-Firing, 2008)

2.4.1. Suora seospoltto

Suorassa seospoltossa biomassaa syötetään suoraan kivihiilen joukkoon, jolloin biomassaa jauhetaan samoissa hiilimyllyissä ja poltetaan samoissa polttimissa. Tämä on erittäin yleinen tapa seospoltolle, kun käytetään suhteellisen pieniä biomassaa osuuksia. Toinen tapa on tehdä erilliset polttoaineen käsittelyjärjestelmät hiillelle ja biomassalle. Jauhettu biomassa johdetaan sitten samoihin polttimiin kivihiilen kanssa. Biomassaa voidaan polttaa myös erillisissä polttimissa. Tämä vaatii suuremmat investoinnit laitoksiin, mutta se myös mahdollistaa suuremmat biomassaosuudet. (Koppejan & Van Loo, The handbook of Biomass Combustion & Co-Firing, 2008)

2.4.2. Epäsuoraseospoltto

Epäsuorassa seospoltossa biomassaa kaasutetaan erillisessä kaasuttimessa, minkä jälkeen tuotekaasu johdetaan kivihiilikattilaan. Tuotekaasun lämpöarvo ei ole kovin hyvä ja riippuu erityisesti biomassan kosteuspitoisuudesta. Epäsuoran seospoltton investointi on suhteellisen suuri. Kaasuttimen asentaminen poistaa kuitenkin tarpeen rakentaa erillinen käsittely- ja jauhaminen biomassalle. Tekniikan suurimpana ongelmana on tuotekaasun likaisuus ja mahdollinen puhdistaminen ennen seospolttoa kattilassa. Suurimmat likaantumisen aiheuttajat ovat ammoniakki ja terva.

Itävallassa Zeltwegin voimalaitoksella tuotekaasua käytetään vähentämään typenoksideja. Tuotekaasu syötetään kattilaan yläosista, mikä mahdollistaa polttoaineen uudelleen palamisen vähentäen syntyviä typenoksideja. Kaasun käyttö myös vähentää SNCR-järjestelmän ammoniumhydroksidin kulutusta 10 – 15 %. Tuotekaasu vastaa kuitenkin vain 3 % koko voimalaitoksen polttoainetehosta. (Koppejan & Van Loo, The handbook of Biomass Combustion & Co-Firing, 2008)

Suomessa Vaskiluodon 2 voimalaitoksella on asennettu biomassan kaasutin vanhan kivihiiuvoimalan yhteyteen. Voimalaitoksen kokonaispolttoainetehto on 615 MW, josta kiertoleijupetikaasuttimen maksimiteho on 140 MW. Kaasuttimen pääraaka-aine on puubiomassa, kuten metsähake. Myös pieniä määriä muita biomassoja, kuten turvetta voidaan käyttää kaasuttimessa. Biomassa kuivatetaan ennen kaasuttamista erillisessä biomassan kuivurissa. Lopulta kaasutuksesta saatu tuotekaasu johdetaan kivihiiulikattilaan, jossa se poltetaan omissa polttimissaan. (Pohjolan Voima, 2015)

2.4.3. Rinnakkaisseospolttto

Rinnakkaisseospoltossa biomassalle rakennetaan erilliset polttoaineen käsittelyjärjestelmät ja erillinen kattila. Poltosta tullut höyry johdetaan sitten samaan järjestelmään hiilikattilasta tulevan höyryn kanssa. Tällöin käytetään hyväksi vanhaa höyrypiiriä ja turbiinia. Menetelmä vaati kuitenkin huomattavan suuret investoinnit, mutta mahdollistaa eri tuhkevrat biomassalle ja hiillelle. (Koppejan & Van Loo, The handbook of Biomass Combustion & Co-Firing, 2008)

2.5. Eri pellettilaadut

Pellettejä on monia erilaisia, aina biomassasta valmistetuista puupelleteistä eläinrehuksi valmistettuihin pelletteihin. Tässä työssä keskitytään valkoisen pelletin ominaisuuksiin. Valkoisella puupelletillä on vakiintuneet markkinat ja sitä on saatavilla voimalaitosten vaatimia suuria määriä. Eri pellettilaaduilla pelletöintiprosessi on sama, ainoastaan raaka-aineen esikäsittelyt eroavat toisistaan. Puupelletit voidaan jakaa kolmeen erilaiseen: valkoiseen, paahdettuun ja höyryräjäytettyyn puupellettiin.

2.5.1. Valkoinen puupelletti

Tässä työssä puupelletillä tarkoitetaan puusta valmistettua Euroopan Union standardin 17225–2:2014 mukaista A1-luokan puupellettiä. A1-luokan puupelletti on valmistettu kemiallisesti käsittelemättömistä puutähteistä tai runkopuusta, mikä ei sisällä oksia, juuria tai kuorta. A1-luokan puupellettiä käytetään yleisesti eiteollisuuskohteissa, tämän takia sitä kutsutaan joskus ns. kotitalouslaaduksi. Sen

ominaisuuksissa täytyy ottaa huomioon, että sen yleisissä käyttölaitteissa ei ole säätöjärjestelmiä eikä savukaasupuhdistimia, käyttäjät eivät ole ammattilaisia ja laitteistot sijaitsevat asutusalueella. (EU, Standardi EN 14961-2, 2011) (EU, Standardi EN ISO 17225-2, 2014).

Euroopan Unionin standardi 14961-2 määrittelee A1-luokan puupelletille saapuessa asiakkaalle kosteusprosentiksi alle 10 p- % pelletin märkätainosta. Pelletin tehollisen lämpöarvon tulisi olla yli 16,5 MJ/kg ja alle 19 MJ/kg sekä tiheyden yli 600 kg/m³.

Pellettien lämpöarvoon vaikuttaa sen kemiallinen koostumus. Puussa olevien uuteaineiden lämpöarvo on 35 MJ/kg. Vastaavasti ligniinin lämpöarvo on 25 – 27 MJ/kg ja selluloosan vain 17 MJ/kg. (Ståhl, 2008) Pelletit valmistetaan useimmiten havupuusta, mikä sisältää lehtipuita vähemmän ligniiniä, mutta vastaavasti enemmän uuteaineita. Näin ollen samassa kosteudessa olevat pelletit ovat lämpöarvoltaan käytännössä toisiaan vastaavia, eikä puulajeilla ole käytännön merkitystä lämpöarvoon. (Thek & Obernberger, 2012) (EU, Standardi EN 14961-2, 2011)

Havupuuta on materiaalina parempi pellettien valmistukseen kuin lehtipuu. Pelkästä lehtipuusta tehdyt pelletit ylittävät monesti EN-standardin mukaisen tuhkan määrän. Lehtipuusta on myös vähemmän ligniiniä kuin havupuusta. Näin ollen lehtipuusta valmistetut pelletit eivät ole niin kestäviä ja hajoavat helpommin. Lehtipuusta valmistetut pelletit lisäävät pelletöinnin energiankulutusta. Lehtipuu on materiaalina havupuuta tiheämpää, jolloin sen puristaminen vaatii enemmän energiaa. (Thek & Obernberger, 2012)

2.5.2. Paahtopelletti

Paahtopelletti valmistetaan torrefioimalla puuta ja pelletöimalla paahtettu biomassa. Paahtopelletti on poltto-ominaisuuksiltaan parempaa kuin perinteinen puupelletti. Sen tiheys ja tehollinen lämpöarvo ovat suuremmat, 750 – 850 kg/m³ ja 19 – 22 MJ/kg. (Bergman, 2005) Näin ollen sen energiatiheys on huomattavasti parempi, mikä mahdollistaa taloudellisemman kuljettamisen ja varastoinnin, koska vastaava energia määrä mahtuu pienempään tilaan.

Torrefioinnissa puuta (tai muuta biomassaa) paahdetaan hapettomissa olosuhteissa noin 200 – 300 celsiusen lämpötilassa. Prosessissa syntyy tummaa hiilen kaltaista tuotetta, sekä kondensoituvia ja ei-kondensoituvia kaasuja. Kondensoituvia kaasuja on muun muassa vesi, orgaaniset yhdisteet ja lipidit. Osa kaasuista pystytään käyttämään prosessin lämmöntuotantoon, jolloin kokonaishyötysuhde nousee merkittävästi. Torrefioinnissa säilyy noin 90 % puun energiasta ja noin 70 % massasta. Torrefioinnin jälkeen jäljelle jäänyt kiinteä osuus voidaan puristaa pelletin muotoon. (Tumuluru;Sokhansanj;Hess;Wright;& Boardman, 2011)

2.5.3. Höyrypelletti

Höyrypelletti valmistetaan höyryräjäyttämällä biomassaa ennen pelletöintiä. Höyryräjäytyksen on kehittänyt W.H. Mason vuonna 1924. Menetelmän ensimmäinen sovellus oli lastulevyjen valmistus. (Jacquet;Maniet;Vanderghem;Delvigne;& Richel, 2015). Höyryräjäytyksessä biomassaa käsitellään kuumalla höyryllä, jonka lämpötila on noin 180 – 240 astetta ja paine on noin 10 – 35 baaria. Lopuksi paine vapautetaan äkillisesti mikä aiheuttaa biomassan kuiturakenteen hajoamisen. Riippuen lämpötilasta ja esikäsittelyn kestosta höyryräjäytyksellä saadaan jopa kuidut irtoamaan toisistaan tai vastaavasti vain vähän pehmentynyttä puuainesta. Höyryräjäytystä on alun perin käytetty hajottamaan puun kuiturakennetta, mikä on parantanut sokerien ja muiden aineiden saantia jatkokäsittelyyn, kuten biokaasun tai etanolin valmistukseen. Menetelmää on myös käytetty esikäsittelyssä tekemään sellua paperiteollisuuteen (Lam, 2011). (Stelte, 2013)

Höyryräjäytystä voidaan käyttää myös esikäsittelyssä ennen pelletöintiä. Höyryräjäytetty pelletti on kestävämpi kuin tavallinen pelletti. Tämä johtuu esikäsittelyprosessissa soluseinistä irronneesta pehmenneestä ligniinistä. Ligniini sekoittuu itse pelletöintiprosessissa puupartikkeleiden pinnalle, mikä antaa pelletille paremman mekaanisen kestävyuden ja heikentää sen veden imukykyä. Esikäsittely parantaa pellettien lämpöarvoa, koska höyryräjäytyksessä hiilen suhteellinen määrä kasvaa samalla kun happea ja typpeä poistuu. Höyryräjäytetty pelletti on hydrofobisempi kuin esikäsittelemätön biomassaa, johtuen vähentyneiden OH-

ryhmien määrästä. OH-ryhmä mahdollistaa vesimolekyylien kiinnittymisen biomassaan ja aiheuttaa näin sen hygroskooppisuuden. (Stelte, 2013)

2.6. Pellettien valmistus

Pellettien valmistus voidaan jakaa kahteen päävaiheeseen, käsittelyyn ja pelletöintiin. Ensiksi pellettien raaka-aineesta tulee poistaa epäpuhtaudet, kuten kivet, metallit ja muovit. Tämän jälkeen raaka-aine johdetaan esikuivuriin. Monesti sahanpurun kosteusprosentti voi olla jopa yli 50 %, jolloin se kuivataan esikuivurissa optimi kosteuteen, joka on 10 – 15 %. Kuivauksen jälkeen raaka-aine johdetaan vasaramyllylle, missä se jauhetaan hienoksi puupölyksi.

Käsittelyvaiheen jälkeen siirrytään itse pelletöintiin. Pelletti valmistetaan puristamalla puupöly puristinrullien avulla matriisin reikien läpi. Matriisi voi olla joko reikälevy eli tasomatriisi tai rei'itetty sylinteri eli rengasmatriisi. Puristuksessa puun lämpötila nousee, mikä aiheuttaa mm. ligniinin pehmenemisen. Matriisin ominaisuudet vaikuttavat olennaisesti lämmön syntymiseen, esimerkiksi reikien pituus, halkaisija ja kitkaominaisuudet. Matriisin jälkeen leikkuuterät leikkaavat pelletin oikean mittaiseksi, yleensä 10 – 30 mm pituisiksi. Pelletöinnissä voidaan lisätä lisäaineita kuten maissitärkkelystä. Lisäaineen tarkoituksena on pienentää pelletöinnissä kuluvaa energiaa ja parantaa pelletin mekaanista kestävyyttä. (Thek & Obernberger, 2012)

Puristuksesta tulevat kuumat pelletit ovat verrattain heikkoja ja ne tulee jäähdyttää, jotta ne saavat lopullisen lujuutensa. Lopuksi pelletit kuljetetaan täryseulan läpi, millä erotetaan ylimääräinen hienoaines. Valmistusprosessi on samanlainen kaikille pelleteille. (Bioenergia, 2014)

2.7. Pellettien varastointi

Puupellettien varastointiin tulee kiinnittää erityistä huomiota, johtuen puupelletin hygroskooppisuudesta eli taipumuksesta imeä ilman kosteutta itseensä. Pellettien hygroskooppisuudesta johtuen avovarastointi ei sovi puupelletille, vaan tarvitaan kiinteä varasto, missä puupelletit eivät pääse imemään kosteutta itseensä.

Puupellettien tiedetään myös lämpenevän itseksensä, mikä tulee ottaa huomioon varastointia suunniteltaessa.

Valkoisten A1-luokan puupellettien yleisin varastointimuoto on silo tai A-lato. Kosteuden lisääntyessä pelletin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. Pelletit alkavat hajota takaisin sahanpuruksi, jos niiden kosteusprosentti ylittää 12 % (Guo, 2013). Kosteuden lisääntyessä pelletit alkavat turvota ja muuttua puuromaiseksi. Tämä vaikeuttaa pellettien käsittelyä ja kuljettamista. Se voi myös aiheuttaa tukoksia kuljettimilla ja siilossa.

Torrefioitu biomassa hylkii vettä, mutta tarkemmat testit torrefioiduille pelleteille puuttuvat. Japanilainen tutkimusryhmä oli testannut torrefioitujen pellettien hygroskooppisia ominaisuuksia upottamalla torrefioituja pellettejä 200 tunniksi veteen. Pelletit pitivät muotonsa, mutta olivat menettäneet täysin kovuutensa. Tämän takia pellettien jauhaantuminen oli erittäin huonoa. Torrefioitu materiaali itsessään ei imenyt vettä, vaan pellettien pinta. Vesi pääsi pelletin sisällä raoista ja koloista, mikä aiheutti huonon jauhautumisen. Torrefioidut pelletit voidaankin purkaa sateessa esim. laivasta, mutta avokasassa niitä ei voida varastoida. (Deutmeyer, ym., 2012)

Höyryräjäytys lisää pellettien mekaanista kestävyttä. Höyryräjäytetyistä kuiduista valmistettu lastulevy oli myös hydrofobisempi kuin ilman esikäsitteilyä. Tämä johtuu plastisoituneen ligniinin itsekiinnittymisestä. Höyryräjäytyksen jälkeen on suhteellisesti enemmän ligniiniä sitomaan partikkeleita yhteen. Nämä lisäävät höyryräjäytetyn pelletin kestävyttä verrattuna valkoisen pellettiin. (Lam, 2011)

3. VALKOISTEN PUUPELLETTIEN KÄYTÖN JA VARASTOINNIN TYÖTERVEYSRISKIT

Tässä luvussa käsitellään valkoisista puupelleteistä varastoitaessa haihtuvia kaasuja ja niiden muodostumista sekä näiden yhdisteiden terveysvaikutuksia. Puupellettejä tehdään monista eri puulajeista. Johtuen puun biologisesta alkuperästä kirjallisuuden tulokset ovat joskus täysin erilaisia tai joskus jopa ristiriidassa keskenään.

3.1. HTP-arvot

HTP-arvot eli haitalliseksi tunnetut pitoisuudet, ovat Sosiaali- ja terveysministeriön antamia raja-arvoja työpaikan hengitysilman epäpuhtauksista ja mahdollisesta altistumisesta niille. Työnantajan tulee ottaa HTP-arvot huomioon työn vaaroja selvitettyä ja arvioitaessa työpaikan ilman puhtautta. Tämän lisäksi on viisi ainetta, joille on annettu sitovat raja-arvot. Mikäli työntekijä altistuu näitä suuremmille pitoisuuksille, on työnantajan välittömästi ryhdyttävä toimiin pitoisuuksien laskemiseksi. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2014)

HTP-arvoja on HTP_{15min} ja HTP_{8h} – arvot, ne kuvaavat suurinta sallittua pitoisuutta jolle saa altistua joko 15 minuutin tai kahdeksan tunnin aikana. Arvot kuvaavat pienimpiä pitoisuuksia, joilla saattaa olla vaikutusta tai haittaa työntekijän terveydelle, lisääntymisterveydelle tai turvallisuudelle. HTP-arvot eivät ota huomioon työntekijöitä, joille altistuminen raja-arvoa pienemmillekin pitoisuuksille voi olla vakavaa, kuten astmaatit ja raskaana olevat naiset. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2014)

3.2. Haihtuvat yhdisteet

Puupelleteistä haihtuu monia yksihiilisiä yhdisteitä, joista useimmat ovat terveydelle vaarallisia suurina pitoisuuksina. Näitä ovat esimerkiksi hiilimonoksidi, metanoli, muurahaishappo ja formaldehydi eli metanaali. Myös muita yhdisteitä kuten erilaisia aldehydejä, pääasiassa heksanaalia ja pentanaalia, haihtuu varastoinnin yhteydessä. (Svedberg;Högberg;Högberg;& Galle, 2004)

Puupelletit voivat hajota kemiallisesti ja biologisesti. Kemiallinen hapettuminen kiihtyy lämpötilan noustessa. Biologisen hajoamisen oletetaan saavuttavan huippunsa jossakin lämpötilassa, minkä jälkeen bakteerit ja sienet kuolevat, mikä johtaa biologisen hajoamisen loppumiseen. Tarkkaa lämpötilaa ei tiedetä, koska biologisen hajoamisen loppuessa kemiallinen hajoaminen kiihtyy. Biologista hajoamista esiintyy märissä biopolttoaineissa, kuten hakkeessa. (Kuang X. , ym., 2008)

Lämpötilalla on suuri vaikutus pelleteistä syntyviin kaasuihin. Lämpötilan noustessa sekä haihtuvien määrä että tasapainotila nousevat. Tasapainotila tarkoittaa sitä määrää, jolloin haihtuvaa yhdistettä ei enää haihdu enempää, vaan systeemi on saavuttanut tasapainon. Happea sisältäville haihtuville yhdisteille on yhteistä vapaan tilan vaikutus kaasujen haihtuvuuteen. Vapaa tila pellettisiilossa lisää vapaana olevan hapen määrää, mikä kiihdyttää pellettien hapettumista ja lisää hiilimonoksidin ja -dioksidin muodostumista. Myös kosteuden kasvu kasvattaa päästökerrointa. Kosteuden kasvulla ei kuitenkaan ole yhtä merkittävää merkitystä päästökertoimeen kuin lämpötilan nousulla. (Kuang X. , ym., 2009)

Mikäli metallipölyä pääsee kosketuksiin puupölyn kanssa saattaa se aiheuttaa katalyyttisen vaikutuksen puupölystä syntyviin kaasuihin ja itselämpenemiseen. Tämä johtaa korkeampiin kaasupitoisuuksiin ja voimakkaampaan itselämpenemiseen. (Thek & Obernberger, 2012)

3.2.1. Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidi on täysin väritöntä, hajutonta ja mautonta kaasua. Se on hieman ilmaa kevyempää, minkä seurauksena hiilimonoksidi nousee aina ylöspäin. Ihminen ei pysty aisteillaan havaitsemaan hiilimonoksidia, mikä tekee siitä erityisen vaarallista. (WHO, 2000) Puhekielessä kaasuja, jotka sisältävät pääasiassa hiilimonoksidia kutsutaan yleensä nimellä *häkä*.

Hiilimonoksidin LEL-arvo (*Lower explosive limit*) on 12,5 %. Tämä tarkoittaa, että jos hiilimonoksidin pitoisuus ilmassa on alle 12,5 %, se ei voi syttyä tai räjähtää, vaikka olisi syttymislähde. Puupelleteistä ei ole koskaan tavattu haihtuvan näin suuria

määriä eli haihtunut hiilimonoksidi ei aiheuta räjähdys- tai tulipalo riskiä. (Koppejan, ym., 2013) Kohonneet hiilimonoksidi arvot voivat olla peräisin myös itselämpenemisen aiheuttamasta kydöstä kasan sisällä.

3.2.1.1. Terveyshaitat

Hiilimonoksidin vakavimmat terveysvaikutukset johtuvat kyvystä syrjäyttää hapen veren hemoglobiinissa ja siitä seuraavasta hapen puutteesta johtuvasta hypoksiasta. Se tarkoittaa vähentyneestä hapensaannista johtuvaa keskushermoston hapenpuutetta. Hiilimonoksidi voi myös itsessään vahingoittaa suoraan kudoksia. (WHO, 2000)

Erityisesti suuresti happea käyttävät elintoiminnot voivat vaurioitua hypoksiasta, tällaisia ovat mm. aivot, sydän ja sikiö. Vakava hypoksia aiheuttaa sekä lyhyitä, palautuvia neurologisia vaivoja että pysyviä vahinkoja. Vakavien neurologisia oireita ovat muun muassa keskittymiskyvyn häiriöt, muistivaikeudet ja liikehäiriöt. Hiilimonoksidimyrkytys on erityisen vaarallinen ihmiselle, jolla on sairauden takia vaikeaa kompensoida kudosten hapenpuutetta. Tällaisia tauteja on esimerkiksi sepelvaltimotauti, anemia ja keuhkoahauma. (Itälinna, 2013) (WHO, 2000)

Monet vakavista neurologista vaurioista esiintyvät vasta pidemmän ajan kuluttua altistumisesta. (WHO, 2000) Hiilimonoksidi on ototoksinen aine, mille altistumisen tiedetään lisäävän mahdollisen melun aiheuttamia kuulovaurioita. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2014)

Ihminen, joka on altistunut hiilimonoksidille, tulee toimittaa raittiiseen ilmaan. Lievissä tapauksissa raittiin ilman hengittäminen riittää ensiavuksi, oireiden pitäisi hävitä muutamassa tunnissa. Lievä altistuminen hiilimonoksidille nostaa sykettä ja hengitystiheyttä, mutta vakavassa hiilimonoksidimyrkytyksessä ihmisen pulssi laskee. Vakavimmissa myrkytystapauksissa tarvitaan ensiapuna happihengitystä, mikäli se on mahdollista. Pahimmissa tapauksissa tarvitaan ylihappihengityshoitoa. Hiilimonoksidille altistumisen havaitseminen on hankalaa, koska samanlaisia oireita tavataan monista muista syistä johtuvina. (Mustajoki, 2014)

Noin 80 – 90 % hengitetystä hiilimonoksidista kiinnittyy hemoglobiiniin (Hb), muodostaen karboksihemoglobiinin, eli COHb:n (WHO, 2000). Tämä yhdiste estää happea liittymästä hemoglobiiniin ja näin ollen estää hemoglobiinia kuljettamasta happea kudoksille. Hiilimonoksidin ja hemoglobiinin muodostama sidos on 200 – 250 kertaa vahvempi kuin vastaava hapen ja hemoglobiinin muodostama sidos. Hiilimonoksidin määrää veressä mitataan kuinka suuri prosentti hemoglobiinista on COHb:tä. Normaali pitoisuus tupakoimattomalla ihmisellä on noin 0,3 – 0,8 % ja tupakoitsijalla 3 - 8 %. (Svedberg;Samuelsson;& Melin, 2008). (WHO, 2000)

COHb:n pitoisuutta veressä voidaan ennustaa Coburn-Foster-Kane yhtälöllä. Yhtälö on erittäin monimutkainen ja sisältää paljon erilaisia parametreja, jotka ovat henkilökohtaisia, mikä hankaloittaa sen käyttöä. Peterson ja Stewart ovat johtaneet yhtälöstä yksinkertaisemman yhtälön, joka toimii hiilimonoksidipitoisuuksille välillä 25 – 523 ppm ja altistumisajalle 15 minuuttia – 8 tuntia. Se kuvaa COHb:n pitoisuutta tupakoimattoman ihmisen veressä kun parametreina on hiilimonoksidin pitoisuus ilmassa ja altistumisaika. (Haloulakou;Fili;& Spyrellis, 1999)

$$\text{Log}(\%COHb) = 0,858 * \log(CO) + 0,63 * \log(t) - 2,295 \quad (5)$$

missä:

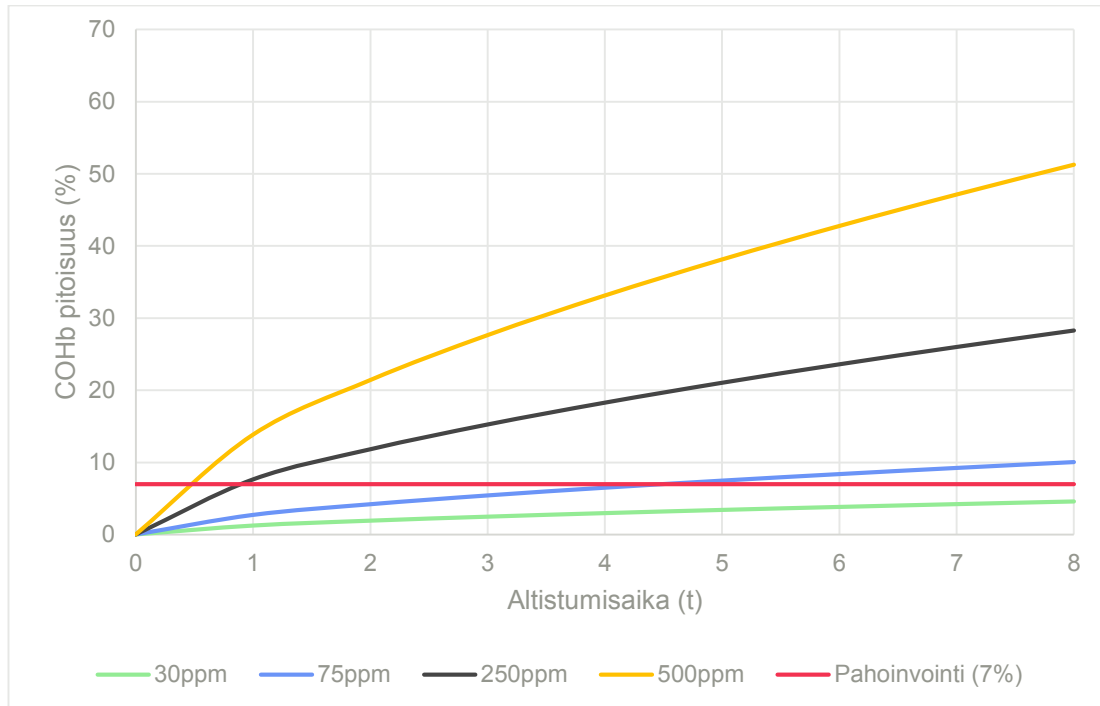
CO on hiilimonoksidi pitoisuus yksikössä ppm

t on henkilön altistumisaika minuutteina

COHb pitoisuuden ollessa 5 – 8 % aiheuttaa se ihmiselle koordinaatiokyvyn laskua, seuraus vaikeuksia ja vaikeuksia seurata ympäristön pieniä muutoksia. COHb:n noustessa noin 10 % ihminen alkaa kokemaan päänsärkyä. Pitoisuuden kasvaessa tulee huimausta, sekavuutta ja oksentelua. Kun hiilimonoksidin pitoisuus veressä kasvaa 40 % on seurauksena mahdollisesti kouristukset ja kooma. COHb pitoisuuden kasvaessa 50 – 60 % on seurauksena yleensä kuolema. (WHO, 2000)

Kuvassa 1 on esitetty kuinka hiilimonoksidi pitoisuus ilmassa vaikuttaa työntekijän COHb pitoisuuteen veressä, kun tarkasteltavana ajanjaksona on työpäivän pituus. Hiilimonoksidin HTP_{8h} – arvo on 30 ppm ja HTP_{15min} – arvo on 75ppm.

Kuva 1. COHb pitoisuus veressä altistumisajan ja pitoisuuden funktiona



3.2.1.2. Muodostuminen ja siihen vaikuttavat tekijät

Hiilimonoksidia tiedetään syntyvän puusta kuumissa ja hapettomissa olosuhteissa, mutta reaktiota syntymiseen puupelleteissä, jotka ovat kylmässä ilmassa, ei täysin tunneta. Hiilimonoksidin tiedetään syntyvän auto-oksidiivisen reaktion seurauksena rasvojen ja rasvahappojen hajoamisesta. Auto-oksidiivinen reaktio alkaa noin plus viidessä lämpöasteessa ja kiihtyy lämpötilan noustessa. (Kuang X. , ym., 2008) (Koppejan, ym., 2013) (Svedberg;Högberg;Högberg;& Galle, 2004)

Yazdanpanah ja hänen tutkimusryhmänsä tutkivat hiilimonoksidin syntymiseen vaikuttavia tekijöitä. He huomasivat, että syntymiseen vaikuttaa varastointilämpötila ja pellettien kosteusprosentti. Hiilimonoksidia syntyy eniten kosteuden ollessa alhainen, 4 % tai 9 %. Pienillä kosteuspitoisuuksissa lämpötilan nousu kiihdyttää hiilimonoksidin syntymistä. Kuitenkin kosteuden noustessa 15 % ja yli ei lämpötilalla enää ole vaikutusta hiilimonoksidin muodostumiseen. Suurin hiilimonoksidin

muodostuminen havaittiin 9 % kosteudessa ja 60 °C lämpötilassa. (Yazdanpanah, ym., 2014)

Samankaltaisia tutkimuksia on tehty aiemminkin, kuten Kuang et al. vuonna 2008. He tutkivat kaasujen syntymistä varastointilämpötilan funktiona. Tutkimus suoritettiin lämpötila välille 20 – 55 °C. He havaitsivat myös, että lämpötilalla on suuri vaikutus sekä hiilimonoksidin maksimiarvoon että syntymisnopeuteen. Lämpötilan noustessa muodostumisnopeus kasvaa ja tasapainopitoisuus on suurempi kuin kylmemmillä lämpötiloilla. (Kuang X. , ym., 2008)

Kuang ja muut tutkivat myös eri raaka-aineista tehtyjen pellettien vaikutusta hiilimonoksidin syntymiseen. Suuremmissa lämpötiloissa (40 °C) puu raaka-aineella ei ollut merkittävää eroa hiilimonoksidin syntymiseen. Kahdenkymmenen asteen lämpötilassa eurooppalaisista havupuista tehdyistä pelleteistä vapautui kuitenkin 335 ppm hiilimonoksidia, kun taas Kanadassa tuotetuista puupelleteistä vapautui peräti 5510 ppm. (Kuang X. , ym., 2008)

Ruotsissa teollisuuslaitoksilla suoritetuissa mittauksissa havaittiin hiilimonoksiidia syntyvän eniten aina uuden pellettikuorman tullessa. Suurimmat pitoisuudet mitattiin 18 tunnin kuljetuksen jälkeen jolloin hiilimonoksidia oli 123 mg/m³, mikä vastaa 107 ppm pitoisuutta. Myös tässä tutkimuksessa havaittiin lämpötilan nousun kiihdyttävän hiilimonoksidin syntymistä. (Svedberg;Högberg;Högberg;& Galle, 2004)

3.2.2. Aldehydit

Aldehydit ovat haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, jotka sisältävät karbonyyliryhmän – CHO. Aldehydejä käytetään paljon hajusteteollisuudessa. Puupelleteissä tavataan monia aldehydejä, näistä yleisimmät ovat formaldehydi, pentanaali ja heksanaali. Heksanaali ja pentanaali aiheuttavat suljetuissa tiloissa voimakasta ja epämiellyttävää hajua, mikä helpottaa niiden havaitsemista. Heksanaalin hajukynnykseksi on raportoitu 2 ppm (Työsuojelu, 2009).

Suurin osa aldehydeistä häviää pelleteistä jo pelletöinti vaiheessa lämpötilan nousun johdosta. Niitä haihtuu kuitenkin vielä pellettien kuljetuksen ja varastoinnin aikana. (Ståhl, 2008)

3.2.2.1. Terveyshaitat

Useimmat aldehydit aiheuttavat ilmassa ärsytystä silmiin. (Arshadi;Geladi;Gref;& Fjällström, 2009) Heksanaalille ei ole määritetty HTP_{8h} – arvoa, mutta HTP_{15min} – arvo on 10 ppm. Vapaaehtoisilla koehenkilöillä tehdyn tutkimuksen mukaan kahden tunnin altistus 10 ppm pitoisuudelle aiheuttaa lievää ärsytystä, 2 ppm arvolla ei havaittu haitallisia vaikutuksia. (Työsuojelu, 2009)

Pentanaali, eli valeraldehydin, vaikutuksia testattiin 25 koehenkilöllä 2 % pitoisuudessa. Kukaan koehenkilöistä ei kokenut herkistyneensä. Eläinkokeissa pentanaalin on havaittu ärsyttävän voimakkaasti ihoa ja silmiä, joissakin kokeissa se on todettu myös genotoksiseksi. (Työsuojelu, 2009)

Metanaali eli formaldehydi, on ihmiselle erittäin myrkyllinen ja vaarallinen yhdiste. Se aiheuttaa esimerkiksi ärsytystä silmiin, allergista astmaa, ärsytystä poskionteloissa. Krooninen altistuminen lisää neurastenian eli heikkohermoisuutta. Tämän oireita ovat päänsärky, huimaus, nukkumisvaikeudet ja muistin menetykset. Vakavampi altistuminen aiheuttaa DNA ja kromosomi muutoksia. Metanaalin tiedetään myös aiheuttavan nenän alueen syöpää eläimillä. (Tang, ym., 2009)

Taulukossa 1 on esitetty pelleteistä haihtuvien aldehydien HTP-arvoja.

Taulukko 1 Pelleteistä haihtuvien aldehydien HTP-arvoja

	HTP_{15min}	HTP_{8h}	Huom.
<i>Heksanaali</i>	10 ppm	-	
<i>Valeraldehydi (Pentanaali)</i>	-	30 ppm	
<i>Formaldehydi (Metanaali)</i>	1 ppm	0,3 ppm	Kattoarvo

3.2.2.2. Muodostuminen ja siihen vaikuttavat tekijät

Aldehydit muodostuvat puun vapaista tyydyttämättömistä rasvahapoista. Aluksi rasvahappo ketjut katkeavat, minkä jälkeen tuplasidokset hapettuvat ja muodostavat haihtuvia aldehydejä. Reaktiota tapahtuu myös pellettejä valmistaessa. (Arshadi;Geladi;Gref;& Fjällström, 2009) Rasvahappoja on lignoselluloosa pohjoisessa biomassassa noin 0,6 % (Koppejan, ym., 2013).

Aldehydien muodostumiseen vaikuttaa pellettien valmistuksessa sahanpurun kuivaamisen käytetty lämpötila. Mikäli sahanpuru kuivataan kovassa lämpötilassa aiheuttaa se puun rasva- ja pihkahappojen hajoamista, mikä lisää vapaiden rasvahappojen määrää ja näin ollen aldehydien muodostumista varastoitaessa. (Arshadi;Geladi;Gref;& Fjällström, 2009)

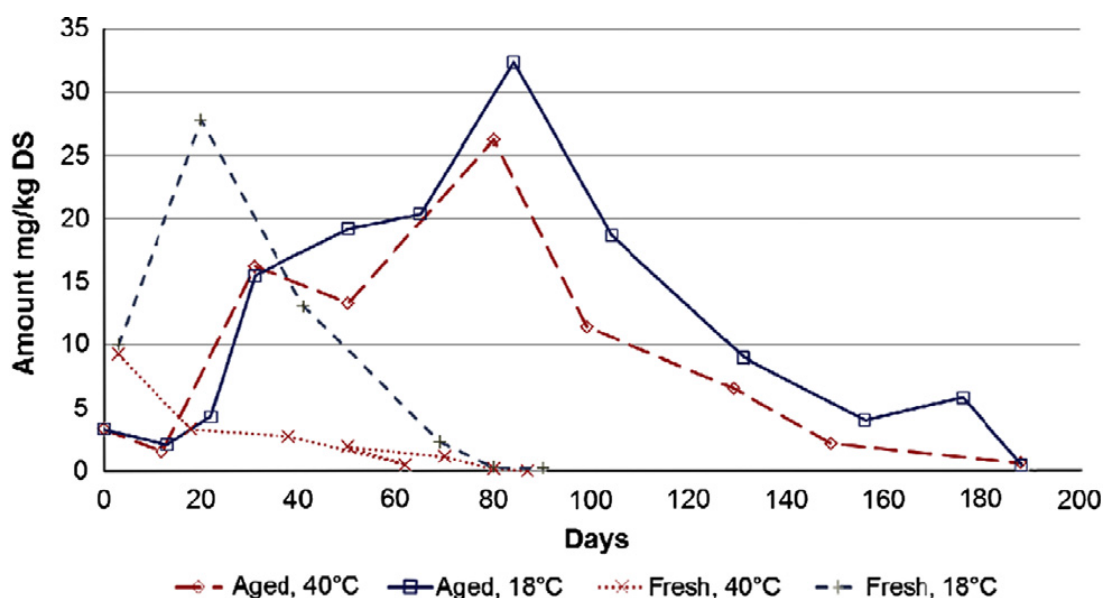
Tuoreissa pelleteissä on aldehydejä 1 – 2,9 grammaa per kilogramma pellettejä. Männystä valmistetuissa pelleteistä tavataan suurempiakin pitoisuuksia jopa 2 – 7 grammaa per kilogramma pellettejä. Vastaavasti taas kuusesta valmistetuissa pelleteissä tavataan vain 0,7 – 2 grammaa. Arvoihin vaikuttaa kuitenkin merkittävästi puun yksilölliset vaihtelut ja sahanpurun varastointi ennen pelletöintiä, koska osa rasvahapoista hapettuvat ja haihtuvat jo varastoidessa. (Thek & Obernberger, 2012)

Eräissä pellettitutkimuksissa on havaittu erittäinkin suuria heksanaalipitoisuuksia, kun taas joissakin ei havaittu heksanaalia käytännössä ollenkaan. Työterveyslaitos on vuonna 2008 suorittanut mittauksia neljään eri pelletti tehtaaseen ja yhteen asiakasvarastoon. Suurin heksanaalipitoisuus mitattiin asiakasvarastossa, ollen 200 - 230 mg/m³, eli 49 - 56 ppm. Tämä ylittää viisinkertaisesti heksanaalin HTP_{15min}-arvon. (Työterveyslaitos, 2008)

Vastaavia korkeita heksanaalipitoisuuksia on mitattu Ruotsissa. Siellä suurista teollisuus varastoista oli mitattu aldehydipitoisuuksia, minkä aritmeettinen keskiarvo oli 111 ± 32 mg/m³ (27ppm ± 8) (Nordic Innovation Centre, 2008). Tästä suurin osa oli heksanaalia (70 - 80 % w/w). (Svedberg;Högberg;Högberg;& Galle, 2004)

Haihtuvien aldehydien määrää voidaan vähentää käyttämällä raaka-aineena tuoretta sahanpurua. Kuvasta 2 nähdään, että tuoreesta mäntysahanpurusta tehdyistä pelleteistä haihtui ensimmäisen 30 päivän aikana suurimmat määrät heksanaalia ja 80 päivän jälkeen heksanaalin haihtuminen oli laskenut nolnaan. Neljä kuukautta varastoidusta mäntysahanpurusta valmistetut pelletit saavuttivat maksimaalisen heksanaalin haihtumisen vasta 90 päivää pellettien valmistuksen jälkeen. (Granström, 2014)

Kuvasta 2 nähdään, että raaka-aineen varastointi myöhentää aineiden haihtumista. Tämä voi aiheuttaa ongelmia loppukäyttäjällä, koska haihtuvat yhdisteet eivät kerkeä haihtua enää pellettivalmistajan varastossa tai kuljetuksen aikana.



Kuva 2. Varastoidusta ja tuoreesta sahanpurusta tehtyjen pellettien haihtunut heksanaalipitoisuus

3.2.3. Muut

3.2.3.1. Biologiset tekijät

Monissa biomassoissa havaitaan paljon home- ja sienikasvustoa. Puupelleteissä ei havaita bakteereita eikä homeita johtuen pellettien valmistuksesta syntyvästä puupölyn lämpenemisestä. Lämpötila tuhoaa biologiset tekijät ja laskenut kosteuspitoisuus ei houkuttele bakteereita ja homeita kasvualustaksi. (Madsen;Mårtenson;Schneider;& Larsson, 2004) Vuonna 2011 tehdyssä tutkimuksessa puupelleteistä ei löydetty biologisia pienhiukkasia. Tutkimuksessa

tutkittiin sienien määrää ja endotoksiineja eri biopolttoaineissa. Puupelletit olivat ainoa biopolttoaine, josta ei havaittu biologisia tekijöitä (Cohn, ym., 2011).

Mikäli pellettivarastoissa havaitaan biologisia hiukkasia, on todennäköisintä, että ne ovat päätyneet sinne jälkikäteen esimerkiksi kuljetuksen yhteydessä. Mikäli pelletit pääsevät kosketuksiin veden kanssa ja niiden kosteus nousee yli 16 %, on mahdollista, että biologiset prosessit käynnistyvät. (Koppejan, ym., 2013). (Cohn, ym., 2011).

3.2.3.2. Orgaaniset hapot

Auto-oksidatiivisen reaktion jatkuessa aldehydit jatkavat hapettumista muodostaen karboksyylihapoja. Heksanaali hapettuu kapronihapoksi (heksaanihappo). Karboksyylihapot aiheuttavat pistävää hajua ja saattavat aiheuttaa silmien ja ylähengitysteiden ärsytystä. (Koppejan, ym., 2013)

3.3. Puupöly

Työympäristössä pölyksi yleensä määritetään kiinteät pienhiukkaset ilmassa, jotka ovat kooltaan alle 1 µm aina vähintään 100 µm asti. (VTT Automaatio, 2004)

3.3.1. Pelletin mekaaninen kestävyys

Pelletöinnissa lämpötila nousee ja ligniini pehmenee. Jäähtyessään se muodostaa pelletin pinnalle kiiltävän kerroksen, missä se toimii luonnollisena liima-aineena ja pitää pelletin kasassa. Valmistuksessa ligniinin tulee saavuttaa lasittumispiste, jotta se pitää pelletin kasassa. Kuivalle ligniinille tämä lämpötila on 200 °C, mutta jos ligniini imee itseensä yli 2 % vettä, laskee lasittumislämpötila 115 °C asteeseen. Pelletit pysyvät kasassa pääasiassa ligniinin aiheuttaman adheesion vaikutuksesta ja kuitumaisten osien sisäpintojen koheesion ansiosta. Pelletin rakenne voi kuitenkin hajota erilaisista ulkoisista voimista johtuen, mikä synnyttää puupölyä. (Bioenergia, 2014) (Ståhl, 2008)

Varastoimalla raaka-ainetta ennen pelletöintiä voidaan parantaa pelletin mekaanisia ominaisuuksia. Mäntysahanpuru, jota oli varastoitu 140 päivää ennen pelletöintiä,

teki pelleteistä kestävämpiä ja niillä oli suurempi tiheys kuin pelleteillä jotka oli tehty tuoreesta mäntysahanpurusta. (Thek & Obernberger, 2012) (Lehtikangas, 2001)

Puun kuoren lisääminen pelletin joukkoon lisäisi merkittävästi sen mekaanista kestävyyttä. Puunkuori sisältää paljon ligniiniä ja uuteaineita, mitkä pelletöinnissa pehmenevät ja kovettuvat parantaen mekaanista kestävyyttä. Kuori on myös hydrofobisempi aine kuin kuiva puu, tosin pelletöidun kuoren hydrofobisuudesta ei ole tutkimustietoa (Lehtikangas, 2001). Euroopan unionin standardi kuitenkin kieltää kuoren käytön valkoisen A1-pelletin lisäaineena. (EU, Standardi EN ISO 17225-2, 2014)

Pellettien mekaaninen kestävyys määritetään EU:n standardoimalla testillä. Mekaanisen kestävyys kuvaa sitä prosenttiosuutta, joka on yhä kiinteässä muodossa rasituskokeen ja seulonnan jälkeen. Rasituskokeessa 500 grammaa seulottuja pellettejä (eli hienoaines poistettu) laitetaan suljettuun neliönmuotoiseen astiaan, jota pyöritetään 50 kierrosta minuutissa yhteensä kymmenen minuutin ajan. Tämän jälkeen laatikon sisällä olevat puupelletit seulotaan. Jäljelle jääneet pelletit punnitaan ja lasketaan prosentuaalinen osuus siitä massasta joka on yhä jäljellä. Euroopan unionin standardi määrittelee A1-luokan puupelletille mekaaniseksi kestävyudeksi yli 97,5 %. (EU, 2009)

3.3.2. Terveysvaikutukset

Puupölyn haitallisista terveysvaikutuksista on tiedetty jo pitkään. Jo vuonna 1965 huomattiin puupölylle altistuneiden työntekijöiden keskuudessa nenäsyövän olevan yleisempi kuin muilla (Demers;Teschke;& Kennedy, 1997). Valtioneuvoston asetuksen 716/2000 mukaan kovapuupölyn sitova raja-arvo hengitettävässä ilmassa on 5 mg/m³. Vastaavasti muun kuin kovapuupölyn HTP_{8h}-arvo on 2 mg/m³, mutta uusilla ja uudistetuilla tuotantolaitoksilla sovelletaan arvoa 1 mg/m³. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2014) (Husgafvel-Pursiainen;Liukkonen;& Welling, 2014)

Hengitettäessä pölyistä ilmaa puupölyä pääsee kulkeutumaan hengitysteihin ja jopa keuhkojen alveolialueelle aiheuttaen monia terveydellisiä haittoja. Alveoli

kokoluokan pöly on erityisen vaarallista, koska se päätyy keuhkon alveolien kautta verenkiertoon (Melin, 2008). Osa pölyn terveyshaitoista tulee esiin vasta vuosia altistumisen jälkeen, jolloin niitä ei enää osata yhdistää puupölyn aiheuttamiksi. (VTT Automaatio, 2004)

Hiukkaslukumäärässä mitattuna suurin osa puupölystä on alle 5 µm kokoluokassa, vastaavasti taas massajakauman perusteella suurin osa on yli 10 µm kokoluokassa. On arvioitu, että sisään hengitettävän pöly kattaa noin 45 % kokonaispölypitoisuudesta ja hengitettävän pölyn pitoisuus on 25 %. Sisään hengitettäväksi pölyksi lasketaan alle 5 µm hiukkaset ja yli 5 µm hiukkaset ovat hengitettävää pölyä. (Kuopion yliopisto, ympäristötieteen laitos, 2000)

3.3.2.1. Puupölyn aiheuttamat sairaudet

Puupöly aiheuttaa työntekijöille silmien ja hengitysteiden ärsytystä. Näistä voi seurata silmän sidekalvontulehdus, muutoksia nenän toiminnassa, keuhkoärsytystä, ihottumia ja astmanoireita sekä astmaa. Lieviä oireita esiintyy jo varsin pienillä pitoisuuksilla ja lyhyillä altistumisajoilla.

Pelletit ovat suurimmaksi osaksi kuusta ja mäntyä. Työterveyslaitos ylläpitää Työperäisten sairauksien rekisteriä (TPSR). Vuodesta 1990 rekisteriin on merkitty puulaji kohtaisia tietoja, ennen tätä merkittiin kaikki puupölyn aiheuttamat sairaudet yhteen. Rekisteri ei ole kokonaan julkinen, mutta TTL on julkaisut osan tiedoista koskien kuusi- ja mäntypölyn aiheuttamia sairauksia vuosina 1990 – 2002. Ne on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kuusi- ja mäntypölyn aiheuttamat työperäiset sairaudet Suomessa vuosina 1990 - 2002

	Kuusipöly	Mäntypöly
Allerginen nuha	25	48
Pitkäaikainen nuha	-	1
Ylähengitysteiden yliherkkyys reaktio	1	1
Astma	9	10
Allerginen alveoliitti	-	1
Allerginen kosteusihottuma	3	4
ei-allerginen kosteusihottuma	1	1
Nokkosihottuma	-	1
Silmän sidekalvotulehdus	1	-
Epämääräinen kosteusihottuma	3	-
YHTEENSÄ	43	67

Näiden lisäksi TPSR rekisterin mukaan vuosina 1990 – 2002 Suomessa on todettu yksi kurkunpäänsyöpä, jonka on aiheuttanut määrittämättömät puulajit. Tämän lisäksi vuosien 1965 – 1999 välillä on todettu yksi poskiontelon syöpä, jonka on aiheuttanut kotimaiset puulajit ja yksi eri alueisiin ulottunut nenän sivuontelosyöpä, jonka on aiheuttanut määrittämättömät puulajit. (Työterveyslaitos, 2014b)

Monet pölyn pitkällisen altistumisen aiheuttamista sairauksista käyvät ilmi vasta myöhemmin altistumisen päätyttyä. Tämä tuo ongelman tilastoihin, koska tautia ja oireita ei välttämättä osata yhdistää puupölyn aiheuttamiksi. (VTT Automaatio, 2004)

Tammi- ja pyökkipölylle (eli kovapuupölylle) altistuneet työntekijät pitää ilmoittaa ammatissa altistuvien rekisteriin eli ASA-rekisteriin, mitä ylläpitää Työterveyslaitos. Rekisteriin ilmoitetaan kaikki, jotka ovat altistuneet työssään syöpävaaralliseksi katsotuille aineille. Rekisterin tehtävänä on edistää ammatissa altistuvien seurantaa, sairauksien ennaltaehkäisyä ja tehostaa tutkimusta. Vuonna 2005 tammi- ja pyökkipölylle ilmoitettiin altistuneen yhteensä 957 työntekijää, joista 811 oli miehiä ja 146 naisia. (Husgafvel-Pursiainen;Liukkonen;& Welling, 2014)

3.3.2.2. Puupölyn karsinogeeniset vaikutukset

Suomessa ainoastaan tammi- ja pyökkipuupöly on luokiteltu valtioneuvoston asetuksen 716/2000 mukaan syöpävaaralliseksi aineiksi. WHO:n alainen IARC luokittelee puupölyn ykkösryhmään eli se luokitellaan syöpävaaralliseksi ihmiselle. IARC ei kuitenkaan luokittele eri puulajien pölyjä, vaan laskee kaikki puupölyt

syöpävaaralliseksi. Yhdysvaltalainen ACGIH vastaavasti luokittelee puupelleteissä yleisimmän kuusi- ja mäntypölyn luokkaan A4 eli tämänhetkisen näytön perusteella niitä ei voida luokitella ihmiselle syöpää aiheuttaviksi aineiksi. (Työterveyslaitos, 2014a) (Työterveyslaitos, 2014b)

Pidempi aikaisen altistumisen tiedetään lisäävän muuten erittäin harvinaisen nenäsyövän riskiä merkittävästi. (Husgafvel-Pursiainen;Liukkonen;& Welling, 2014) Nenäsyöpää esiintyy miehillä tavallisesti noin 0,4 ja naisilla 0,2 tapausta per 100 000 ihmistä. Vuonna 2012 Suomessa on todettu miehillä yhteensä 31 ja naisilla yhteensä 13 nenä- ja poskiontelon syöpätapausta. (Suomen Syöpärekisteri, 2014) Tilastoista ei kuitenkaan käy ilmi, ovatko kyseiset henkilöt altistuneet puupölylle.

IARC:n vuonna 1997 julkaisemassa selvityksessä todettiin, että ei ole tarpeeksi näyttöä hiilipölyn karsinogeenisuudesta ihmisillä tai eläimillä. Tutkimuksessa kartoitettiin keuhko- ja mahasyöpiä. Nykytiedon mukaan todisteet keuhkosyöpään ovat kuitenkin kasvussa. Uudet epidemiologiset tutkimukset osoittivat, että hiilipölylle altistumisen syöpävaarattomuudesta ei ole tarpeeksi näyttöä. IARC suosittelee mahdollisia jatkotutkimuksia liittyen hiilipölyn syöpävaarallisuuteen. (IARC, 2014)

4. PUUPELLETIN KÄYTÖN JA VARASTOINNIN TURVALLISUUSRISKIT

Tässä luvussa käsitellään puupellettien käyttöön ja varastointiin liittyviä turvallisuusriskejä. Luvussa käydään läpi kaikki pelleteistä tunnetut mahdolliset vaaraa aiheuttavat ominaisuudet. Tehdään myös katsaus muutamaa maailmalla tapahtuneeseen onnettomuuteen liittyen pellettien varastointiin ja kuljetuksiin.

4.1. Lämpeneminen

Puupelleteissä syntyy lämpöä hapettumisen ja veden imeytymisen aiheuttaman kondensaation johdosta. Pellettien lämpenemiseen kosteudesta johtuen liittyy kaksi ilmiötä, tiivistymislämpö ja differentiaalinen tiivistymislämpö. Tiivistymislämpö on näistä kahdesta selvästi suurempi. Sitä tapahtuu erityisesti silloin, kun pelletin pinta on ilmaa viileämpi. Veden kondensoituessa pelletin pintaan vapautuu samalla lämpöä. Tiivistyessä syntyvä lämpö on yhtä suuri kuin veden höyrystymislämpö, koska tiivistyminen on höyrystymisen vastaprosessi. (Koppejan, ym., 2013)

Differentiaalista tiivistymislämpöä vapautuu, kun kosteus siirtyy eri kosteudessa olevien pellettien välillä. Ilmiö voi tapahtua joko yksittäisen pelletin sisällä tai pellettien välillä. Lämpö syntyy, kun vapaat vesimolekyylit siirtyvät diffuusiolla heikommin kiinni olevista molekyylikerroksista, niihin molekyylikerroksiin, jotka ovat tiukemmin kiinni. Differentiaalinen tiivistymislämpö on huomattavasti tiivistymislämpöä pienempää, aiheuttaen vain muutaman kymmenyksen lämpötilan nousun pelleteissä. Differentiaalinen tiivistyslämpö voi olla maksimissaan 0,03 % tehollisesta lämpöarvosta (Lestander, 2008). (Koppejan, ym., 2013)

Puupelletit, jotka sisältävät enemmän hienoaainesta ovat herkempiä absorboimaan kosteutta, johtuen niiden kasvaneesta pinta-alasta, joka on kosketuksissa ilman kanssa. Vastaavasti myös kuivat puupelletit joiden kosteusprosentti on noin viisi painoprosenttia lämpenevät helpommin, kuin normaalin kosteusprosentin (noin 9 p-%) puupelletit, johtuen niiden kyvystä imeä enemmän kosteutta ilmasta. (Lestander, 2008)

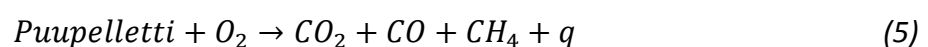
Guon vuonna 2013 tekemässä tutkimuksessa löytyi ristiriitaisia tuloksia. Hän havaitsi tutkimuksessaan, että ainoastaan pellettien iällä ja lämpötilalla on vaikutusta pellettien itselämpenemiseen. Tuoreet pelletit vapauttivat lämpöä enemmän kuin vuoden vanhat. Lämpötilan noustessa myös lämmön vapautuminen kiihtyi. Hänen tutkimuksessaan kosteudella ja pellettien valmistajalla ei ollut vaikutusta pellettien lämpenemiseen. (Guo, 2013)

Pellettien valmistuksessa käytettävä vasaramylly hajottaa puun solurakennetta, mikä altistaa selluloosan, hemiselluloosan, ligniinin ja uuteaineet hapettumiselle. Hapettumisesta syntyy kaasuja (käsitelty kappaleessa 3), mutta myös lämpöä. Hapettumisessa lämpöä aiheuttaa hydrolyysi- japyrolyysi reaktiot. Hydrolyysissä pitkät ketjumolekyylit, selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini, hajoavat ja imevät vettä. Hydrolyysireaktio on erittäin hidas ja sitä käytetään bioetanolin valmistuksessa käyttäen hyväksi happoa tai entsyymejä katalyyttinä. (Guo, 2013) (Thek & Obernberger, 2012)

Lämpeneminen pellettien varastoinnissa nostattaa kosteutta ylöspäin. Tämä voi tehdä hyvin kovan kerroksen varastossa olevien pellettien kuivaksi jääneeseen alaosaan. Kovettunut osa voi vaikeuttaa pellettien purkamista silloista alakautta ja aiheuttaa tukoksia. (European Pellet Council, 2013)

Pyrolyysi tapahtuu hapettumisissa olosuhteissa ja korkeassa ympäröivässä lämpötilassa, synnyttäen lämpöä, kaasuja ja hiiltä. Happi hyökkää puupelletin pintaan, mikä aiheuttaa puupelletin hajoamisen. Nopeaa pyrolyysiä käytetään muodostamaan nestemäistä bio-öljyä ja biohiiltä. Hidas pyrolyysi on vastaavasti puupellettisiilossa yleisin syy kytemiselle ja mahdolliselle itsesyttymiselle.

Lämpenemisen yleinen reaktio voidaan kirjoittaa muotoon:



Missä:

q on vapautunut lämpö

4.1.1. Itsesytyminen

Lämpenemisestä tulee ongelma, jos lämpö ei johdu pois pelleteistä heti, vaan nostaa pellettien lämpötilaa (Koppejan, ym., 2013). Itsesytyminen alkaa yleensä kytemisellä. Pyrolyysi alkaa yleensä yli 100 °C:ssa jolloin alkaa muodostumaan hiiltynyttä puuta ja palokaasuja. Mikäli kytöpaloön pääsee happea, niin kytöpalo synnyttää liekin. Kytemisen katsotaan syttyvän paloksi, kun ilmestyy näkyvä liekki. Syttymislämpötilaksi kutsutaan sitä lämpötilaa, missä syntyy myös valoa. (Guo, 2013)

Monet puupelleteistä haihtuvista kaasuista ovat herkästi palavia. Yazdanpanahin tekemän tutkimuksen mukaan pelleteistä haihtuvien kaasujen konsentraatio ei kuitenkaan saavuta pistettä, jossa ne voisivat leimahtaa. Tutkimuksessa todettiin, että vaikka pellettejä säilötään eri kosteuksissa neljä tai yhdeksän viikkoa, niin vapautuneet kaasut eivät saavuta leimahduspistettä. Kaikissa olosuhteissa kaasujen määrä jäi merkittävästi alle laskennallisen leimahdusrajan. (Yazdanpanah, ym., 2014)

Pellettien lämpenemiselle ei ole mitään selvää lämpötilaa, jolloin tiedetään, että varastointi on vielä turvallista. Eurooppalainen pellettiyhdistys European Pellet Council ehdottaa, että ei tulisi tarkkailla lämpötilaa, vaan lämpötilan nousua. He toteavat, että yli kahden asteen lämpeneminen kahden vuorokauden aikana kuvaa jo merkittävää itselämpenemisreaktiota. Tällöin suositellaan toimenpiteitä lämpenemisen pysäyttämiseksi. (European Pellet Council, 2013)

Laissa kuljetettavan ja säilöttävän aineen itsesyttymisominaisuuksia verrataan puuhiileen. Mikäli aineen itsesyttymisominaisuudet ylittävät puuhiilen vastaavat tulee sitä pitää helposti itsesytyvänä. Tällöin aineen kuljetuksessa on noudatettava vaarallisen aineen kuljetuksesta annettuja lakeja ja säädöksiä. (Gaia Consulting, 2012) Puupellettien rekkakuljetuksille ei ole annettu erillisiä kuljetuksen vaaraluokkia (Vapo Oy, 2013).

4.1.2. Tulipalon sammuttaminen

Kytöpalo alkaa itselämpenemisen seurauksena pellettien keskellä. Pelleteissä syntyvää kytöpaloa ei saa sammuttaa vedellä. Pelletit alkavat turvota veden vaikutuksesta ja muodostavat isoja paakkuja, joita on hankala poistaa. Pahimmassa tapauksessa turpoamisen aiheuttava voima voi rikkoa siilon rakenteita. Veden käyttäminen myös kiihdyttää hiilimonoksidin syntymistä pelleteistä. Kytöpalon havaittaessa siiloa ei saa avata. Ilman pääsy siiloon lisää vapaan hapen määrää, mikä mahdollistaa voimakkaan leimahduksen ja mahdollisen pöly- ja/tai kaasuräjähdyksen. (Persson, 2013)

Siilopalo pitää sammuttaa tukahduttamalla eli johtamalla siiloon inerttiä kaasua, jolloin palamiseen tarvittavaa happea ei ole saatavilla ylläpitämään palamista. Tyypillisin käytettävä inerttikaasu on typpi. Perinteisesti hiilidioksidia on käytetty siilopaloissa, mutta sen käyttöön liittyy monia riskejä. Hiilidioksidi lisääminen siiloon lisää hapen määrää, mikä saattaa käynnistää kemiallisia reaktiota, mistä taas syntyy hiilimonoksidia ja tyyppiä. Korkeissa lämpötiloissa ja rajallisen vapaan hapen kanssa yksi hiilidioksidi molekyyli muodostaa kaksi hiilimonoksidimolekyyliä, näin ollen lisäten hiilimonoksidin määrää merkittävästi. Näin ollen hiilidioksidin käyttö voi johtaa ainoastaan palavien kaasujen lisääntymiseen. (Persson, 2013)

Hiilidioksidi ei voi esiintyä nesteinä alle 5,2 barin paineessa. Näin ollen hiilidioksidia käytettäessä pitää varmistaa, että koko putkistossa vallitsee vähintään 5,2 barin paine. Käytännössä tämä harvoin onnistuu, jolloin muodostuu kuivajäätä. Kuivajään muodostuminen aiheuttaa voimakasta staattista varautuneisuutta, mikä saattaa johtaa kipinään ja palokaasujen leimahtamiseen. (Persson, 2013)

4.2. Pölyräjähdys

Räjähdys vaatii viisi elementtiä: pölyn, kipinän, hapen, suljetun tilan ja pölyn sekoittumisen ilmaan. Mikäli jokin viidestä elementistä ei täyty, räjähdystä ei voi syntyä. (Thek & Obernberger, 2012)

Valtioneuvoston asetuksen 576 / 2003 mukaan työnantaja on velvoitettu varmistamaan, että räjähdysvaarallinen tila on sellainen, jossa työ voidaan suorittaa turvallisesti. Työnantajaa myös velvoitetaan suorittamaan tilassa asianmukaista valvontaa ja vaaran merkityksen arviointia sekä käyttämään asianmukaisia teknisiä välineitä räjähdysvaaran minimoimiseksi. (Sosiaali- ja terveysministeriö, 2003)

4.2.1. Teoriaa pölyräjähdyksestä

Räjähdyksessä energia vapautuu äkillisesti ja aine laajenee. Räjähdyksiä on fysikaalisia ja kemiallisia. Biomassan aiheuttama pölyräjähdys lasketaan kemialliseksi kaasupilviräjähdykseksi. Kaasupilviräjähdyksessä palorintaman muodostama nopeus kasvaa niin suureksi, että räjähdysten reaktiotuotteiden laajeneminen aiheuttaa ilmassa etenevän paineaallon. Täysin avoimella paikalla oleva kaasupilvi ei voi räjähtää. (VTT, 2014)

Kaasupilviräjähdykset jaetaan kahteen niiden reaktiorintaman etenemisnopeuden perusteella. Räjähdyksessä (*detonaatio*) reaktiorintaman nopeus on yli äänennopeus kyseisessä aineessa ja humahduksessa (*deflagraatio*) vastaavasti pienempi kuin äänennopeus. Tyypillinen esimerkki humahduksesta on polttomoottorin toiminta, missä ilman ja bensanseos humahtaa liikuttaen mäntää. (VTT, 2014) Pelleteistä lähtevä puupöly saattaa ilmaan sekoittuneena aiheuttaa humahduksen. (Thek & Obernberger, 2012).

Pölyjen räjähdysominaisuuksia voi kuvailla monella eri tavalla, kuten niiden räjähdysherkkyydellä ja räjähdysten voimakkuudella. Puupöly luokitellaan räjähdysnopeuden mukaan luokkaan St1 tai St2. Tämä tarkoittaa, että puupöly on heikosti tai kohtuullisesti räjähtävä (St1) tai voimakkaasti räjähtävää (St2). K_{st} -arvo tarkoittaa nopeutta, jolla paine nousee puupölyn räjähtäessä. Puupölyn K_{st} arvo on 100 – 150 bar*m/s. (Kaelin, 2012). Joissain tutkimuksissa on raportoitu jopa 220 K_{st} arvoja. Vertailun vuoksi vastaava luku hiilipölylle on noin 85. Eli räjähdysten sattuessa puupölyn aiheuttama paineen nousu etenee huomattavasti nopeammin kuin hiilipölyn vastaava. (Fauske & Associates LLC, 2013)

Ilman ja pölyn seoksella on aina minimisyttyminenenergia, MIE (*Minimum Ignition Energy*). Se kuvaa pienintä elektrostaattisen kipinän energiaa, joka tarvitaan sytyttämään ilmapölyseos. Minimisyttyminenenergia laskee aluksi pölykonsentraation noustessa, mutta kääntyy uudestaan nousuun, kun pölykonsentraatio ylittää kriittisen pisteen. (Ebadat, 2009) Puulla pienin syttymisenergia on 7 – 250 mJ (Kaelin, 2012). Kivihiilellä pienin syttymisenergia riippuu huomattavasti hiilen laadusta. Normanin ja muiden tekemässä tutkimuksessa vuonna 2013 he saivat hiilen MIE-arvoksi Sebukun hiilelle ilmassa 55mJ ja vastaavasti Pittsburgh – hiilelle yli 1000mJ. (Norman;Berghamns;& Verplaetsen, 2013) Ihmiseen voi olla varastoitunut noin 25 – 30 mJ staattista energiaa. (Ebadat, 2009)

Puupöly synnyttää räjähtävän yhdisteen hapen kanssa jo varsin pieninä pitoisuuksina. Alle 30 g/m³ puupölyä riittää normaalissa ilmanpaineessa aiheuttamaan räjähtävän seoksen. (Nordic Innovation Centre, 2008) Toisen tutkimuksen mukaan vaaditaan 40 – 60 g/m³. (Kaelin, 2012) Hiilellä pienin räjähtävä konsentraatio ilmassa on noin 60 g/m³. (Norman;Berghamns;& Verplaetsen, 2013) Tätä arvoa kutsutaan MEC-arvoksi (*Minimum explosible dust concentration*) (Amyotte & Eckhoff, 2010).

Taulukko 4. Yhteenveto hiilen ja puupelletin räjähdysominaisuuksista

	MIE (mJ)	K_{st}	MEC (g/m³)
Hiili	55 – 1000	85	60
Puupelletti	7 – 250	100 - 220	30

Pölyn konsentraation ilmassa voi ennustaa kun tunnetaan pölyn tiheys, pölykerroksen paksuus ja ilmaan nousseen pölypilven korkeus. (Ebadat, 2009)

$$C = P_{bulk} * \frac{h}{H} \quad (6)$$

Missä: *C on pölypilven konsentraatio*

P_{bulk} on pölyn tiheys

h on pölykerroksen paksuus

H on ilmaan nousseen pölypilven korkeus

Kaavalla pystytään arvioimaan aiheuttaako kertynyt pöly mahdollisesti räjähtävän seoksen, mikäli se nousee tasopinnalta ilmaan. Räjähtävyyttä lisää mahdollisten palavien kaasujen läsnäolo. Kaasujen läsnäolo mahdollistaa myös muuten liian karkeiden pölyhiukkasten muuttumisen ilmassa räjähtäväksi seokseksi. (Ebadat, 2009)

Räjähtävyisyys on kolmen tekijän funktio: partikkeleiden (pölyn) konsentraatio, hapen konsentraatio ja kipinän energia. Partikkeleiden konsentraation lisäksi vaikuttaa niiden koko. Pienemmät partikkelit räjähtävät pienempinä pitoisuuksina, koska tällöin ilmalle altistuva pölyn pinta-ala on suurempi. Puupöly voi räjähtää, joko pölypilvenä ilmassa tai kuumalle pinnalle kertyneenä kerroksena. (Thek & Obernberger, 2012) Pienempi pölypartikkeli koko kasvattaa räjähdysvoimaa ja nopeutta (Nordic Innovation Centre, 2008).

4.2.2. Räjähdysvoimaa vaikuttavat tekijät

Räjähdysvoimaa vaikuttaa merkittävästi kolme tekijää, pölypartikkeleiden koko, partikkeleiden sekoittuneisuus ja pölyn konsentraatio. Pölyn partikkelikoon kasvaessa räjähdysvoima pienenee sekä paineen nousunopeus, että maksimipaine pienenevät. Maksimipaine ei kuitenkaan ole niin riippuvainen partikkelikokoosta. Suurin tiputus nähdään vasta, kun partikkelikoko lähenee pistettä, jossa se on liian isoa räjähtääkseen. Pittsburgh hiilellä tämän koon tiedetään olevan vähän yli 200 µm. Vastaavasti puupölyllä keskimäärin 400 – 500 µm partikkeleita sisältävä pöly on vielä räjähtävää (Wong; Huntley; Lehmann; & Zeeuwen, 2013).

Partikkelien sekoittuneisuudella tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin pölyhiukkaset sekoittuvat ilman kanssa. Partikkeleiden kiinnittymiseen vaikuttaa Van der Waalsin voimat, sähköstaattiset voimat ja kosteuden aiheuttamat voimat. Kosteuden lisääntyessä partikkelit sitoutuvat toisiinsa, mikä laskee räjähdysvoimaa, koska laskennallinen partikkelikoko kasvaa. (Eckhoff, 2009)

Pölyn konsentraation kasvaessa MIE – arvo laskee kunnes saavuttaa pohjan ja lähtee tämän jälkeen jyrkkään nousuun. Räjähdyksen maksimipaine nousee pölyn konsentraation noustessa. Maksimaalisen räjähdyspaineen pölykonsentraatio on enemmän kuin konsentraatio jossa on pienin MIE – arvo. (Eckhoff, 2009)

4.3. Onnettomuudet

Kappaleessa käsitellään kolmea erilaista onnettomuutta maailmalta. Kyseisissä onnettomuuksissa ei ollut kiinnitetty tarpeeksi huomiota pellettien varastoinnin ja kuljetuksen aiheuttamiin vaaroihin.

4.3.1. Häkämyrkytys merikuljetuksessa

Vuonna 2006 Hongkongin lipun alla purjehtinut alus ”*Saga Spray*” oli lastannut 13077 tonnia puupellettejä 26 – 29.9.2006 Vancouverissa, Kanadassa. Marraskuun 14. laiva saapui Helsingborgin satamaan Ruotsissa ja aloitti puupellettien purkamisen.

Yhteen laivan kuljetusruumista jäi pieni määrä pellettejä, joita kauha ei saanut purettua. Normaalin käytännön mukaisesti niitä oltiin menossa työntämään pienellä puskutraktorilla kasaan, jotta ne pystyttäisiin purkamaan kauhalla.

Puskutraktori nostettiin laivan kyytiin ja merimies sekä puskutraktorin kuljettaja menivät porraskäytävää pitkin alas laivan lasti ruumaan. Kolmas mies jäi portaiden yläpäähän. Kun merimies pääsi portaiden alapäähän, hän pyörtyi välittömästi. Puskutraktorinkuljettaja kertoi käsiradiolla tapahtuneesta muille ja välittömästi tämän jälkeen pyörtyi. Kolmas mies oli menossa tarkastamaan tilannetta, mutta huomasi hengittämisen vaikeaksi ja palasi takaisin kannelle ja soitti hätänumeroon. Merimies saatiin pois ruumasta noin kymmenen minuuttia tapahtuneen jälkeen, mutta oli pulssiton ja todettiin sairaalassa kuolleeksi.

Porraskäytävän ovi oli ollut edellisenä päivänä auki noin kahdeksan tuntia, mutta sateen takia se suljettiin yöksi kello 22.00. Ovet avattiin uudestaan kello 05:45 ja onnettomuus tapahtui noin aamu kahdeksalta. Laivan muista lastiruumista mitattiin onnettomuuden jälkeen 5850 ppm hiilimonoksidipitoisuuksia (Svedberg;Samuelsson;& Melin, 2008). Porraskäytävässä ei ollut mekaanista

ilmanvaihtoa. Siinä oli pienet tuuletusreiät lastiruumaan, mistä kaasut pääsivät porraskäytävään. Porraskäytävän ovesa oli ollut merkki matalan happipitoisuuden riskialueesta, mutta se oli kulunut lukukelvottomaan kuntoon.

Kiinteiden aineiden kuljetuksen turvallisuusohjeiden mukaan puupelletit on luokiteltu B-luokkaan eli niistä voi aiheutua kemiallinen vaara. Yleisten turvallisuusmääräysten mukaan happi- ja hiilimonoksidipitoisuudet pitäisi mitata ennen tiloihin menemistä. Myös tilojen riittävästä tuuleuksesta tulee huolehtia.

Onnettomuudessa yksi merimies kuoli, puskutraktorin kuljettaja sai vakavia vammoja ja yhteensä 11 pelastusryhmän jäsentä tunsivat olonsa heikoksi ja joutuivat sairaalaan tarkastuksiin. Heillä ei kuitenkaan todettu vammoja. Tutkimuslautakunnan raportissa onnettomuuden syyksi todettiin yleisten turvallisuusohjeiden laiminlyönti. Porraskäytävä oli yhteydessä lastiruumaan ilmanvaihdon kautta, joten se laskettiin suljetuksi tilaksi. Tilaa ei oltu kuitenkaan tuuletettu ennen sinne menemistä, jolloin sinne ei olisi saanut ohjeistuksen mukaan mennä. Laivalla oli happipitoisuus ja monikaasumittari, mutta vastoin ohjeita, niitä ei ollut käytetty ennen tiloihin menemistä.

(Marine Accident Investigation Section, 2006)

4.3.2. Tulipalo Tilburyssä Englannissa

RWE:n voimalaitoksella Tilburyssä puupellettejä polttoaineena käyttävässä voimalaitoksessa sattui vakava tulipalo helmikuussa 2012. Laitos on alun perin suunniteltu kivihiilivoimalaitokseksi, mutta vuonna 2011 se konvertoitiin käyttämään ainoastaan puupellettejä polttoaineena. Palo saatiin hallintaan reilussa seitsemässä tunnissa, mutta kytöpalot varastossa jatkuivat vielä päivien ajan. Onnettomuuden tapahtuessa voimalaitoksella oli käynnissä huoltoseisokki. (RWE, 2012)

Kaksi päivää ennen tulipaloa yhdessä siilovarastossa havaittiin kyteviä puupellettejä. Pelletit olivat syttyneet, kun varastoon pääsi kuumaa pölyä ja kipinöitä. Välittömästi kytöpalon havaittaessa varastoon ruiskutettiin palon kestävää vaahtoa, jonka tarkoitus oli tukahduttaa palo. (RWE, 2012) Palo kuitenkin syttyi, kun kahdesta eri

syöttösuppilosta kuljetettiin pellettejä ja niihin pääsi syntymään ilmataskuja. Lisääntynyt vapaa happi reagoi kytöpalon kanssa leimahtaen liekkeihin. Täyttä varmuutta teoriasta ei ole saatu, mutta RWE uskoo sen johtuneen kyseisestä tapahtumasta, mikä sitten eskaloitui suureksi paloksi. (Gaia Consulting, 2012)

Palossa ei havaittu jälkikäteen mitään yhtä selvää syytä, mikä olisi aiheuttanut tulipalon, vaan se oli monen pienen asian summa. Esimerkiksi voimalaitoksella olleessa polttoaineen syöttölinjastossa lämpö pääsi palaamaan kattilasta polttoainesiihloon. Selvän kytöpalon sattuessa olisi tärkeitä, että polttoainevarastot pystytään tyhjentämään nopeasti. Tämä ei kuitenkaan ollut Tilburyssä mahdollista. (Gaia Consulting, 2012)

4.3.3. Pölyräjähdys Tanskassa puupellettitehtaalla

Syyskuun 17. 2010 Tanskassa tapahtui pellettitehtaalla tuhoisa pölyräjähdys, jossa yksi työntekijää kuoli ja toinen loukkaantui. Tehtaan vuotuinen pellettientuotanto oli noin 60 000 tonnia vuodessa. Tehtaalla oli tapahtunut myös vuonna 2002 räjähdys, missä tuli ainoastaan aineellisia vahinkoja.

Tehtaalla käytettiin huonekaluteollisuuden ja muiden teollisuuden alojen jätetuun sivuvirtoja raaka-aineena. Rekat toivat raaka-ainetta tehtaalle, mistä raaka-aine kuljetettiin varastoon. Varastoitu raaka-aine johdettiin jauhimelle, minkä jälkeen jauhettu puupöly siirrettiin välivarastoon. Välivarastoja oli yhteensä yhdeksän, joten tietty raaka-ainetta varastoitiin aina yhdessä välivarastossa, mahdollistaen näin erilaisten raaka-ainesekoitusten käyttämisen itse pelleteissä. Välivarastoista puupölyä siirrettiin kauhakuormaajilla sekoittimille, jossa eri raaka-aineet sekoitettiin keskenään.

Vuoden 2010 räjähdysten sattuessa työntekijä A oli siirtämässä puupölyä sekoittajalle, kun hän ajoi työntekijä B:n ohitse. Tämä huomasi, että kauhakuormaajasta lähtee palaneen haju. Työntekijä B oli menossa varoittamaan toista työntekijää, kun tämä nosti kauhan purkaakseen puupölyn sekoittajalle ja samalla hän havaitsi pienen tulipalon kauhakuormaajassa. Muutama sekunti tästä ja

koko alue oli räjähtänyt liekkeihin. Kauhakuormaajan kuljettaja menehtyi samana iltana sairaalassa. Työntekijä B selvisi pienillä palovammoilla.

Tulipalon syyksi paljastui virallisen raportin mukaan kardaaniakselin hitsauksen pettäminen, mikä oli vaurioittanut sähkökaapeleita. Vialliset sähkökaapelit olivat aiheuttaneet kipinöitä, mikä sitten oli sytyttänyt kauhakuormaajan rakenteissa olleen pölyn palamaan.

Puupölyvarasto oli luokiteltu tilaksi, jossa räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen normaalitoiminnassa on epätodennäköistä ja kestä esiintyessään vain lyhyen ajan. Syyskuun 22. päivä, viisi päivää onnettomuuden jälkeen, Tanskan viranomaiset määräisivät tehtaan tuotantokieltoon. Tehtaalla oli käytetty ATEX-tiloissa kauhakuormaajia, mitkä eivät olleet ATEX-hyväksytyjä. Tehtaalla ei myöskään ollut esittää katsastustodistusta kauhakuormaajista, vaikka sellaiset olisi vaadittu.

Loppuraportissa tuotiin ilmi puutteelliset suunnittelut turvallisuudessa. Raportissa ihmeteltiin, miksi puupölyä varastoitiin merkittäviä määriä, vaikka sen tiedettiin olevan räjähdysherkkää. Puupöly ei kuitenkaan ole raaka-aine, eikä lopputuote, vaan välituote. Prosessia verrattiin yhteen pahimpaan teollisen ajan onnettomuuteen Intian Bhopalissa, missä erittäin myrkyllistä kaasua pääsi ilmaan 45 tonnia. Sielläkin kyseessä oli välituote, jonka varastoiminen oli kätevää, mutta ei välttämätöntä. Tanskassa tehtaan välivarastossa oli jopa 500 tonnia palavaa puupölyä.

Samana vuonna marraskuun 5. päivänä yritys ilmoitti, että tehdas suljetaan lopullisesti.

(Hedlund;Astad;& Nichols, 2014)

5. LABORATORIOANALYYSI – VALKOISISTA PUUPELLETEISTÄ HAIHTUVAT YHDISTEET

Laboratorioanalyysien tarkoituksena oli selvittää mitä aineita haihtuu Salmisaassa käytettävistä pelleteistä. Monet haihtuvat yhdisteet riippuvat paljon käytetystä puulajista. Arviot haihtuvista yhdisteistä vaihtelevat suuresti eri kirjallisuuslähteiden välillä. Tutkimuksessa haluttiin saada tietoa eroavatko Salmisaassa käytetyt puupelletit haihtuvilta aineilta merkittävästi kirjallisuudesta löydettyihin aineisiin ja ainepitoisuuksiin. Erityisesti arviot aldehydien määristä vaihtelevat suuresti riippuen käytetystä kirjallisuuslähteestä.

Laboratoriossa analysoitiin kahta eri pellettinäytettä ja näiden raaka-ainetta. Näytteet toimitettiin Vapon Ilomantsin ja Vilppulan tehtailta. Suurin osa Salmisaassa poltettavasta pelletistä tulee näiltä kahdelta tehtaalta, joten niiden pelletit valittiin analyysiin. Toimeksianto tilattiin Novox Oy:ltä. Itse testit suoritettiin alihankintana Ramboll Analyticsin laboratorioissa Lahdessa.

5.1. Näytteet

Näytteet toimitettiin suoraan tehtailta Matkahuollon ja Kiitolinjan välityksellä suoraan Rambollin laboratorioon. Näytteet pakattiin jätösäkkeihin ja säkit muovisaaveihin, jotta ne eivät imisi kosteutta tai jotta kaasuja ei pääsisi haihtumaan. Molemmilta Vapon tehtailta toimitettiin 60 litraa sahanpurua ja 60 litraa pellettejä testeihin.

5.1.1. Ilomantsi

Ilomantsin tehtaalla raaka-aineena käytetään 70 % mänty- ja 30 % kuusisahanpurua. Raaka-ainetta on varastoitu kaksi kuukautta ennen pelletöintiä ja pellettejä oli varastoitu kuusi viikkoa ennen näytteiden ottoa. Sahanpuru on kuivattu kiekkokuivurilla, jossa käytettävän höyryn lämpötila on 160 °C astetta. Tämä ei kuitenkaan ole suorassa kosketuksessa sahanpurun kanssa, vaan todellinen kiekkokuivurin lämpötila on alhaisempi. (Virtanen, 2015)

5.1.2. Vilppula

Vilppulassa pelletit valmistetaan suoraan sahausesta tulevasta purusta. Puru johdetaan sirkkelin alta suoraan kuivaukseen, jolloin purua ei varastoida ennen pelletointia. Sahanpurunäyte on otettu heti kuivurin jälkeen. Pellettinäyte on otettu varastoon vievältä hihnakuljettimelta, jolloin myöskään pellettiä ei ole varastoitu. Pelletit on valmistettu pelkästään kuusisahanpurusta. Valmistusvaiheessa sahanpuru kuivataan ilmalla, jonka lämpötila on 110 – 120 °C astetta. (Kilpiö, 2015)

5.2. Menetelmät

Pellettinäytteistä määritettiin haihtuvia orgaanisia yhdisteitä sekä suoritettiin koe, jossa simuloitiin varastoitaessa haihtuvia kaasuja. Molemmat määriykset suoritettiin sekä pelleteille että raaka-aineena käytettävälle sahanpurulle, joka oli kuivattu. Pelleteille suoritettiin myös rinnakkaiskokeet, jotta tulokset olisivat luotettavampia.



Kuva 3. Pellettinäytteet laitettuna lasipurkkeihin

5.2.1. Pelleteistä haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Noin 2,3 litran lasinen ilmatiivis astia täytettiin pelleteillä kuitenkin niitä tiivistämättä. Pelletit olivat astiassa yhteensä kahdeksan päivää ennen näytteenottoa. Kahdeksan päivän jälkeen astian pohjalle johdettiin puhdasta typpeä massavirtaussäätimen kautta nopeudella 100 ml minuutissa. Typpi nosti näytteen läpi virratessaan pelleteistä haihtuvat yhdisteet astian yläpuolella olevaan

kaasutilaan. Tyypeä johdettiin yhden minuutin ajan ennen VOC – näytteen ottamista ja yhdeksän minuuttia ennen aldehydinäytteen ottamista. VOC-näyte otettiin Tenax-keräimellä ja aldehydinäyte DNPH-keräimellä. Kaikki kokeet suoritettiin huoneenlämmössä.

5.2.2. Pellettien varastoinnista haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet

Noin kymmenen litraa näytettä suljettiin näyteastiaan kahdeksi viikoksi. Tämän jälkeen astian pohjaan asennettiin teräspilli, jonka avulla kaasu imettiin monikomponenttianalysaattorille. Astian yläosasta tuli korvausilmaa, minkä takia pitoisuudet laskivat ajan kuluessa.

Kaasusta analysoitiin happi-, hiilimonoksidi-, hiilidioksidi-, metaani- ja rikkivetypitoisuudet. Metaanipitoisuus kuvaa hiilivetyjen kokonaismäärää. Kaikki kokeet suoritettiin huoneenlämmössä.

5.3. Tulokset

5.3.1. Pelleteistä haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Taulukossa 5 on esitetty pelleteistä haihtuvien aldehydien määrät. Tuloksista nähdään, että Ilomantsista tulevista pelleteistä haihtuu huomattavasti enemmän aldehydejä kuin Vilppulassa valmistetuista pelleteistä.

Taulukko 5. Pelleteistä haihtuvat orgaaniset yhdisteet

	HTP 15min, µg/m ³		Vilppula, pelletti A	Vilppula, pelletti B	Vilppula, puru	Ilomantsi, pelletti A	Ilomantsi, pelletti B	Ilomantsi, puru
Formaldehydi	1200	µg/m ³	<0,0003	<0,0001	<0,0002	<0,0003	<0,0001	<0,0002
Asetaldehydi	4600	µg/m ³	0,006	0,006	0,03	0,03	0,03	<0,0002
Propionaldehydi	4800 (8h)	µg/m ³	0,001	0,001	0	0,01	0,01	0,001
Valeraldehydi	11 000 (8h)	µg/m ³	<0,001	0,001	0	0,03	0,02	<0,001
Butyraldehydi	-	µg/m ³	<0,001	<0,0006	<0,001	0,01	0,01	<0,001
Hexaldehydi	42 000	µg/m ³	0,006	0,006	0,02	0,08	0,06	<0,001

Taulukossa on Sosiaali- ja terveysministeriön HTP_{15min} – arvot, paitsi propionaldehydille ja valeraldehydille, joille on määritetty ainoastaan HT_{P8h} – arvo. Tuloksista nähdään, että aldehydipitoisuudet ovat todella kaukana HTP-arvoista. Pitoisuudet ovat suurimmillaankin vain kymmenestuhannesosia HTP-arvoista.

Kirjallisuuden perusteella voidaan olettaa Ilomantsin suurempien aldehydiarvojen johtuvan käytetystä raaka-aineesta. Ilomantsin pelletit sisältävät mäntyä, missä on enemmän rasvahappoja kuin kuudessa. Suurin osa aldehydeistä haihtuu kuitenkin välittömästi pelletöinnin jälkeen. Pellettejä oli säilötty kuusi viikkoa ennen näytteenottoa, minkä takia aldehydejä ei havaittu merkittäviä määriä. Myös raaka-ainetta oli varastoitu kaksi kuukautta ennen pelletöintiä, mikä pienentää aldehydien määrää. Voidaan olettaa, että mikäli Ilomantsin pelletit olisivat olleet tuoreita, niin aldehydiarvot olisivat merkittävästi korkeampia.

Vilppulan pelletit on valmistettu kuusisahanpurusta. Kuudessa on vähemmän rasvahappoja kuin männyssä, minkä takia haihtuvien aldehydien määrät ovat selvästi pienemmät. Toisinkuin Ilomantsissa Vilppulassa sahanpurua eikä pellettejä ollut varastoitu ennen näytteenottoa. Vilppulassa kuivauksessa käytetään kovempaa lämpötilaa, mikä lisää haihtuvien aldehydien määrää. Kovemman lämpötilan vaikutus ei kuitenkaan ole kovinkaan merkittävä, minkä takia kokonaisuudessaan Ilomantsin näytteiden määrät ovat huomattavasti suurempia.

Kirjallisuudessa on raportoitu huomattavasti suurempia aldehydipitoisuuksia. Kirjallisuuden arvoihin verrattuna molemmista puupelletti eristä haihtui merkityksettömän pieniä aldehydipitoisuuksia.

Ilomantsin näytteistä tavattiin kymmenen kertaa suurempia arvoja aldehydejä, vaikka kokonaispitoisuudet olivat silti merkityksettömän pieniä. Kyseisen tutkimuksen perusteella voidaan olettaa, että kummankaan tehtaan pelleteistä ei haihtu aldehydejä sellaisia määriä, että niistä aiheutuisi työterveydellistä vaaraa.

Kokonaisuudessa aldehydipitoisuudet olivat kuitenkin erittäin pieniä. Todennäköisesti suurin osa aldehydeistä on haihtunut kuljetuksessa, koska pelletit toimitettiin muovisissa astioissa ja jätesäkeissä, joten on mahdollista että osa aldehydeistä on päässyt haihtumaan muovin läpi. Jatkossa onkin syytä kiinnittää huomiota, että näytteet tulisi kuljettaa lasisissa astioissa.

5.3.2. Pellettien varastoinnista haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet

Varastokokeessa kaikista pelleteistä haihtui merkittäviä määriä hiilimonoksidia. Eniten sitä tavattiin Ilomantsista tulleista pelleteistä. Myös uudestaan suoritettussa kokeessa Vilppulan pelleteille hiilimonoksidin pitoisuus nousi yli määritysalueen, joka oli 1000 ppm. Määritysalue johtui käytettävästä mittarista. Koe päätettiin suorittaa uudestaan, koska laboratoriohenkilökunta epäili että aluksi käytetty muoviasia ei välttämättä ole täysin kaasutiivis.

Taulukko 6 – Vilppulan pelleteistä haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet. Koe suoritettu 9.2 – 18.2

Aika		Vilppula, pelletti				Vilppula, puru			
		11:10	11:13	11:21	11:24	10:50	10:52	10:58	11:02
CH4	V-%	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
CO2	V-%	0	0,2	0,2	0,2	0	0,1	0,1	0,1
O2	V-%	20,9	19,1	19,2	19,3	20,9	19,7	19,7	19,8
H2S	ppm	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	ppm	0	725	664	656	0	415	410	409

Vilppulassa ensin suoritetuissa kokeissa hiilimonoksidin määrä ei nouse yli määritysrajan, mutta on silti erittäin suuri. Tuloksista kuitenkin nähdään, että happea olisi ollut vielä reagoimaan rasvahappojen kanssa muodostamaan hiilimonoksidia.

Taulukko 7 – Vilppulan pelleteistä haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet. Koe suoritettu 18.2 – 27.2

Aika		Vilppula, pelletti				Vilppula, puru			
		13:18	13:19	13:24	13:32	13:33	13:34	13:39	13:42
CH4	V-%	0	0	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,2
CO2	V-%	0	0,4	0,3	0,3	0	0,2	0,2	0,1
O2	V-%	20,0	15,8	16,2	17,6	20,1	18,8	18,9	19
H2S	ppm	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	ppm	0	>1000	>1000	775	0	331	336	302

Toisessa kokeessa samalla Vilppulan pelletille hiilimonoksidin määrä nousi yli määritysrajan. Samalla myös happipitoisuus laski pienemmäksi, mikä tarkoittaa että enemmän rasvahappoja on reagoinut hapen kanssa. Ensimmäisessä kokeessa hiilimonoksidipitoisuudet olivat pienemmät, kuin uudelleen suoritettussa kokeessa.

Voidaankin olettaa, että ero tuli muoviastiasta, jonka läpi osa kaasuista on päässyt haihtumaan.

Taulukko 8 – Ilomantsin pelleteistä haihtuvat epäorgaaniset yhdisteet. Koe suoritettu 9.2 – 18.2

		Ilomantsi, pelletti			Ilomantsi, puru			
Aika		11:25	11:26	11:34	12:02	12:03	12:08	12:12
CH4	%	0,1	6,6	6,1	0,2	0,3	0,3	0,2
CO2	%	0	1,6	1,4	0	19	18,2	16,2
O2	%	20,9	0,1	5	20,9	0	1,8	4,4
H2S	ppm	0	4	3	0	0	0	0
CO	ppm	0	>1000	>1000	0	27	16	8

Ilomantsin pelleteissä happipitoisuus on laskenut käytännössä nolnaan ja hiilimonoksidia on syntynyt yli mittausrajan. Ilomantsin näytteessä myös hiilidioksidin määrä on suurempi kuin muissa näytteissä. Vaikka happipitoisuus on laskenut ilmassa käytännössä nolnaan, niin hiilimonoksidia voi silti syntyä lisää, koska silloin pelleteissä oleva happi reagoi rasvahappojen kanssa muodostaen yhä lisää hiilimonoksidia (Yazdanpanah, Evolution and stratification of off-gasses in stored wood pellets, 2013).

Rikkivetyä syntyy anaerobisen bakteeritoiminnan seurauksena, missä bakteerit käyttävät orgaanista materiaalia ravintonaan muodostaen rikkivetyä. Pelleteissä itsessään ei ole bakteereita jäljellä, johtuen valmistuksessa käytetystä lämmöstä. Kuivat pelletit eivät myöskään ole optimaalinen kasvualusta mikrobeille, joten pelletteihin on jostain ulkopuolelta päässyt bakteereja ja todennäköisesti myös kosteutta. Kohonnut metaanin ja hiilidioksidin määrä tukee tätä teoriaa.

Vaikka metaani kuvaa kaikkien hiilivetyjen kokonaismäärää, niin edellisessä kokeessa havaittujen orgaanisten aineiden määrät olivat todella pieniä. Voidaankin olettaa, että suurin osa orgaanisista yhdisteistä on metaania. Metaanin muodostumisen aiheuttama lämpötilan nousu voi kuitenkin nostaa helposti muiden haihtuvien orgaanisten yhdisteiden määrää.

Metaania syntyy bakteeritoiminnan seurauksena hapettomissa ja kosteissa olosuhteissa glukoosista muodostaen hiilidioksidia ja metaania. Kyseessä on

spontaani reaktio, koska $\Delta G < 0$. (Thauer, 1998) (Yazdanpanah, Evolution and stratification of off-gasses in stored wood pellets, 2013)



Bakteerien muodostuminen on eksoterminen reaktio, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Kyseinen reaktio vapauttaa lämpöä, mikä kiihdyttää hiilimonoksidin ja hiilivetyjen syntymistä. Ilomantsin näytteessä happi oli kulunut loppuun, niin on mahdollista, että kaikki vapaa happi on reagoinut rasvahappojen kanssa muodostaen maksimaalisen määrän hiilimonoksidia ja hiilivetyjä, koska kohonnut lämpötila on nostanut kaasujen muodostumisnopeutta. Kokeissa ei kuitenkaan suoritettu mittauksia lämpötilan muutoksista. Laboratorioanalyseissä ei myöskään mitattu bakteereita tai homeita, joten täyttä varmuutta teorialle ei saada.

ISO 10156 – standardi määrittelee menetelmän analysoida, onko jokin kaasuseos leimahtavaa. Standardin mukaan Ilomantsin pellettinäytteen muodostama kaasu ei ole leimahtavaa. Vilppulan pitoisuudet ovat Ilomantsia pienemmät, joten myöskään niistä ei aiheudu räjähdysvaarallista kaasuseosta. (European Standard, 2010)

6. PELLETTIEN VARASTOINTI SALMISAAREN VOIMALAITOKSELLA

6.1. Salmisaaren pellettilaitteisto

Pellettienpolton ensimmäisessä vaiheessa Salmisaaren voimalaitoksella on tarkoitus polttaa puupellettiä kivihiilen seassa 5 – 7 % polttoainetehosta. Pellettien poltto tapahtuu suoralla seospoltolla. Pellettejä varastoidaan kahdessa tuhannen kuution siilossa Salmisaaren voimalaitosalueella. Siiloista pelletit kuljetetaan kuljettimia pitkin voimalaitokselle, missä ne sekoittuvat hiilenjakajassa kivihiilen joukkoon. Hiilenjakajan jälkeen puun ja kivihiilen seos jauhetaan kivihiilimyllyissä. Jauhettu polttoaine seos johdetaan samoja pölykanavia pitkin kattilaan, jossa se poltetaan yhteisissä polttimissa.



Kuva 4. Salmisaaren pellettsiilot - Kuva: Helen Oy

Salmisaaren pellettilaitteisto toimii täysin automaattisesti. Laitteistoa ohjataan Salmisaaren valvomosta, minkä takia ainoastaan häiriö- ja huoltotöissä tarvitaan henkilöstöä pellettien varastointialueella. Ainoastaan kuormaa purettaessa rekankuljettaja altistuu pellettien puupölylle muutamien minuuttien ajan kuormaa

purkaessaan. Tämä pienentää merkittävästi työterveysriskejä, koska työntekijöiden altistumisajat mahdolliselle puupölylle ja pelleteistä haihtuville kaasuille jäävät lyhyiksi.

Siilojen ilmanvaihto on toteutettu pussisuodattimella, jonka tehtävänä on suodattaa siiloista haihtuvaa ilmaa. Pussisuodattimessa on paineilmaravistelu, mikä irrottaa mahdollisesti suodattimeen kertyneen pölyn. Pussisuodatin on koteloitu täysin, mikä estää sateen pääsemästä sisään. Kaikki siilojen vaihtoilma kulkee suodattimen kautta. Tämä tekee siiloista merkittävästi erilaisen ympäristön kuin laboratorikokeissa, koska ilma pääsee vaihtumaan koko ajan.

6.2. Siilon varastotilan analysointia

Salmisaaren pellettilaitteistoa ohjataan Metso DNA prosessinohjausjärjestelmän kautta. Molempien siilojen katossa on happi-, hiilimonoksidi- ja lämpötilamittarit.



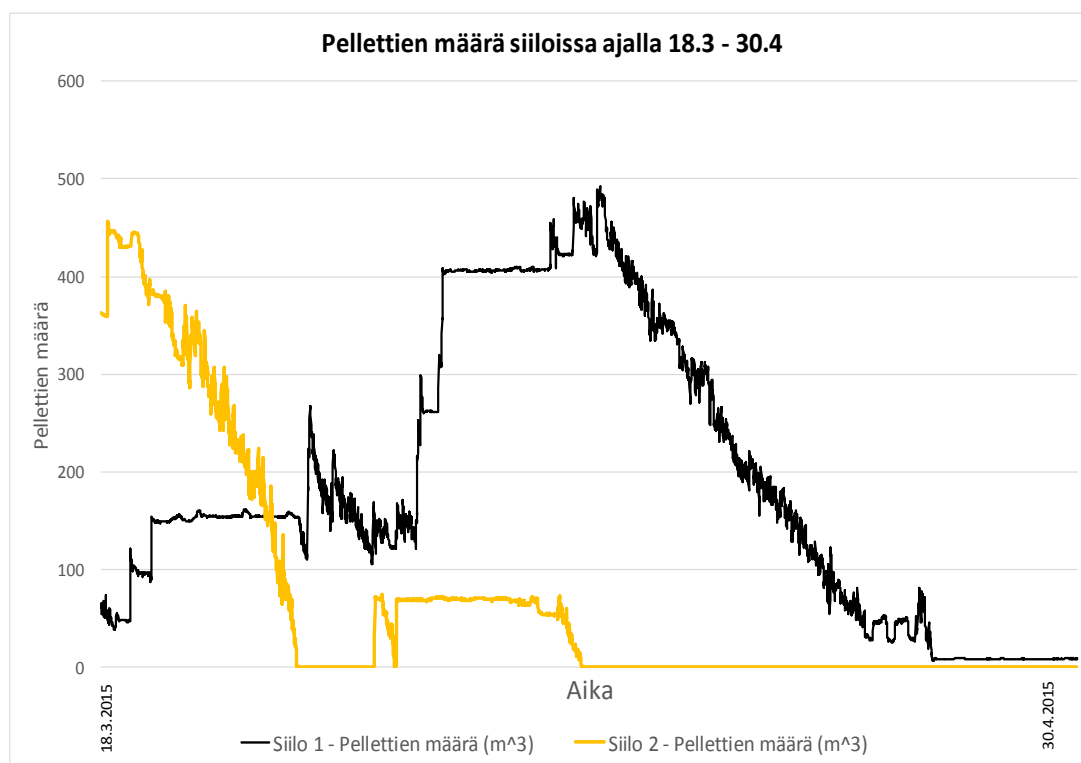
Kuva 5. Honeywellin toimittamat CO-mittarit

Hiilimonoksidimittari on Honeywellin toimittama Series 3000 MkII, jonka tarkkuudeksi luvataan ± 2 PPM. Happimittari on myös asennettu, mutta sen kytkeminen ja kalibrointi eivät ole olleet tätä työtä tehdessä vielä täysin valmiina.

Tässä työssä käsiteltävät arvot on kerätty MetsoDNA-järjestelmästä. Arvot on siirretty Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmaan, jossa niitä on analysoitu.

Tarkasteltavaksi ajanjaksoksi valikoitui 18.3 – 30.4. Tällä aikavälillä hiilimonoksidi- ja lämpötilamittarit oli saatu kytkettyä automaatiojärjestelmään ja niiden arvot olivat tämän työn käytettävissä. Arvoja on otettu kymmenen minuutin välein, jotta tulokset olisivat mahdollisimman tarkkoja ja pienetkin muutokset näkyisivät. Valittuna ajanjaksona suoritettiin pitkiä pelletinpolton koeajojaksoja. Aikaväli siis kuvaa parhaiten todellista tilannetta kun ensi lämmityskaudella pellettejä poltetaan yhtäjaksoisesti syksystä kevääseen.

Kyseisellä ajanjaksolla käytettiin pääasiassa ykkössiiloa. Kakkossiiloa käytettiin aiemmin ennen tässä työssä tarkasteltavaa ajanjaksoa. Sen täyttämässä tai purkamisessa ei havaittu ongelmia.

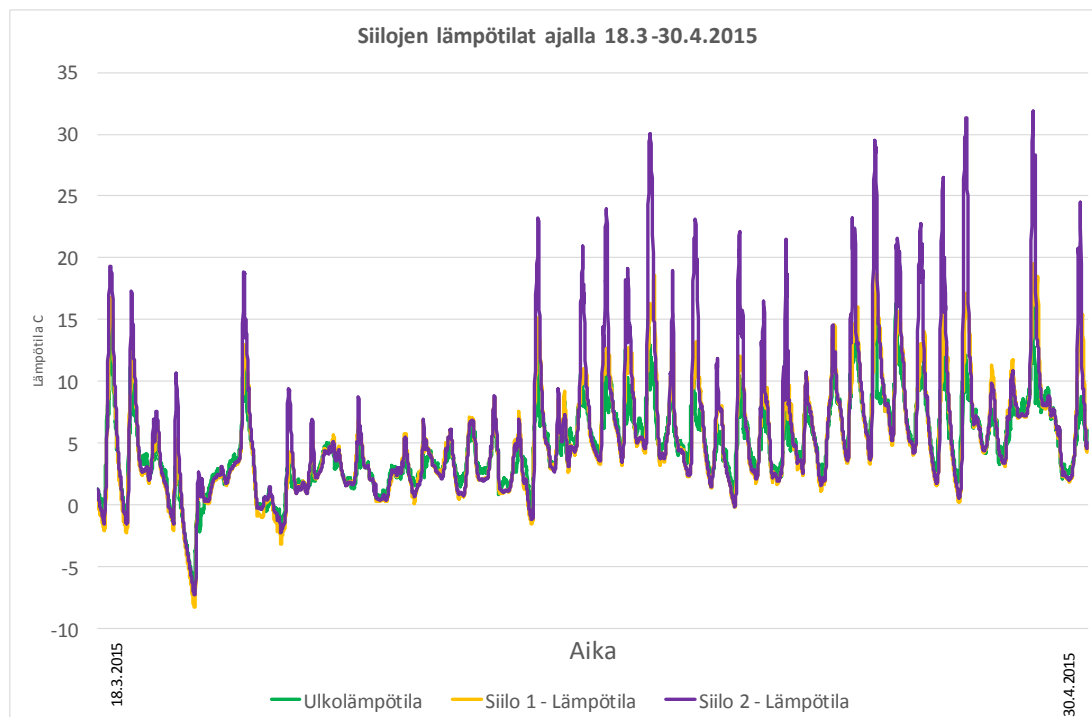


Kuva 6. Pellettien määrät

Kuva 6 kuvaa pellettien määrää siiloissa tarkastellulla aikavälillä 18.3 – 30.4.2015. Ykkössiilossa saavutettiin korkein arvo 483m³ 19.4. Tällöin pellettien ja ilmatilan (*Headspace*) suhde on noin 50/50, koska yhteen siiloon mahtuu tuhat kuutiota pellettejä.

6.2.1. Siilojen lämpötila ja pellettien itselämpeneminen

Kuten tässä tutkimuksessa on aikaisemmin todettu lämpötila vaikuttaa merkittävästi puupelleteistä haihtuviin yhdisteisiin ja pellettien itselämpenemiseen. Pellettien itselämpenemisen rajaksi on ehdotettu kahden asteen nousua kahdessa vuorokaudessa. Tämän havaitseminen kuitenkin vaikeutuu Salmisaaressa johtuen ulkona olevista siiloista ja ulkoilmasta johtuvasta luontaisesta lämpötilan vaihtelusta.



Kuva 7. Siilojen lämpötilojen suhde ulkolämpötilaan

Kuvasta 7 nähdään, että siilojen lämpötila noudattaa hyvin tarkasti ulkolämpötilan vaihteluita. Tuntemattomasta syystä siilon kaksi lämpötila on kuitenkin noussut huomattavasti korkeammaksi kuin siilon yksi lämpötila. Pellettejä ei kuitenkaan ole tarkastelujakson loppupuolella enää varastoitunut, joten itselämpenemisestä ei ole kysymys.

Pellettien määrällä ei näytä olevan vaikutusta siilossa olevan ilmatilan lämpenemiseen. Pellettejä on siiloissa aikavälillä huomattavasti eri suuria määriä. Tarkasteltavan ajanjakson alussa siilossa kaksi oli yli 400 kuutiota, kun taas ykkössiilossa oli vain reilu sata. Myöhemmässä vaiheessa siiloa yksi käytettiin, kun

taas siilo kaksi ajettiin tyhjäksi. Kaikissa tapauksissa sisälämpötilat noudattavat täysin ulkolämpötilan trendejä.

Siilossa kaksi saavutetaan ulkolämpötilan huippukohdissa huomattavasti korkeampia arvoja kuin siilossa yksi. Siilossa ei kuitenkaan ole ollut pellettejä tänä aikana. Lämpötila on saattanut nousta huonommasta ilmanvaihdosta johtuen. Aurinko on lämmittänyt siiloa ja kuuma ilma ei ole päässyt siilosta ulos. Myös huonosti kalibroitu mittari on mahdollinen selitys ilmiölle. Erot eivät kuitenkaan ole kovinkaan merkittäviä, joten toimenpiteille ei ole välitöntä tarvetta.

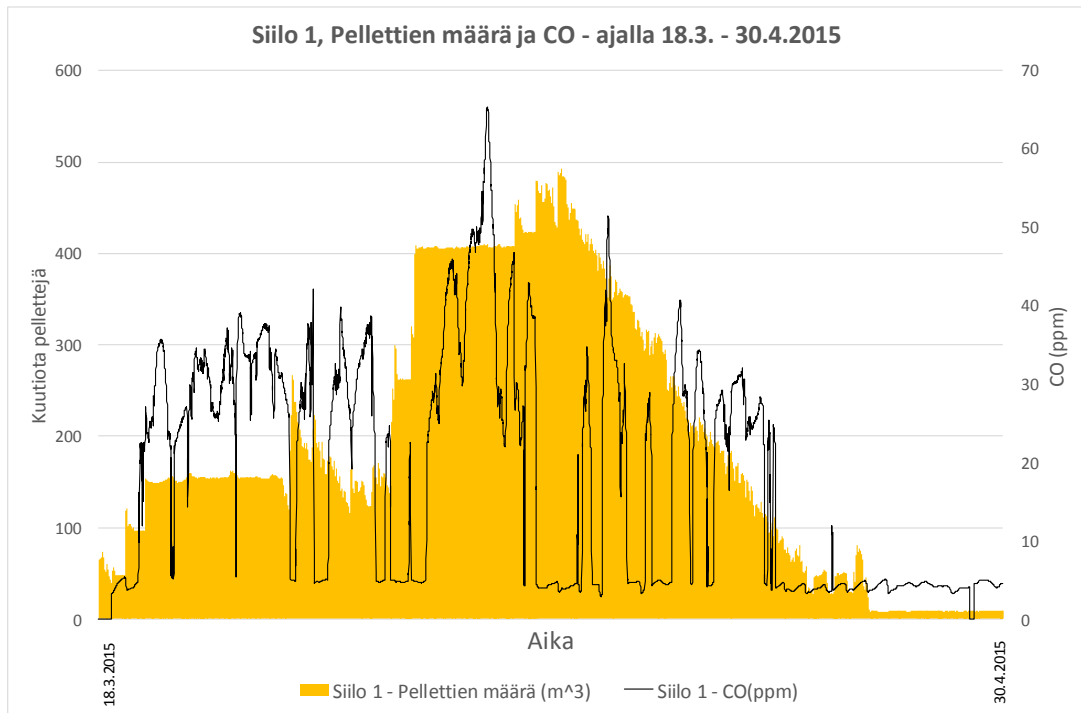
Pellettien itselämpenemistä ei siis voida havaita kyseisellä tarkastelujaksolla mitattuna siilon vapaan ilmatilan lämpötilaa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö lämpenemistä voisi tapahtua. Pellettien lämpeneminen alkaa kasan keskeltä. Lämpötilan nousu on kuitenkin aluksi suhteellisen hidasta, mikä ei vielä näy ilmatilan lämpenemisessä. Ongelmia voi kuitenkin syntyä, mikäli pelletit aiheuttavat kytöpalon siilon sisällä. Kytöpalo on kuitenkin huomattavasti todennäköisemmin havaittavissa hiilimonoksidin nousuna kuin lämpötilan nousuna.

Molemmissa siiloissa yöllä lämpötila on laskenut kylmemmäksi kuin ulkolämpötila. Tämä johtuu todennäköisesti erilaisista mittareista ja mittarien eri paikoista. Ulkolämpötilamittari sijaitsee Salmisaaren A-voimalaitoksen ulkoseinässä.

6.2.2. Hiilimonoksidin muodostuminen

6.2.2.1. Siilo 1

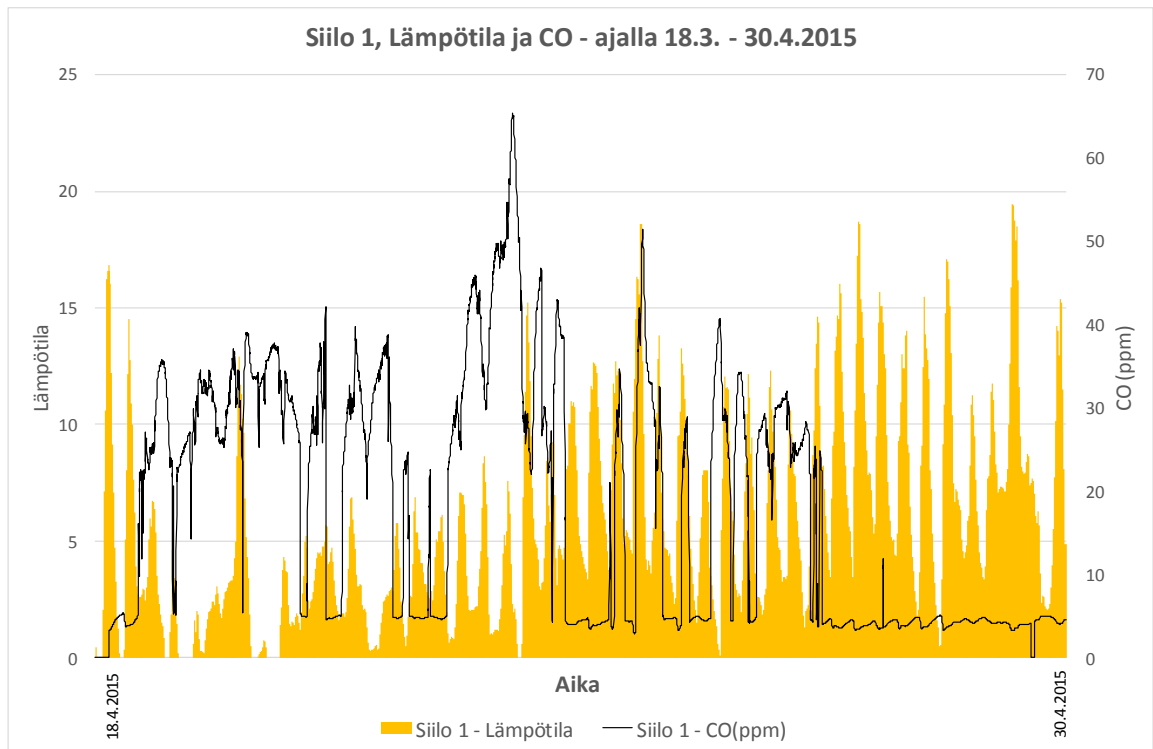
Laboratoriotuloksista saatiin tietoa, että Salmisaarella käytettävät Vapon pelletit muodostavat erittäin merkittäviä määriä hiilimonoksidia. Hiilimonoksidin ja happikadon tiedetään olevan merkittävin pellettien varastoinnin aiheuttama työterveydellinen riski.



Kuva 8. Siilo 1, pellettien määrä ja hiilimonoksidipitoisuus

Kuvasta 8 nähdään ykkössiilon hiilimonoksidin suhde säilöttyihin pelletteihin. Suurin hiilimonoksidin arvo oli 63 ppm, kun pellettejä oli 406 kuutiota. Pellettien määrästä nähdään, että 1.4. – 6.4 välisenä aikana pellettien määrä on noussut noin 150 kuutiosta yli 400 kuutioon eli tuoreita pellettejä on tuotu merkittäviä määriä. Tämän jälkeen pellettejä ei kuitenkaan ole purettu, vaan ne ovat olleet varastoituina. Tämä on aiheuttanut hiilimonoksidin pitoisuuden kasvamisen merkittävästi.

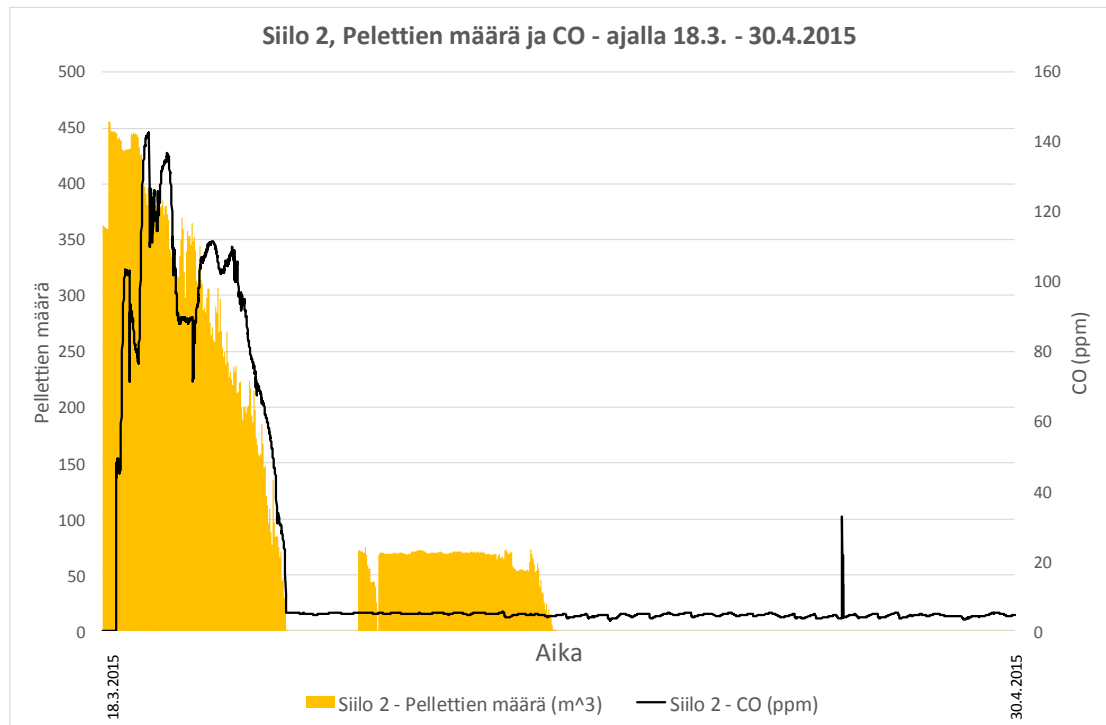
Hiilimonoksidin määrä vaihtelee erittäin voimakkaasti päivien välillä. Pienin arvo on noin viisi ppm ja piikit ovat 30 – 40 ppm. Suurin arvo havaittiin, kun siiloon oli tuotu tuoreita pellettejä ja niitä ei ollut purettu. Hiilimonoksidin HTP_{8h} – arvo on 30 ppm ja HTP_{15min} – arvo on 75ppm, joten merkittävää työterveydellistä riskiä ei siilon sisällä pääse syntymään.



Kuva 9. Siilo 1 lämpötilan ja hiilimonoksidin muodostuminen

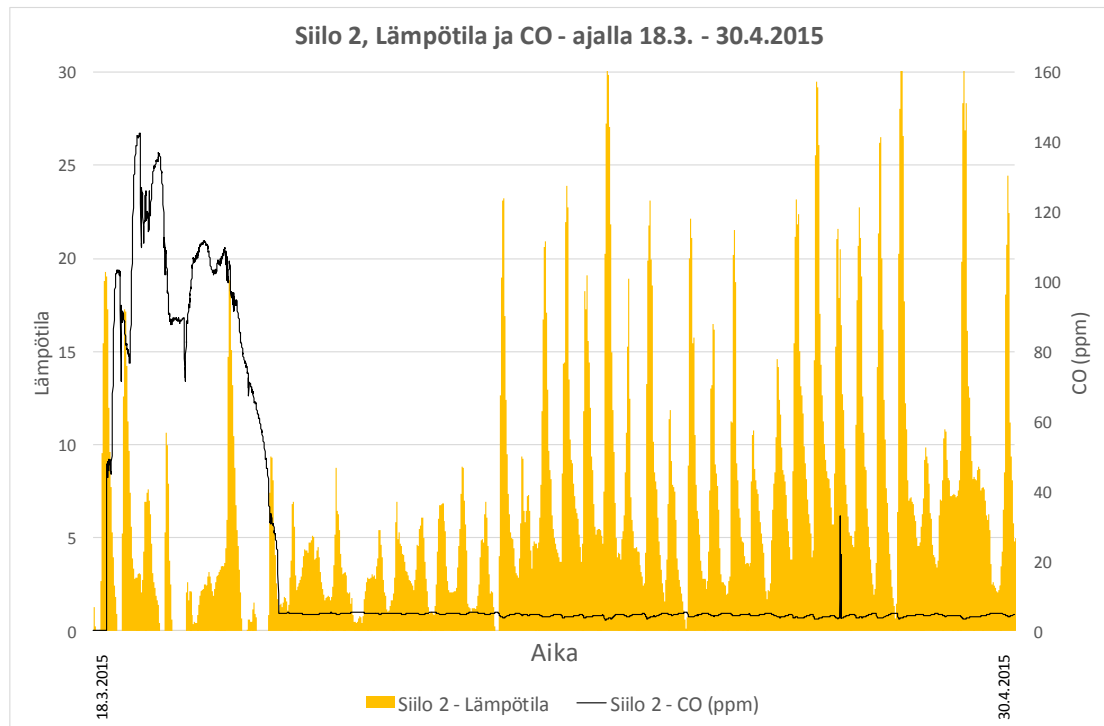
Rasvahappojen hapettumisen tiedetään alkavan muodostaa hiilimonoksidia noin viidessä lämpöasteessa. Tarkasteltavana ajanjaksona lämpötila ylitti päivisin pääsääntöisesti viisi astetta, mutta öisin meni sen alle. Kuvasta 9 nähdään, lämpötilan ja hiilimonoksidin muodostumisen välinen yhteys. Hiilimonoksidin määrä tekee aaltoliikettä lämpötilan kanssa. Toisina päivinä lämpötilan noustessa hiilimonoksidin määrä nousee samalla, mutta näin ei kuitenkaan tapahdu aina. Täyttä varmuutta lämpötilan ja hiilimonoksidin määrän vaihtelulle ei voida kuvaajan perusteella tehdä.

6.2.2.2. Siilo 2



Kuva 10. Siilo 2 hiilimonoksidin ja lämpötilan suhde

Kakkossiilossa hiilimonoksidipitoisuus ei heittele läheskään niin merkittävästi kuin ykkössiilossa. Alussa nopeasti nouseva johtuu mittarin käyttöönotosta kyseisellä ajanjaksolla. Hiilimonoksidin määrä laskee tasaisesti pellettejä purettaessa. Myöhemmin tarkasteltavalla ajanjaksolla siiloon lastataan vielä pieni määrä pellettejä. Niistä ei kuitenkaan vapaudu yhtään hiilimonoksidia tai ainakaan mittari ei niihin reagoi.



Kuva 11. Siilon 2 lämpötila ja hiilimonoksidi

Kakkossiilossa lämpötilan vaihtelu ei aiheuta merkittäviä heilahteluita hiilimonoksidin syntymisessä. Hiilimonoksidimittari oli toiminnassa verrattain lyhyen ajan kun pellettejä varastoitii, joten täyttä johtopäätöstä asiasta ei voida todeta.

6.2.2.3. Yhteenvedo ja kehitysehdotuksia

Lämpötilalla, pellettien tuoreudella ja vapaalla hapella tiedetään olevan vaikutusta pelleleistä haihtuviin yhdisteisiin ja itselämpenemiseen. Automaatiojärjestelmästä saadun datan perusteella ei asiaa pystytä täysin varmistamaan. Ykkössiilossa on havaittavissa hiilimonoksidin muodostumisen ja lämpötilan yhteydessä korrelaatiota, lämpötilan noustessa myös siilon hiilimonoksidipitoisuus nousi. Kaikissa tilanteissa näin ei kuitenkaan käynyt.

Sytä, miksi hiilimonoksidipitoisuus laski alle kymmeneen, ennen kuin taas nousi, voi vain arvailla. Siiloissa ei ole koneellista ilmanvaihtoa, mikä kytkeytyisi automaattisesti päälle. Yhtenä ratkaisuna voi olla luonnollinen tuulen syntyminen ja siitä johtuva siilon tehokkaampi tuulettuminen. Siilossa lämpötila ei laske yön tullen yhtä nopeasti kuin ulkona. Kevättalvella kylmä meri jäädyttää ilman nopeasti. Tällöin siiloissa oleva ilma on lämpimämpää eli kevyempää, ja pyrkii ulos katossa olevasta

tuuletusaukosta jolloin hiilimonoksidipitoisuus laskee. Öisin lämpötila laskee alle viiden asteen, jolloin rasvahappojen hapettuminen pysähtyy ja uutta hiilimonoksidia ei pääse syntymään. Päivällä lämpötila nousi taas yli viiden jolloin hapetusreaktio käynnistyi. Kakkossiilossa ei kyseistä ilmiötä pystytä huomaamaan, johtuen pellettien vähäisistä varastointimääristä.

Siilojen lämpötilat heittelivät erittäin paljon keskenään. Kakkossiilossa mitattiin huomattavasti lämpimämpiä lukemia kuin ykkössiilossa. Vastaavasti öisin ykkössiilon lämpötila oli kylmempi, jopa ulkoilmaa kylmempi. Siilot ovat identtisiä ja niissä ei ole rakenteellista eroa. Voidaankin olettaa, että näinkin suuret vaihtelut johtuvat mittareiden epätarkkuudesta tai automaatiojärjestelmän epätarkasta kalibroinnista. Erot eivät kuitenkaan ole merkittäviä, joten toimenpiteisiin ei ole tarvetta.

Tarkastellun ajanjakson aikana ei itselämpenemisestä saatu merkkejä. Vapaan ilmatilan lämpötilan mittaaminen ei kuitenkaan ole tarpeeksi tarkka menetelmä todetukseen pellettien itselämpenemistä. Pellettien lämpeneminen voi johtaa kytöön ja happea saadessaan aiheuttaa tulipalon. Hiilimonoksidimittari havaitsee mahdollisen kydön huomattavasti paljon aikaisemmin ennen kuin siilon ilman lämpötila alkaa nousta.

6.3. Siilojen teoreettinen hiilimonoksidipitoisuus

Pellettien laskennallisia haihtuvia kaasuja voidaan mallintaa yhtälöllä. Tällä voidaan laskea vapautuneen kaasun määrä kun tunnetaan pellettien varastointimäärä ja olosuhteet. Yhtälö perustuu oletukseen, että ajanhetkellä nolla säiliössä on normaali ilma, 79 % N₂ ja 21 % O₂. Typen ollessa inerttikaasu se ei osallistu reaktioon, eikä näin ollen häviä eikä lisäänty. Näillä oletuksilla voidaan johtaa kaava, jota kutsutaan päästökertoimeksi: (Kuang X. , ym., 2009)

$$f_i(g/kg) = n_i M_{wt} / M_p = \frac{P C_i V_{g0} M_{wt} C_{N0}}{R T M_p C_N}$$

(9)

missä,

f_{CO} (g/kg) on päästökerroin, päästetty määrä kaasua per varastoitu kilogramma puupellettejä

n_i on haihtuvan yhdisteen ainemäärä

M_{wt} on haihtuvan yhdisteen moolimassa

M_p on varastoitujen puupellettien kokonaismassa

P on paine

C_i on haihtuvan yhdisteen konsentraatio

V_{g0} on kokonaiskaasutilavuus alussa

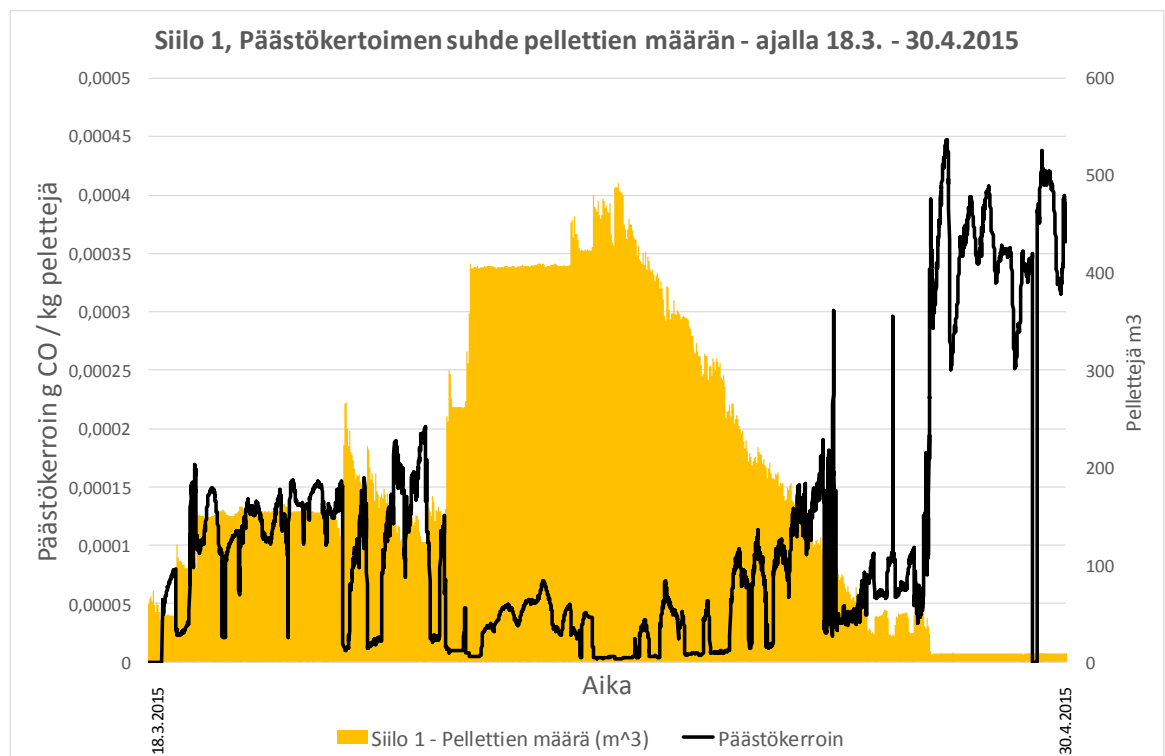
C_{N0} on typen määrä alussa

C_N on typen määrä lopussa

R on yleinen kaasuvakio

T on lämpötila

Kaavan yksinkertaistamiseksi voidaan olettaa typen olevan inertti kaasu ja näin ollen sen määrä alussa ja lopussa on sama. Laskelmissa on myös oletettu, että kaikki hiilimonoksidi on kertynyt pelleteistä yli jääneeseen vapaaseen tilaan. Pellettien tilavuutena on käytetty arvoa 600 kg/m^3 . Kuvassa 12 on kuvattu, kuinka päästökerroin käyttäytyy pellettien määrän suhteessa.



Kuva 12. Päästökertoimen suhde pellettien määrään sillossa 1

Kuten tässä tutkimuksessa on aikaisemmin todettu, vapaan hapen määrän tiedetään vaikuttavan pelleteistä muodostuvan hiilimonoksidin määrään. Suurimmat päästökertoimen arvot saavutetaan, kun pellettejä on siilossa vähän eli tällöin vastaavasti vapaana olevan tilan määrä on suurin. Suurin päästökertoimen arvo on saavutettu 25.04 jolloin pellettejä siilossa oli ainoastaan 8,2 m³, päästökerroin oli tällöin 4,48*10⁻³. Lukemaa voidaan pitää verrattain epätarkkana johtuen pellettien erittäin vähäisestä määrästä. Se kuitenkin kuvastaa laskennallista huonoita mahdollista tilannetta hiilimonoksidin haihtumisesta pelleteistä.

Huonoimmassa laskennallisessa tilanteessa HTP_{15min} – arvon ylittävä pitoisuus (75 ppm) siilon ilmatilassa saavutetaan kun pellettejä varastoidaan 250 m³. Vastaavasti HTP_{8h} – arvo ylittyy jo 120 m³ varastoinnilla. Pitää muistaa, että todellisuudessa päästökerroin laskee kun vapaan olevan hapen määrä vähenee. Tarkastelu välillä 18.3 – 30.4 lämpötila on ollut verrattain viileää, noin 0 – 10 astetta. Päästökerroin kasvaa lämpötilan noustessa, joten onkin mahdollista että saavutetaan vieläkin suurempia päästökertoimia. Pellettien käyttö ja varastointi kohdistuu talvikuukausille, joten voidaan olettaa että merkittävästi yli 10 asteen ulkolämpötiloja ei tavata vastaisuudessakaan.

Laskelmista nähdään, että pellettien varastointia pitkiä aikoja tulee välttää. Pelleteistä pystyy haihtumaan merkittäviäkin määriä hiilimonoksidia, mikä voi aiheuttaa työterveydellistä vaaraa, mikäli turvallisuusohjeita laiminlyödään.

6.4. Työterveys

Pelleteistä haihtuu, esimerkiksi hiilimonoksidia, todella suuria määriä. Siiloissa eikä niiden välittömässä läheisyydessä kuitenkaan työskennellä vakituisesti, jolloin pitkäaikaista altistumista ei pääse tapahtumaan. Laboratorioanalyysien perusteella voidaan todeta, että ainoastaan hiilimonoksidi ja happikato ovat tällä hetkellä käytettävillä valkoisilla puupelleteillä ainoat potentiaaliset työterveysriskit. Suurin vaara tulee siitä, että ihminen ei pysty aistimaan kumpaakaan näistä omilla aisteillaan. Pellettejä varastoidessa kasvanut hiilimonoksidin määrä kuvaa yleisesti myös vähentynyttä happipitoisuutta, koska happi reagoi rasvahappojen kanssa muodostaen hiilimonoksidia. Happikato ja kohonnut hiilimonoksidi syntyvät vain

siilon sisälle. Siilon sisälle ei kuitenkaan tarvitse missään tilanteessa mennä jos siellä on pellettejä.

Siilossa on ylhäällä luukku, josta näkee siiloon. Suurimpana yksittäisenä riskinä voidaankin nähdä tilanne, jossa työntekijä menee avaamaan luukun vastoin ohjeita. Tällöin hän altistuu siilossa olevalle mahdollisesti myrkylliselle ilmaseokselle.

6.4.1. Pellettikuorman purkaminen

Työterveyslaitokselta tilattiin selvitys pellettien purun vaikutuksesta työntekijän työterveyteen. Selvityksessä mitattiin tässä työssä käsiteltyjä työterveydellisiä yhdisteitä ilmasta. Näitä olivat: hengitettävä pöly, aldehydit, orgaaniset hapot, haihtuvat orgaaniset yhdisteet, hiilimonoksidi, rikkivety, sekä mikrobit ja endotoksiinit. Mittaus suoritettiin aamulla 18.3.2015. Pellettikuorma oli lähtenyt aamuyöllä Vapon Vilppulan tehtaalta ja oli aamulla seitsemän aikaan Salmisaassa. Mittaus suoritettiin kiinteästä mittapisteestä, mikä oli mahdollisimman lähellä sitä pistettä jossa kuski oleskelee purun aikana.



Kuva 13. Pellettirekan purku Salmisaassa. Kuva: Helen Oy

Tuloksia vertaillaessa käytetään Sosiaali- ja terveysministeriön HTP-arvoja, paitsi endotoksiineille ja homeille. Alankomaalainen ja pohjoismainen asiantuntijoista koostunut ryhmä on ehdottanut endotoksiinien kahdeksan tunnin altistumisen raja-arvoksi 90 EU/m³. EU tarkoittaa tässä yhteydessä yhtä endotoksiiniyksikköä (*Endotoxin Unit*). Yksi endotoksiini yksikkö vastaa suunnilleen 100 picogrammaa *E. Coli* bakteeria.

Bakteeri-, sieni- ja itiöpitoisuuksille ei ole määritetty raja-arvoja, joten jokaista tapausta pitää tutkia erikseen. Toimistoissa homepitoisuudet ovat yleisesti tasolla 10 – 100 cfu/m³. Talvisin yli 500 cfu/m³ sieni-itiöpitoisuutta ja 4500 cfu/m³ bakteeripitoisuutta pidetään kohonneena. Työympäristössä joissa on luontaisia mikrobilähteitä homepitoisuus voi olla 10³ – 10⁷ cfu/m³. Homeiden ja mikrobien terveyshaittoihin vaikuttaa kuitenkin ihmisten yksilölliset ominaisuudet ja mikrobilaji, joten tarkkoja raja-arvoja ei voida sanoa.

Pellettien purussa havaitut hiilimonoksidipitoisuudet olivat minimaalisia. Suurin mitattu arvo oli 5,5 ppm. Arvo saatiin vähän ennen kuin perävaunun purku alkoi. Toinen pienempi piikki havaittiin peräosan purun aloittamisen jälkeen. Pelletit toimitettiin rekalla, jossa oli muovipressulla peitetty kuorma. Pelletteihin ei päässyt kosteutta, mutta ilma pääsee vaihtumaan kuljetuksen aikana, mikä varmasti pienentää hiilimonoksidipitoisuuksia. Kuorma on kuljetettu yö aikaan, jolloin on ollut kylmä. Salmisaassa on aamulla kello seitsemän ollut nolla astetta, joten on mahdollista, että pellettien kuljetuksen aikana lämpötila ei ole kertaakaan noussut yli viiden asteen, jolloin hiilimonoksidia ei ole syntynyt. Hiilimonoksidikuvaaja on esitetty liitteessä 2.

Mikäli ulkoilman lämpötila olisi merkittävästi korkeampi, olisi hiilimonoksidipitoisuus varmasti suurempi. Pellettejä toimitetaan kuitenkin voimalaitokselle pääasiassa talvisaikaan aamuisin, jolloin ulkolämpötila on usein alle viiden asteen. Tällöin hapettumisreaktio ei käynnisty, eikä näin ollen hiilimonoksidia synny merkittäviä määriä.

Puupölyä havaittiin erityisesti rekan ja perävaunun purkujen alussa sekä siivouksen aikana. Pölypitoisuudet ovat suuntaa antavia, koska mittaria ei ole kalibroitu puupölylle. Pölypitoisuus käy todella korkealla kuorman purkua aloittaessa. Hetkellinen pölypitoisuus ylittää 50 mg/m^3 arvon, kun kahdeksan tunnin HTP-arvo uusilla tuotantolaitoksilla on 1 mg/m^3 . HTP-arvo ylittyy myös perän purkua aloittaessa ja siivouksen aikana. Yhteensä kuitenkin kuljettaja altistui HTP-arvoa suuremmille pitoisuuksille 11 minuutin ajan eri työvaiheissa. Kyseessä on niin lyhyt aika, että Työterveyslaitoksen tekemän selvityksen mukaan se ei aiheuta työntekijälle merkittävää terveydellistä haittaa. (Työterveyslaitos, 2015)

Aldehydejä tai orgaanisia happoja ei mittauksissa havaittu. Kaikki arvot jäivät alle analyysimenetelmän määrittämissä raja-arvoissa. Korkeimmat haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet havaittiin bentseenillä, jonka pitoisuus oli $3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Tämä on kuitenkin vain 0,1 % sitovasta raja-arvosta. Aldehydeistä tai orgaanisista aineista ei näin ollen aiheudu työntekijälle työterveydellisiä haittoja.

Endotoksiineja havaittiin 8 % *DECOSin* ja *NEGIN* antamasta suositellusta työhygieenisestä raja-arvosta. Alhainen endotoksiinipitoisuus kertoo myös pellettierän hyvästä laadusta. Bakteerit tuottavat endotoksiineja, joten pieni endotoksiinipitoisuus kuvastaa myös vähäistä bakteeritoimintaa pellettien kuljetuksen aikana.

Työntekijän altistuminen pellettikuormaa purettaessa on vähäistä. Suurin altistuminen tulee puupölystä. Työterveyslaitos suosittelee siivoukseksi imurointia, mikä vähentäisi työntekijän altistumista entisestään pölylle, koska lakaiseminen nostattaa puupölyä ilmaan altistaen työntekijän puupölylle. Työntekijälle suositellaan myös tarpeeksi suurta varoetäisyyttä luokkuja avatessa jolloin altistuminen puupölylle pienenee entisestään. (Työterveyslaitos, 2015)

6.5. Turvallisuuden parantaminen

Tässä luvussa esitellään kaksi järjestelmää, joilla voidaan merkittävästi parantaa pellettien käytön turvallisuutta voimalaitoksella. CO-mittaus on järjestelmänä huomattavasti halvempi ja yksinkertaisempi, mutta ei tarjoa suojaa

ongelmatilanteita varten, vaan ainoastaan mahdollistaa tehokkaamman ennaltaehkäisyn kun mahdollinen kytö pystytään havaitsemaan.

Räjähdyksen tukahduttamisjärjestelmä tarjoaa suojan mahdollisia räjähdyksiä vastaan. Laitteisto on investoinneiltaan kuitenkin huomattavasti kalliimpi, mutta tarjoaa suojaa vahinkoja vastaan.

6.5.1. CO-mittaus

Merkittävästi kohonnut häikäpitoisuus tarkoittaa kytöä jossain päin prosessia. Tällä hetkellä häkämittaus löytyy molempien varastosiilojen katosta. Tällä mittauksella pystytään löytämään siiloissa mahdollisesti vaikuttava pellettien itselämpeneminen ja siitä mahdollisesti seuraava kytö. Kytöpalon havaitseminen on turvallisuuden kannalta erittäin tärkeää, koska happea saadessaan kytö voi leimahtaa aiheuttaen tulipalon. Kytevä materiaali myös hiiltyy aiheuttaen mahdollisia tukoksia siilon pohjalle, mikä estää polttoaineen syötön laitokselle.

Häkämittaus olisi syytä sisällyttää kaikkiin prosessin vaiheisiin, joissa pellettejä säilötään suurempia määriä tai voidaan poikkeustilanteessa joutua pitämään pidempiä aikoja. Tällä hetkellä pellettejä säilötään suurissa määrin ainoastaan varastosiiloissa, joissa hiilimonoksidimittarit jo löytyy. Pelletin polton kasvaessa suurempaan mittakaavaan saattaa puupellettien tai puupurun välivarastointi suuremmassa mittakaavassa tulla kysymykseen. Tällöin tulee asentaa hiilimonoksidimittarit, jotta pystytään havaitsemaan mahdollinen kytöpalo ja välttymään suuremmilta vahingoilta.

Kivihiili voi alkaa kytemään päivähiilisiilossa. Kytevän kivihiilen ajaminen prosessin läpi polttoon ei ole ongelma. Tällä hetkellä ohjeistuksena on, että kytevä kivihiili ajetaan mahdollisimman nopeasti hiilimyllyn kautta polttoon. Puupöly on kuitenkin erittäin reaktiivista ja kytevä kivihiili voi aiheuttaa esimerkiksi hiilenjakajassa syttymislähteen puupelleteille ja niistä irtoavalle puupölylle. On tärkeätä pystyä paikantamaan kytöpalo, jotta voidaan välttää puupölyn johtamista niihin paikkoihin joista voidaan varmasti sanoa, että siellä on kytöpalo. Tähän paras menetelmä on hiilimonoksidimittari.

Häkämittauksen ongelmana on esimerkiksi hiilimylyjen todella kova hiukkasvirta. Kivihiilipöly poistuu myllystä hiilipölyputkia pitkin kattilaan. Tämä aiheuttaa mahdollisille antureille erittäin kuluttavat olosuhteet, joita häkämittarien tulisi kestää.

6.5.2. Räjähdyksen tukahduttamisjärjestelmä

Räjähdyksen tukahduttamisjärjestelmässä on tarkoituksena estää räjähdyksen aiheuttamat vahingot. Järjestelmä ei estä itse räjähdystä, vaan syrjäyttää räjähdyksen sattuessa hapen jolloin räjähdys tukahtuu ennen kuin saavuttaa maksimaalisen paineen. (EU, 2005)

Tukahduttamisjärjestelmä mittaa suljetun tilan (esimerkiksi hiilimylyn tai koteloidun kuljettimen) paineen vaihtelua tai yrittää havaita kipinöintiä käyttäen hyväksi optista ilmaisinta. Paineen vaihtelu havaitsee, kun paine nousee tarpeeksi voimakkaasti, jolloin järjestelmä on havainnut räjähdyksen. Tällöin järjestelmä purkaa asennetuista suppressiopulloissa olevan aineen tilaan millisekunneissa. Järjestelmän tarkoitus on poistaa yksi räjähdyksen komponentti eli happi, jolloin räjähdys ei pääse etenemään. Aine syrjäyttää hapen, jolloin räjähdys ei kerkeä saavuttamaan maksimaalista painetta, minkä ansiosta vahinkoja ei pitäisi päästä syntymään.

Suppressiopullojen määrä ja sijoittelut riippuvat suojattavan tilan koosta, muodosta ja suurimman mahdollisen räjähdyksen voimakkuudesta. Suurimman mahdollisen räjähdyksen voimakkuuteen vaikuttaa prosessiolosuhteet, kuten lämpötila ja räjähtävän ilmaseoksen koostumus. (EU, 2005)

Räjähdyksen tukahduttamisjärjestelmä on ensisijaisesti henkilöturvallisuutta parantava järjestelmä. Räjähdyksen sattuessa joudutaan hiilimyly kuitenkin ottamaan pois tuotannosta. Suppressiopullojen vaihto aiheuttaa aina hetkellisen katkoksen suojauksessa. Toisaalta tukahdutettu räjähdys ei aiheuta niin paljoa mahdollisia aineellisia vahinkoja kuin vapaasti sattunut räjähdys, jolloin pullojen vaihtamisen aiheuttama hetkellinen katkos tuotannossa ei välttämättä ole merkityksellinen verrattuna vahinkoihin ilman järjestelmää. Hiilimyly on suunniteltu

kestämään räjähdystä ja se ei yleisesti vaurioidu räjähdyksissä. Useimmin ongelmia aiheuttaa muualla kuten hiilenjakajissa, ilmakehässä tai hiilipölyputkissa.

6.5.3. Kantoilman lämpötilan laskeminen

Hiilimylyihin syötettävä kantoilma on noin 270C°:sta. Lämpötila on hyvin lähellä hemiselluloosan hajoamislämpötilaa, jolloin hiilimylyssä syntyy kaasutusreaktio. Reaktion seurauksena hemiselluloosa hajoaa moneksi palavaksi kaasuksi, kuten hiilimonoksidiksi, metaaniksi ja vedyksi.

Puolassa vuonna 2011 tehdyn tutkimuksen mukaan 15 p-% osuuksilla puusta ei haihtunut hiilimylyissä leimahtavia pitoisuuksia palavia kaasuja. Tutkimuksessa tutkittiin normaalia ajotilannetta sekä myös äkillisiä lastiin pysäytyksiä jolloin hiilimylyihin jäi polttoainetta sisälle. Tutkimuksen perusteella missään tilanteessa kaasujen määrä ei lähesty niiden leimahdusrajaa.

Kaasut voivat kuitenkin rikastua mahdollisiin ilmataskuihin hiilimylyn sisällä. Myös puumateriaalin on havaittu rikastuvan hiilimylyihin, jolloin pitoisuudet voivat nousta korkeammaksi. Palavat kaasut prosessin sisällä myös saattavat voimistaa mahdollista tulipaloa, koska palavan materiaalin lisäksi prosessissa on myös palavaa kaasua. (Kopcynski;Glod;& Zuwala, 2011)

Laskemalla lämpötilaa pystyttäisiin ehkäisemään palavien kaasujen syntyminen. Lämpötilan laskeminen kuitenkin voi heikentää hiilen kuivumista ja lisätä palamattomien määrää ja näin ollen laskea voimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta.

6.5.4. Pölyräjähdysten estäminen

Pellettejä tuoville rekoille on asetettu turvallisuusmääräykseksi ehjät valoumpiot. Tällä pyritään minimoimaan mahdolliset kuumat kohteet ja kipinän aiheuttajat, mitkä saattavat aiheuttaa räjähdysten. Autoissa on aina myös erilaisia kuumia paikkoja, mitkä saattavat toimia energian lähteinä. Kappaleessa 4.3 on kuvattu onnettomuutta, jossa pyöräkuormaaja oli energianlähteenä aiheuttaen tuhoisan pölyräjähdysten, joten riski on todellinen.

Tärkein ja tehokkain tapa estää pölyräjähdys on puhtaanapito. Tila on syytä pitää siistinä, jolloin pystytään eliminoimaan pöly mikä saattaisi ilmaan noustessaan aiheuttaa räjähtävän ilmaseoksen. Etenkin ovia avatessa saattaa paine-erosta johtuen tulla pieni tuulenvire, mikä saattaa nostattaa pölyn ilmaan. Puhtaana pidossa tulisi käyttää imuria, millä pöly pystytään poistamaan. Lakaiseminen nostattaa pölyä ilmaan. Omien havaintojen perusteella purkutilaan ei kuitenkaan kerry merkittäviä määriä pölyä, joten pölyräjähdysten todennäköisyyttä voidaan pitää erittäin pienenä.

Kuormaa purettaessa pölyä syntyy paljon. Pelletit kaadetaan rekasta ritilän yli syöttötaskuun, mistä ne siirtyvät ruuvikuljettimella eteenpäin. Osa pelleteistä tippuu suoraan taskuun, kun taas osa osuu ritilöihin ja kimpoilee pois. Osuma ritilään hajottaa pellettiä ja synnyttää pölyä. Syöttösuppilossa on pölynpoisto, joka imee syöttösuppiloon tulevan pölyn pois. Työterveyslaitoksen mittauksen mukaan taskun ulkopuolella puupöly pitoisuudet eivät ole merkittäviä. Näin ollen purusta aiheutuvaa pölyräjähdysriskiä voidaan pitää pienenä.

Puupölyä voi kertyä kaikkialle missä pöly pääsee pois koteloituilta kuljettimilta. Puupellettiä kuljetetaan koteloituilla kuljettimilla, mitkä on myös varustettu pölynpoistolla. Avokuljetin löytyy ainoastaan yhdyssillalta, joka yhdistää pellettisiilot voimalaitokseen. Toinen avonainen paikka on kuorman purkaminen. Erilaisissa häiriö tai vikatilanteissa on mahdollista, että pölyä pääsee kertymään pinnoille, esimerkiksi pölynpoiston vioittuminen.

Yhdyssillan avokuljettimella on kohdepölynpoisto ennen kuin pelletit tippuvat kuljettimelle. Pölynpoisto poistaa elevaattorilla syntyneitä pölyä. Havaintojen mukaan pölynpoisto toimii erittäin tehokkaasti ja pölyä ei pääse käytännössä ollenkaan kertymään. Näin ollen se ei myöskään aiheuta turvallisuusriskiä. Havaintoja tehdessä pellettejä oli kuitenkin syötetty suhteellisen lyhyen aikaa. Pidemmän lämmityskauden aikana pölyn kertymistä tulee seurata esimerkiksi viikoittaisilla kierroksilla.

Häiriötilanteessa hiilimyly saattaa joutua ottamaan äkillisesti pois tuotannosta, jolloin sen sisälle jää polttoainetta eli kivihiltä ja puupellettiä. Mikäli mylly aiotaan ottaa uudelleen käyttöön, täytyy se tyhjentää ensiksi polttoaineesta, mahdollisen räjähdysvaaran takia. Tämä tapahtuu hiilimylyn hylkyluukkujen kautta, jotka sijaitsevat myllyn pohjassa. Ongelmana on hiilimylyn sisälle jäänyt mahdollisesti kytevä polttoaine. Luukua avatessa kytevä polttoaine saa happea ja saattaa leimahtaa aiheuttaen mahdollisen syttymislähteen pölyräjähdykselle.

6.5.5. Pellettierien kosteusmittaus

Eri kosteuspitoisuuden pellettejä ei saisi varastoida keskenään. Kuivemmat puupelletit alkavat imeä kosteutta kosteammista ja lämpenevät samalla. Kohonnut lämpötila kiihdyttää entisestään lämpenemistä ja lisää haihtuvien kaasujen pitoisuutta aiheuttaen työterveydellisiä ongelmia. (Nordic Innovation Centre, 2008)

Puupelletin standardi määrää alle 10 p-% kosteuden puupelleteille saapuessa. Kosteus voi kuitenkin nousta myös saapumisen jälkeen. Tämän takia kosteuspitoisuudet voivat vaihdella merkittävästikin eri kuljetusten välillä. Pellettejä käytetään talvi aikana, jolloin lunta saattaa joutua syöttötaskuun. Kosteus saattaa aiheuttaa ongelmia jo kuljettimilla kun pelletit turpoavat ja alkavat hajota.

Mittaamalla kosteuspitoisuus heti pellettien saapuessa pystyttäisiin ennakoimaan onko siilossa paljon erilaisia ja eri kosteuspitoisuudessa olevia pellettejä. Näin pystyttäisiin ennakoimaan ja havaitsemaan tapahtuuko pelleteissä merkittävää itselämpenemistä, johtuen kosteuden siirtymisestä pelletistä toiseen.

Menetelmän ongelmana on, että pelletit ovat jo siilossa, kun kosteusmittauksen tulokset saapuvat. Tämän tutkimuksen perusteella ja pellettien nopean kiertoajan seurauksena ongelmaa ei voi kuitenkaan pitää kovinkaan merkittävänä. Asiaa tulee kuitenkin seurata ja tiedostaa. Mikäli pellettien itselämpenemistä aletaan havaitsemaan merkittäviä määriä, on syytä tutkia, onko pellettierien eri kosteuspitoisuuksilla ollut merkitystä.

6.5.6. Työturvallisuus

Suurin yksittäinen onnettomuusriski on siilon tarkistusluukun avaaminen vastoin ohjeita. Luukku sijaitsee siilon päällä ja kävelytason ulkopuolella. Työntekijän täytyy siis avata luukku vasten ohjeistusta, koska vahingossa sitä ei avaa kukaan. Siilojen katolle asennettiin varoituskyltit kertomaan siiloissa mahdollisesti olevasta korkeasta hiilimonoksidipitoisuudesta.



Kuva 14. Siilojen katolla oleva kyltti, joka varoittaa mahdollisesta häikävaarasta

6.5.7. Työterveys

Kuljettajia on ohjeistettu lakaisemaan ohimenneet pelletit syöttösuppiloon. Tämä toimenpide vähentää merkittävästi ympäristöön kertyvien pellettien määrää. Vähentämällä pellettien määrää, vähenee myös mahdolliset pölyn aiheuttajat. Lakaisemista tulisi kuitenkin välttää, koska se nostattaa pölyn ilmaan ja altistavaa työntekijän hengitettävälle pölylle. Pöly tulisikin siivota ainoastaan käyttämällä hyväksi imuria, koska se ei nosta pölyä ilmaan. (Hagström, ym., 2008) Työterveyslaitos suosittelee myös puupölyn altistamisen minimoimiseksi myös imurointia, vaikka puupölylle altistuminen ei ole kovinkaan merkittävää. (Työterveyslaitos, 2015)

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Puupelleteistä tiedettiin haihtuvan merkittäviä määriä hiilimonoksidia, mutta myös erilaisia hiilivetyjä kuten aldehydejä. Vapon valmistamille puupelleteille suoritettut laboratoriokokeet tukevat kirjallisuuden havaintoja hiilimonoksidin syntymisestä. Pelleteistä haihtuu jo viikossa hengenvaarallisia määriä hiilimonoksidia. Puulajeilla ei kokeissa saatu eroja syntyneen hiilimonoksidin määrään. Tämä johtuu käytetystä mittalaitteistosta, joka mittasi ainoastaan 1000 ppm:n asti. Molemmissa näytteissä ylitettiin 1000 ppm:n raja.

Tehdyt laboratoriokokeet eivät kuitenkaan vastaa täysin todellisuutta, johtuen astian suljetusta ilmatilasta ja pellettejä ei kierrätetä. Salmisaaren voimalaitoksella pellettien kiertonopeus on suunniteltu niin, että niitä säilötään siilossa mahdollisimman lyhyen aikaa. Siiloissa myös vaihtuu ilma tehokkaasti, mikä laimentaa hiilimonoksidin konsentraatiota siiloissa. Pellettien käyttö myös ajoittuu vain talviaikaan, jolloin lämpötila on usein alle plus viiden asteen jolloin rasvahappojen hapettumista hiilimonoksidiksi ei tapahdu. Mikäli pellettejä käytetään jatkossa myös kesäaikaan, on ilmiöön syytä kiinnittää erityistä huomiota.

Hiilimonoksidipitoisuus siiloissa voi kuitenkin nousta myös kytöpalon seurauksena. Tämän takia siiloissa täytyy olla jatkuva hiilimonoksidimittaus. Luukkujen läheisyyteen asennettiin varoituskyttilä varoittamaan mahdollisesta kohonneesta hiilimonoksidipitoisuudesta. Työntekijöitä on ohjeistettava varmistamaan hiilimonoksidipitoisuuden sekä käyttämään henkilökohtaista hiilimonoksidimittaria.

Pellettilaitteisto on suunniteltu niin, että siilossa ei tarvitse tehdä päivittäistä työtä. Ainostaan erikoistapauksissa saatetaan joutua tekemään huoltotöitä siilon sisällä. Huoltotöitä varten siilo tulee kuitenkin tyhjentää, jolloin siilossa ei ole pellettejä aiheuttamassa hiilimonoksidivaaraa. Siilo tulee kuitenkin varmuuden vuoksi vielä tuulettaa ennen sisälle menoa, jotta kaikki hiilimonoksidi on varmasti haihtunut pois.

Ilmanvaihdosta ja työtehtävistä johtuen hiilimonoksidin aiheuttama työterveydellinen riski ei ole kovinkaan merkittävä. Suurimpana riskinä onkin työntekijän piittaamattomuus turvallisuusmääräyksiä kohtaan.

Osa pelleteistä haihtuvista aldehydeistä ovat erittäin myrkyllisiä, kuten formaldehydi. Aldehydeistä heksanaalia on tavattu suurimpia määriä pelleteistä haihtuvista hiilivedyistä. Heksanaalin terveysvaikutuksia ei ole tutkittu kovinkaan paljon, mutta sen tiedetään aiheuttavan ärsytystä limakalvoilla. Molemmissa laboratorionäytteissä havaitut aldehydipitoisuudet olivat erittäin pieniä, vain murto-osia sallituista määristä.

Mäntypohjaisista pelleteistä tiedettiin haihtuvan huomattavasti enemmän aldehydejä, kuin kuusesta valmistetuista pelleteistä. Laboratorionäytteet vahvistivat tämän teorian. Vilppulan pellettien aldehydipitoisuudet olivat vain kymmenesosan siitä, mitä Ilomantsin vastaavien näytteiden pitoisuudet. Vilppulan pelleteissä oli käytetty pelkästään tuoretta kuusisahanpurua, kun taas Ilomantsin pelletit sisälsivät myös mäntysahanpurua. Ilomantsin raaka-ainetta ja pellettejä oli varastoitu ennen toimittamista laboratorioon, joten merkittävä osa aldehydeistä on todennäköisesti haihtunut jo varastoitaessa. Toisaalta yhdessä tutkimuksessa sahanpurun varastointi ennen pelletöintiä muutti aldehydien haihtumisen myöhempään kohtaan. Tältä osin tulokset ovat ristiriitaisia.

Aldehydipitoisuudet olivat mitättömän pieniä, eikä niillä voida olettaa olevan vaikutusta ihmisen terveyteen. Pitoisuudet olivat kymmeniä tuhansia kertoja pienempiä kuin Sosiaali- ja terveysministeriön antamat kahdeksan tunnin altistumisen raja-arvot. Erityisesti männystä valmistetuista pelleteistä voi haihtua merkittäviä määriä hiilivetyjä. Aldehydien havaitsemista helpottaa kuitenkin niiden haju. Voimakas haju ja ärsytys limakalvoilla ovat merkki kohonneista aldehydipitoisuuksista. Tutkimuksen perusteella on erittäin epätodennäköistä, että Salmisaaren voimalaitoksen siiloissa aldehydipitoisuudet nousisivat ihmiselle vaaralliselle tasolle. Pellettejä kuljetetaan pitkiä matkoja, minkä takia suurimmat pitoisuudet ehtivät haihtua ennen kuin ne edes tulevat voimalaitosalueelle. Aldehydien olemassaolo on hyvä tiedostaa ja tilannetta on syytä seurata. Mikäli aldehydeistä löydetään uusia terveysvaaroja tai alueella havaitaan voimakasta

pistävää hajua pellettisiilojen läheisyydessä, on syytä tehdä jatkotutkimuksia. Tämän hetkisen tutkimustiedon perusteella voidaan olettaa, että aldehydeistä ei aiheudu pellettilaitteistolla työskenteleville ihmisille terveysriskiä.

Vilppulan pellettierälle suoritettiin uusiokoe, koska epäiltiin että aluksi käytetty muoviastia ei ollut täysin ilmatiivis. Tuloksista nähtiin, että hiilimonoksidipitoisuus oli korkeampi uusiokokeessa, kun käytettiin lasista ilmatiivistä astiaa. Voidaankin olettaa, että vaikka pellettinäytteet suljettiin ilmatiivisti jätessäkkeihin ja muoviastioihin kuljetusta varten, niin niistä on päässyt muovin läpi haihtumaan erityisesti erilaisia hiilivetyjä. Tämä selittäisi erittäin pienet hiilivetypitoisuudet. Ohjeistukseen pellettinäytteiden kuljetuksesta tulisi kiinnittää huomiota, jotta saataisiin varmasti tarkkoja tuloksia. Tämän työn perusteella suositellaan, että pelletit kuljetettaisiin lasisissa astioissa tehtaalta laboratorioon, jotta voidaan olla varmoja että kaasuja ei pääse haihtumaan. Tämä kuitenkin tuo logistisen haasteen, koska lasiastia on herkkä rikkoutumaan.

Ilomantsin pellettinäytteissä havaittiin myös metaania, hiilidioksidia ja rikkivetyä. Näiden voidaan olettaa syntyneen bakteeritoiminnan seurauksena, mikä on samalla tuottanut myös lämpöä. Puupelleteissä ei tavata bakteereita eikä homeita, johtuen pellettien valmistuksessa kohoavasta lämpötilasta, mikä tuhoaa mikrobit. Mikrobit eivät kasva pelleteissä johtuen alhaisesta kosteuspitoisuudesta, mikä ei ole tarpeeksi korkea mikrobien kasvamiselle. Mahdollisissa valkoisten puupellettien jatkotutkimuksissa ei välttämättä ole tarpeellista tutkia mikrobipitoisuuksia. Märissä biopolttoaineissa kuten hakkeessa kuitenkin tavataan tavallisemmin mikrobeja.

Puupölyn syöpävaarallisuudesta on ristiriitaista tietoa. Kansainvälinen terveysjärjestö WHO luokittelee kaikki puupölyt syöpävaaralliseksi, kun taas Yhdysvaltojen terveysviranomaisen vain kovapuupölyt. Puupölyn tiedetään aiheuttavan ärsytystä limakalvoilla ja astmaa, joten altistumista sille tulee kuitenkin välttää.

Pellettikuorman purku on ainut työvaihe, jossa tarvitaan työntekijää. Työterveyslaitoksen selvityksen mukaan kuljettaja altistuu puupölylle. Kuorman purkua aloittaessa ja lakaistaessa ilmaan nousee huomattavia määriä pölyä, jotka olivat korkeimmillaan 50 mg/m^3 , kun HTP8h – arvo on uusilla tuotantolaitoksilla 1 mg/

m³. Kuljettaja altistuu purun aikana kuitenkin ainoastaan 11 minuuttia HTP-arvoa korkeammille pitoisuuksille. Puupölylle altistumista pystytään vähentämään entisestään kun siivoaminen suoritetaan lakaisemisen sijaan imuroimalla.

Hiilimonoksidia, aldehydejä, orgaanisia happoja tai endotoksiineja ei havaittu merkittäviä määriä. Endotoksiineja havaittiin 8 % asiantuntijaryhmän antamasta suositellusta terveydellisestä raja-arvosta. Hiilimonoksidipitoisuus nousi ainoastaan muutaman ppm:n kuorman purkua aloitettaessa. Mittauspäivänä lämpötila oli alueella lähellä nollaa, joten hapettumisreaktio ei ollut käynnistynyt pelleteissä, minkä takia hiilimonoksidia ei ollut todennäköisesti syntynyt.

Pelleteistä haihtuvista yhdisteistä tai puupölystä ei voida tämän tutkimuksen perusteella aiheutuvan työterveydellistä vaaraa Salmisaaren voimalaitosalueella työskenteleville. Erityisesti puupölyn ja hiilivetyjen terveyshaitoista on kuitenkin tietoa saatavilla vähän. Puupölyn tiedetään aiheuttavan monia allergiaperäisiä sairauksia, mutta sen syöpävaarallisuudesta on ristiriitaista tietoa. Tutkimustuloksia on tärkeä seurata, mikäli havaitaan pienempien altistumisten olevan haitallisia työntekijöille.

Siilojen automaatiodataa tutkimalla nähtiin lämpötilan ja pellettien määrällä olevan vaikutusta syntyneeseen hiilimonoksiidiin. Erityisesti ykkössiilossa hiilimonoksidin määrän nähtiin nousevan päivisin. Öisin lämpötila laski alle viiteen celsiusasteeseen jolloin auto-oksidiivinen hapetusreaktio pysähtyi. Yön aikana hiilimonoksidin pitoisuus laski ulkoilman tasolle. Tämä johtui todennäköisesti kylmän ulkoilman ja siilon sisällä olevan lämpimämmän ilman aiheuttamasta paine-erosta ja siitä syntyneestä tuulesta, mikä puhalsi ilmaa pois siilosta.

Siilon automaatiostatusta saatujen arvojen perusteella lasketun päästökertoimen avulla saatiin puupelleteille varastointimäärät, mitkä aiheuttavat työterveydellisen vaaran. Käyttäen hyväksi tätä päästökerrointa HTP_{15min} – arvon ylittävä pitoisuus (75ppm) siilon ilmatilassa saavutetaan kun pellettejä varastoidaan 250 m³ ja HTP_{8h} – arvo ylittyy jo 120 m³ varastoinnilla. Kyseessä on verrattain vähäiset määrät pellettejä 1000 m³ siilossa. Tuloksesta pystytään toteamaan sama asia kuin mikä havaittiin laboratoriokokeista ja kirjallisuudesta. Hiilimonoksidia haihtuu pelleteistä erittäin merkittäviä määriä.

Pellettejä tuotiin lämmityskaudella pääasiassa Haukinevan ja Ilomantsin tehtaalta, vaikka laboratoriossa tutkittiin Vilppulan ja Ilomantsin pellettejä. Mittarien myöhäisestä kalibroinnista ja pellettikuljetusten verrattain vähäisestä määrästä johtuen ei pystytä toteamaan haihtuiko eri pelleteistä erilaisia määriä hiilimonoksidia varastoitaessa.

Siilojen lämpötilaa tutkittaessa ei saatu merkkejä pellettien itselämpenemisestä. Tarkasteltavana ajanjaksona pellettejä ei kuitenkaan varastoitu pitkiä aikoja, eivätkä siilot olleet täynnä. Salmisaaren laitteisto on suunniteltu mahdollisimman nopealle kiertoajalle, jotta mahdollinen itselämpeneminen pystytään minimoimaan. Mahdollisen itselämpenemisen havaitseminen siilojen vapaasta ilmatilasta on kuitenkin erittäin epätodennäköistä. Lämpeneminen alkaa kasan keskeltä, jossa se voi muuttua kytöpaloksi. On todennäköistä, että kasan sisällä on merkittävä kytöpallo ennen kuin siilon vapaan ilmatilan lämpötila on noussut niin paljon, että voidaan varmasti todeta siilossa olevien pellettien lämpenevän. Siilojen lämpötilamittarit käyttäytyivät myös erilailla, joten todennäköisesti niitä ei ole kalibroitu täysin samalla tavalla, mikä lisää niiden epäluotettavuutta itselämpenemisen havaitsemiseen.

Itselämpenemisen seuraamiseen tarvittaisiin siiloihin lämpötilamittarit myös pellettien keskelle tai siilojen ulkokuorelle. Tällainen järjestelmä on kuitenkin monimutkainen. Ongelma on ratkaistu suunnittelemalla pellettien kiertoaika mahdollisimman nopeaksi. Pellettejä varastoidaan ainoastaan talvisin lämmityskauden aikana. Itselämpenemisen tiedetään kiihtyvän korkeissa lämpötiloissa, mitä ei kuitenkaan Suomen talvessa saavuteta. Mikäli pellettiä aletaan käyttämään myös kesäaikaan Salmisaaren voimalaitoksella tai muualla tulee mahdollinen itselämpeneminen tiedostaa ja siihen on hyvä varautua.

Pellettien itselämpenemistä ei tulisi seurata lämpötilan perusteella, vaan lämpötilan nousun perusteella. Eurooppalainen pellettijärjestö, *European Pellet Council*, ehdottaa että mikäli vuorokaudessa havaitaan lämpötilan nousua yli kaksi astetta, olisi kyseessä merkittävästä itselämpenemisreaktiosta. Tällöin pitäisi aloittaa toimenpiteet itselämpenemisen pysäyttämiseksi. Kyseisen siilon pellettejä tulisi silloin johtaa suoraan polttoon. Poikkeustapauksessa pellettejä pystytään kierrättämään siilosta toiseen jolloin pystytään siirtämään itselämpeneviä pellettejä toiseen siiloon. Tällöin pelletit jäähtyvät ja lämpötilan nousu hidastuu.

Nykyisillä lyhyillä varastoajoilla ja tutkimuksen perusteella monimutkaiselle lämpötilan mittaukselle ei ole tarvetta niin kauan kuin puupellettien poltolla ei ole huoltovarmuudellista merkitystä. Kytöpalossa siilot voidaan tyhjentää pihalle ja laitoksen toiminta ei tästä häiriinny, koska puupelletit voidaan korvata kivihieillä. Mikäli kivihieiden korvaavan pelletin määrä nousee, tällöin tulisi miettiä kuinka mahdollista itselämpenemistä pystyttäisiin paremmin kontrolloimaan. Ratkaisu tähän voisi olla tarkempi lämpötilamittaus siiloihin, jolloin jo pienetkin lämpötilan nousut pystytään havaitsemaan tarkasti ja syöttämään kyseiset puupelletit polttoon.

Pölyräjähdysten mahdollisuus on ilmeinen. Laitoksella tulee huolehtia riittävästä siivouksesta, jotta pölyä ei pääse kertymään. Räjähdykseen vaatii aina pölyn sekoittumisen ilmaan. Suurin riski onkin sekundaariräjähdykset, missä tapahtuu ensiksi pieni räjähdys mikä nostattaa pölyn ilmaan ja aiheuttaa toisen suuremman räjähdysten.

Merkittävin riskitekijä on puupölyn räjähdysherkkyys. Ilmaan sekoittuneen puupölyn pienin energia, joka tarvitaan seoksen räjäyttämiseen, on 10 mJ. Tätä arvoa kutsutaan MIE-arvoksi. Hiilellä vastaava luku on hiilityypistä riippuen 55 mJ:sta yli 1000 mJ:en. Puupölyn räjähtämiseen tarvitaan siis huomattavasti pienempi energia kuin hiilipölyn vastaavaan.

Otollisin paikka pölyräjähdykselle ovat paikat, joissa on syttymislähde ja puupöly läsnä. Pellettilinjastolla on pölynpoisto joka kohdassa, kun pellettejä pudotetaan. Tällöin ne saavat mekaanisen iskun ja saattavat hajota. Puupölyä ei havaintojen mukaan pääse kertymään merkittäviä määriä pellettilaitteiston ulkopuolelle. Asiaa on kuitenkin syytä tarkkailla jatkossa ja puhdistaa paikat säännöllisesti.

Pellettejä purettaessa rekka kaataa pelletit syöttötaskuun. Syöttötaskussa on pölynpoisto, mikä imee pölyä pois purkutilanteessa. Pölynpoisto on kuitenkin vasta syöttösuppilossa, joten kuljetuksen aikana syntynyt pöly purkautuu pellettien mukana. Pellettejä kuljettavilta autoilta vaaditaan ehjät valoumpiot, jotta mahdolliset kuumat paikat minimoidaan. Kuumia osia ei kuitenkaan voi täysin eliminoida, koska monet rekan osat ovat ajon jälkeen kuumia.

Poikkeustilanteissa hiilimyllyihin jäänyt polttoaine saattaa aiheuttaa merkittävän riskitekijän pölyräjähdysten muodossa. Erityisesti polttoaineen kytessä tulee ilman

päästämistä hiilimylyyn välttää kaikin keinoin. Käytännössä tämä tarkoittaa, että hylkyluukkuja ei voida avata eikä kantoilmaa syöttää. Molemmissa tapauksissa vaarana on kytevän materiaalin leimahdus ja sen aiheuttama pölyräjähdys. Ongelmaa pystytään välttämään toimivalla ohjeistuksella, mutta räjähdysriskiä ei pystytä täysin poistamaan. Hiilimylyihin asennettava räjähdysriskin suojausjärjestelmän avulla voitaisiin poistaa merkittävästi mahdollisia räjähdysriskin aiheuttamia vahinkoja ja parantaa alueella työskentelevien työturvallisuutta.

Työturvallisuuden suurimpina riskeinä voidaan tämän tutkimuksen perusteella pitää pölyräjähdystä ja työntekijöiden piittaamattomuutta yleisiä turvallisuusmääräyksiä kohtaan. Pölyräjähdysriskin mahdollisuus pellettilaitteiston ulkopuolella on suhteellisen pieni, koska pölyä ei havaintojen mukaan juurikaan pääse laitteiston ulkopuolelle tehokkaan pölynpoiston ansiosta. Tilannetta on kuitenkin tärkeä seurata viikoittaisilla tarkastuskierroksella, jossa varmistetaan että pölyä ei ole päässyt kertymään. Prosessissa aiheutuvaa pölyräjähdysriskiä ei voida koskaan täysin poistaa, mutta sen mahdolliset seuraukset voidaan minimoida. Tärkeimpänä on ohjeistaa työntekijöille, että hiilimylyjen läheisyyteen ei saa mennä kun pellettejä poltetaan. Pakollisia pidempiaikaisia huoltotoimenpiteitä varten pellettien syöttö on syytä lopettaa hyvissä ajoin, jotta hiilimylyssä ei ole enää puupölyä. Tämä ei kuitenkaan täysin poista mahdollista räjähdysriskiä, mutta vähentää sitä merkittävästi. Hiilimylyihin asennettava räjähdysriskin suojausjärjestelmä parantaisi merkittävästi työntekijöiden turvallisuutta, koska se vähentää mahdollisen pölyräjähdysriskin aiheuttamia vahinkoja työntekijöille.

8. YHTEENVETO

Puupellettien seospolton aloittaminen kivihiiivoimalaitoksilla tuo mukanaan monia uusia merkittäviä riskejä liittyen työturvallisuuteen ja työntekijöiden terveyteen. Näistä merkittävimpinä ovat pelleteistä haihtuvat yhdisteet ja puupölyn aiheuttamat sairaudet ja kohonnut pölyräjähdysriski.

Kirjallisuuden ja laboratoriotulosten perusteella pelleteistä haihtuu hiilimonoksidia merkittäviä määriä. Siiloissa hiilimonoksidipitoisuudet eivät kuitenkaan nousseet kovinkaan korkeiksi. Suurimpana syynä tähän on tehokas tuuletus ja puupellettien nopea kiertoaika. Laboratoriokokeissa ei havaittu hiilivetyjä, vaikka niitä kirjallisuuden perusteella erityisesti mäntypelleteistä haihtuukin. Tehokkain tapa huolehtia työntekijöiden turvallisuudesta onkin ohjeistus. Työntekijälle tulee kertoa puupellettien haihduttamasta hiilimonoksidista erilaisin ohjeistuksin ja erilaisten varoituskylttien avulla.

Työntekijää tarvitaan voimalaitoksen käytön aikana ainoastaan puupellettien purkamiseen. Työhygieenisen selvityksen perusteella puupellettirekankuljettaja altistuu ainoastaan pienelle määrälle puupölyä purun alkuvaiheessa ja lakaistessaan pellettejä taskuun. Kokonaistyövaihe on kuitenkin niin lyhyt, joten merkittävää työterveydellistä riskiä purkutapahtumassa ei kuljettajalle synny. Altistumista voidaan vähentää entisestään käyttämällä hengityssuojainta purun aikana, seisomalla kauempana syöttötaskusta ja vaihtamalla lakaiseminen imurointiin.

Puupölypilven minimisyttymisenergia on huomattavasti pienempi kuin kivihiilopölyn. Tehokkain tapa ehkäistä pölyräjähdyksiä on puhtaanapito. Havaintojen perusteella pölyä ei kerry laitteiston ulkopuolelle merkittäviä määriä joten noin viikoittainen tarkastuskierros riittää. Mikäli pölyä havaitaan kertyneen pinnoille, tulee se poistaa mieluiten imuroimalla, koska lakaiseminen levittää pölyä ympäristöön.

Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että työskentely pellettilaitteistolla on turvallista ja siitä ei aiheudu työntekijälle työterveydellistä haittaa. Myöskään varastoinnista ei nykyisellä järjestelyllä voida tämän tutkimuksen perusteella aiheutuvan merkittävää turvallisuusriskiä.

LÄHDELUETTELO

- Amyotte, P.;& Eckhoff, R. (2010). Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview. *Journal of Chemical Health and Safety*, 15-28.
- Arshadi, M.;& Gref, R. (2005). Emission of volatile organic compounds from softwood pellets during storage. *Forest products journal*, 132-135.
- Arshadi, M.;Geladi, P.;Gref, R.;& Fjällström, P. (2009). Emission of Volatile Aldehydes and Ketones from Wood Pellets under Controlled Conditions. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1-9.
- Bergman, P. C. (2005). *Combined torrefaction and pelletisation*. Petten: ECN Biomass.
- Bioenergia. (2014). *Pelletin tuotanto*. Haettu 19. Marraskuu 2014 osoitteesta <http://www.pellettienergia.fi/Pelletin%20tuotanto>
- Cashdollar, K. (2000). Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 183-199.
- Cohn, C.;Lemieux, C.;Long, A.;Kystol, J.;Vogel, U.;White, P.;& Madsen, A. (2011). Physical-Chemical and Microbiological Characterization, and Mutagenic Activity of Airborne PM Sampled in a Biomass-Fueled Electrical Production Facility. *Environmental and Molecular Mutagenesis*(52), 319-330.
- Dai, J.;Sokhansanj, S.;Grace, J. R.;Bi, X.;C. Jim, L.;& Staffan, M. (Kesäkuu 2008). Overview and some issues related to co-firing biomass and coal. *The Canadian journal of chemical engineering*(86), 367-386.
- Daily Mail Reporter. (27. Helmikuu 2012). *'It could go on for days': Fears grow over huge blaze that broke out at Europe's biggest 'green' power station in Essex*. Haettu 27. Tammikuu 2015 osoitteesta <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2107082/Tilbury-Fire-100-firefighters-tackle-huge-blaze-Europes-biggest-biomass-power-station.html>
- Dayton, D. (2002). *A Summary of NOx Emissions Reduction from Biomass Cofiring*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Demers, P.;Teschke, K.;& Kennedy, S. (1997). What to Do About Softwood? A Review of Respiratory Effects and Recommendations Regarding Exposure Limits. *American Journal of Industrial Medicine*(31), 385-398.
- Deutmeyer, M.;Bradley, D.;Hektor, B.;Hess, J.;Nikolaisen, L.;Tumuluru, J.;& Wild, M. (2012). *Possible effect of torrefaction*. IEA Bioenergy.
- Ebadat, V. (2009). *Dust Explosion Hazard Assessment*. NewYork: Chilworth Global.
- Eckhoff, R. (2009). Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. *Understanding dust explosions. The role of powder science and technology*, 105-116.
- EU. (2005). *Standardi EN 14373:2005*. Brysseli: European Union.
- EU. (2009). *Standardi: EN 15210-1*. Brysseli: European Committee for Standardization.
- EU. (2011). *Standardi EN 14961-2*. Brysseli: European Union.
- EU. (2014). *Standardi EN ISO 17225-2*. Brysseli: European Union.
- European Commission. (2013). *Draft 1 - Best Available Techniques Reference Document for Large Combustion Plants*. European IPCC Bureau.
- European Environmental Bureau. (2015). *Study: Reasons to change the zero-rated criteria for biomass in EU ETS*. EU.
- European Pellet Council. (2013). *First International Workshop on Pellet Safety: Results and Main Lines of Action*. Fügen: European Pellet Council.
- European Standard. (2010). *EN ISO 10156*. Brysseli: EU.

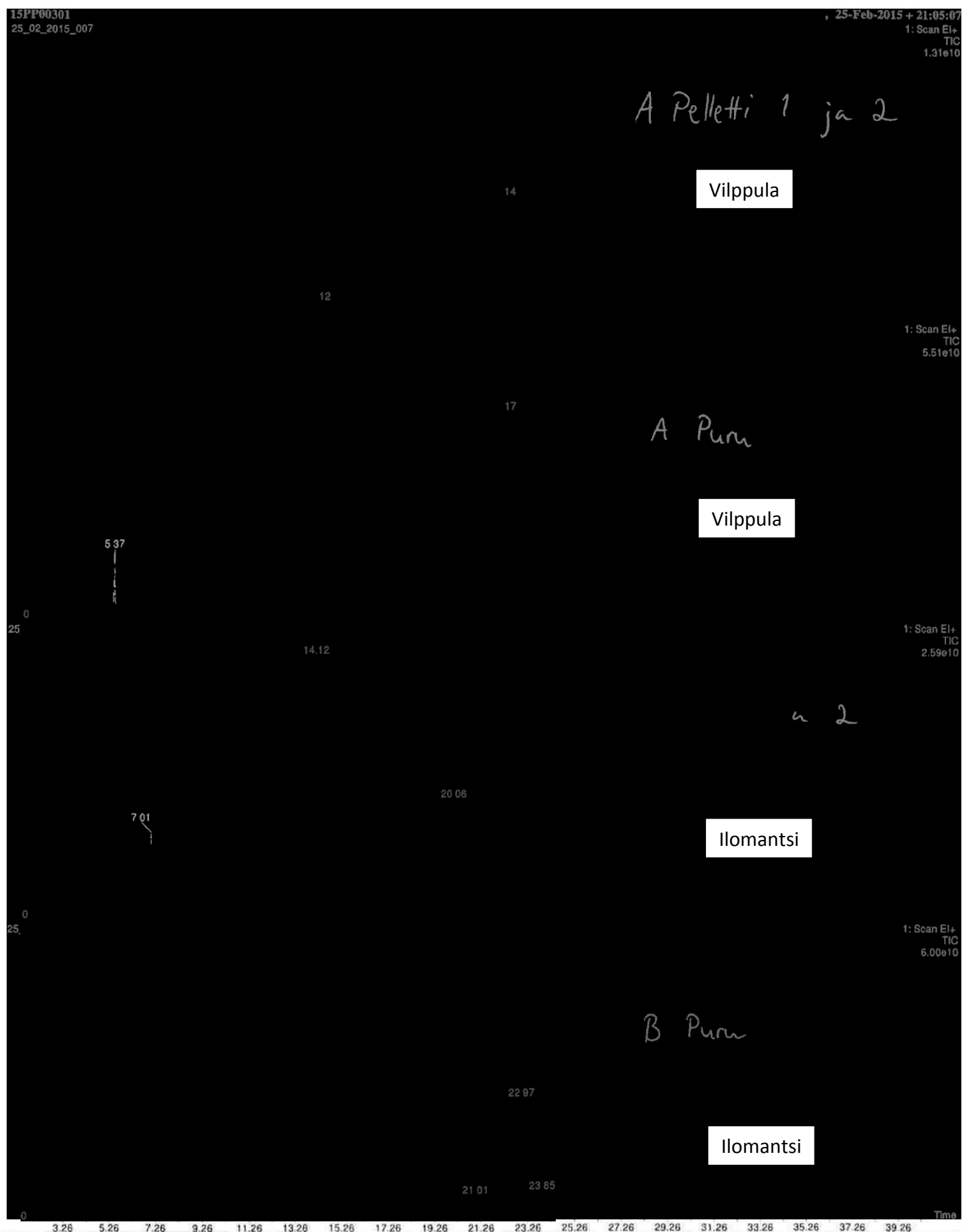
- Fauske & Associates LLC. (12. Heinäkuu 2013). *Kst and Pmax Tests For Combustible Dust: Who or What Are They?* Noudettu osoitteesta <http://blog.fauske.com/blog/bid/316347/Kst-and-Pmax-Tests-For-Combustible-Dust-Who-or-What-Are-They>
- Fierro, V.;Miranda, J.;Romero, C.;Andres, J.;Arriaga, A.;Schmal, D.;& Visser, G. (1999). Prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles - Experimentla results in coal storage yard. *Fuel Processing Technology*(59), 23-34.
- Gaia Consulting. (2012). *SISÄINEN RAPORTTI: Selvitys biohiilen ja puuraaka-aineen ominaisuuksista terveys-, turvallisuus- ja ympäristönäkökulmat (HSE) huomioiden*. Helsinki: Helen.
- Granström, K. (2014). Sawdust age affect aldehyde emission in wood pellets. *Fuel*, 219-223.
- Grönroos, S. (2013). *Puupelletin seospoltto hiilipölyä polttavassa voimalaitoksessa*. Helsinki: Aalto Yliopisto.
- Guo, W. (2013). *Self-Heating and Spontaneous Combustion of Wood Pellets during Storage*. Vancouver: The University of British Columbia.
- Hagström, K.;Axelsson, S.;Arvidsson, H.;Bryngelsson, I.-L.;Lundholm, C.;& Eriksson, K. (2008). Exposure to Wood Dst, Resin Acids, and Volatile Organic Compounds During Producton of Wood Pellets. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*(5), 296-304.
- Haloulakou, A.;Fili, N.;& Spyrellis, N. (1999). *Occupational exposure to CO concentrations in enclosed garages. Estimation of blood COHb levels*. Athens: National Technological University of Athens, Chemical Engineering Department.
- Hedlund, F.;Astad, J.;& Nichols, J. (2014). *Inherent hazards, poor reporting and limited learning in the solid biomass energy sector: a case study of a wheel loader igniting wood dust, leading to fatal explosion at wood pellet manufacturer*. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark.
- Helen. (10. Marraskuu 2014). *Hiilineutraali tulevaisuus*. Noudettu osoitteesta Helsingin Energian kotisivu: <https://www.helen.fi/Kotitalouksille/Neuvoa-jatietoa/Energia-ja-ymparisto/Hiilineutraali-tulevaisuus/>
- Helen. (11. 11 2014). *Nollatapurmaa foorumi*. Noudettu osoitteesta http://intra/turvallisuus/tyoturvallisuus/turvallinen_toiminta/nollatapurmaa/Sivut/Default.aspx
- Husgafvel-Pursiainen, K.;Liukkonen, T.;& Welling, I. (2014). *Altistuminen puupölylle työssä: terveysriskit ja hallinta*. Helsinki: Työterveyslaitos.
- IARC. (1995). *IARC Monographs on the Evaluation of carcinogenic risks to humans*. Lyon: IARC.
- IARC. (2014). *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Report of the advisory group to recommend priorities for IARC Monographs during 2015-2019*. Lyon: World Health Organization.
- Itälinna, S. (2013). *Kirjallisuuskatsaus: Häkämyrkytys*. Tampere: Tampereen yliopisto - Lääketieteen yksikkö.
- Jacquet, N.;Maniet, G.;Vanderghem, C.;Delvigne, F.;& Richel, A. (2015). Application of Steam Explosion as Pretreatment on Lignocellulosic Material: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2593 - 2598.
- Kaelin, D. (2012). *Fire and Explosion Hazards in the Handling of Combustible Wood Dusts*. Princeton, NJ: Dekra.
- Kilpiö, M. (15. Tammikuu 2015). Sähköpostikeskustelu: Vilppulan pellettinäytteet.

- Knuuttila, K. (2003). *Puuenergia*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- Kontro, R. (2015). *Salmisaaren tilanne maanantaina 2.2.2014 klo 12.30*. Helsinki: Helen.
- Kopcynski, M.; Glod, K.; & Zuwala, J. (2011). Analysis of potential fire hazards during co-milling of biomass and bituminous coal for the process of their co-combustion. *CHEMIK*, 580-589.
- Koppejan, J.; & Van Loo, S. (2008). *The handbook of Biomass Combustion & Co-Firing* (Ensimmäinen painos p.). Lontoo: earthscan.
- Koppejan, J.; Lönnermark, A.; Persson, H.; Larsson, I.; Blomqvist, P.; Arshadi, M.; . . . Nikolaisen, L. (2013). *Health and safety aspects of solid biomass storage, transportation and feeding*. IEA Bioenergy.
- Kuang, X.; Shankar, T. J.; Bi, X. T.; Sokhansanj, S.; Lim, C. J.; & Melin, S. (2008). Characterization and Kinetics Study of Off-Gas Emissions from Stored Wood Pellets. *The Annals of Occupational Hygiene*(52:8), 675-683.
- Kuang, X.; Shankar, T. J.; Xiaotao, T.; Lim, C.; Sokhansanj, S.; & Melin, S. (July 2009). Rate and Peak Concentrations of Off-Gas Emissions in Stored Wood Pellets - Sensitivities to Temperature, Relative Humidity, and Headspace Volume. *The Annals of Occupational hygiene*(53:8), 789-796.
- Kuopion yliopisto, ympäristötieteen laitos. (2000). *Puupölyjen ärsyttävyyys ja haitalliseksi tunnetut pitoisuudet*. Kuopio: Työsuojelurahasto. Noudettu osoitteesta <http://www.tsr.fi/tutkimustietoa/tata-ontutkittu/hanke/?h=98042&n=tiedote>
- Lam, P. S. (2011). *Steam explosion of biomass to produce durable wood pellets*. Vancouver: The University of British Columbia.
- Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass & Energy*(20), 351-360.
- Lestander, T. A. (2008). Water absorption thermodynamics in single wood pellets modelled by multivariate near-infrared spectroscopy. *Holzforschung*(62), 429-434.
- Madsen, A.; Mårtensson, L.; Schneider, T.; & Larsson, L. (2004). Microbial Dustiness and Particle Release of Different Biofuels. *The Annals Occupational Hygiene*(4), 327-338.
- Marine Accident Investigation Section. (2006). *Report of Investigation into the fatal accident on board the Hong Kong Registered ship "Saga Spray" on 16 November 2006*. Hong Kong: The Hong Kong Special Administrative Region - Marine Department.
- Melin, S. (2008). *Testing of Explosibility and Flammability of Airborne Dust from Wood Pellets*. Wood Pellet Association of Canada.
- Mustajoki, P. (2014). Häkämyrkytys. Teoksessa *Lääkärikirja Duodecim*. Duodecim. Noudettu osoitteesta http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00759
- Nordic Innovation Centre. (2008). *Guidelines for storing and handling of solid biofuels*. Oslo: Nordic Innovation Centre.
- Norman, F.; Berghamns, J.; & Verplaetsen, F. (2013). The Minimum Ignition Energy of Coal Dust in an Oxygen Enriched Atmosphere. *Chemical Engineering Transactions*, 739-744.
- Occupational Safety and Health Administration. (2009). *Hazard Communication Guidance on Combustible Dusts*. U.S. Department of Labor.

- Persson, H. (2013). *Silo Fires - Fire extinguishing and preventive and preparatory measures*. Swedish Civil Contingencies Agency.
- Pohjolan Voima. (27. Toukokuu 2015). *Vaskiluodon biokaasulaitos*. Noudettu osoitteesta Pohjolan Voima: <http://www.pohjolanvoima.fi/hankkeet/vaskiluodon-biokaasulaitos>
- Prior, B. (2012). *Tilbury wood pellet fire - solutions and lessons*. Haettu 27. Tammikuu 2015 osoitteesta <http://www.forever-fuels.com/content/tilbury-wood-pellet-fire-solutions-and-lessons>
- Raiko, R.;Saastamoinen, J.;Hupa, M.;& Kurki-Suonio, I. (2002). *Poltto ja palaminen*. Jyväskylä: Internation Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto.
- RWE. (2012). *Tilbury Power Station - Information on fire incident*. Tilbury: RWE npower.
- SFS. (2011). *ATEX - Räjähdyksvaarallisten tilojen, laitteiden, asennusten ja tilaluokituksen standardit*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- Siew, S.;Kauppinen, T.;Kyyrönen, P.;Heikkilä, P.;& Pukkala, E. (2012). Occupational exposure to wood dust and formaldehyde and risk of nasal, nasopharyngeal, and lung cancer among Finnish men. *Cancer Management and Research*(4), 223-232.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. (2003). *Valtioneuvoston asetus räjähdyskelpoisten ilmaseosten työntekijöille aiheuttaman vaaran torjunnasta*. Helsinki: L 390/2005 138 §.
- Sosiaali- ja terveysministeriö. (2014). *HTP-arvot 2014*. Helsinki: STM.
- Stelte, W. (2013). *Steam explosion for biomass pre-treatment*. Taastrup: Danish Technological Institute.
- Ståhl, M. (2008). *Improving Wood Fuel Pellets for Household Use*. Karlstad: Karlstad University Studies.
- Suomen Syöpärekisteri. (2014). *Vuosittaiset keskimääräiset syöpätapauksien määrät vuosina 1966-2012 primaaripaikoittain ja kalenterijaksoittain*. Helsinki: Suomen Syöpärekisteri.
- Svedberg, U. R.;Högberg, H.-E.;Högberg, J.;& Galle, B. (2004). Emission of Hexanal and Carbon Monoxide from Storage of Wood Pellets, a Potential Occupational and Domestic Health Hazard. *The Annals of Occupational Hygiene*(4), 339-349.
- Svedberg, U.;Samuelsson, J.;& Melin, S. (2008). Hazardous Off-Gassing of Carbon Monoxide and Oxygen Depletion during Ocean Transportation of Wood Pellets. *The Annals of Occupational Hygiene*, 259-266.
- Tang, X.;Bai, Y.;Duong, A.;Smith, M. T.;Li, L.;& Zhang, L. (2009). Formaldehyde in China: Production, consumption, exposure levels and health effects. *Environmental International*(35), 1210-1224.
- Thauer, R. (1998). Biochemistry of methanogenesis: a tribute to Marjory Stephenson. *Microbiology*, 2377-2406.
- Thek, G.;& Obernberger, I. (2012). *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*. Routledge.
- Tumuluru, J.;Sokhansanj, S.;Hess, J.;Wright, C.;& Boardman, R. (2011). A review on biomass torrefaction process and production properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 384-401.
- Työsuojelu. (2009). *HTP-arvojen perustelumuuistoita*. Noudettu osoitteesta <http://www.tyosuojelu.fi/upload/perustelumuuistiot.pdf>

- Työterveyslaitos. (2008). *Pellettivarastojen ilman epäpuhtaudet ja niiden aiheuttamien vaarojen ehkäiseminen*. Tampere: Työterveyslaitos.
- Työterveyslaitos. (2014a). *Puu ja Terveys-tietokanta: Kuusi*. Helsinki: Työterveyslaitos.
- Työterveyslaitos. (2014b). *Puu ja Terveys-tietokanta: Mänty*. Helsinki: Työterveyslaitos.
- Työterveyslaitos. (2015). *SISÄINEN RAPORTTI: Työhygieninen selvitys pellettien purkamisen aikana*. Helsinki: Työterveyslaitos.
- Wang, X.;Tan, H.;Niu, Y.;Pourkashanian, M.;Ma, L.;Chen, E.; . . Xu, T. (2011). Experimental investigation on biomass co-firing in a 300 MW pulverized coal-fired utility furnace in China. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2725-2733.
- Vapo Oy. (2013). *Käyttöturvallisuustiedote: Vapon puupelletti*. Vapo.
- Watts, G.;Cope, J.;& Hulme, M. (1998). Ansonoff's Matrix, pain and gain. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 101-111.
- Vežnikova, H.;Perdochova, M.;Bernatik, A.;& Binkau, B. (2014). Safe storage of selected fuels with regard to their tendency to spontaneous combustion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*(29), 295-299.
- WHO. (2000). *Carbon Monoxide*. Noudettu osoitteesta http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/123059/AQG2ndEd_5_5carbonmonoxide.PDF
- Virtanen, A. (19. Tammikuu 2015). Sähköpostikeskustelu: Ilomantsin pellettinäytteet.
- Wong, D.;Huntley, S.;Lehmann, B.;& Zeeuwen, P. (2013). *Sawmill wood dust - sampling, analysis and explosibility*. FPInnovations.
- VTT. (2014). *Riskianalyysit*. Haettu 12. 15 2014 osoitteesta http://www.vtt.fi/proj/riskianalyysit/riskianalyysit_rajahdykset.jsp
- VTT Automaatio. (2004). *Pölyntorjunta*. Tampere: VTT Automaatio, Tampereen aluetyöterveyslaitos, Lappeenrannan aluetyöterveyslaitos.
- Yazdanpanah, F. (2013). *Evolution and stratification of off-gasses in stored wood pellets*. Vancouver: The University of British Columbia.
- Yazdanpanah, F.;Sokhansanj, S.;Lim, J.;Lau, A.;Bi, X.;Lam, P. Y.;& Melin, S. (2014). Potential for Flammability of gases emitted from stored wood pellets. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*(92), 603-609.
- Yazdanpanah, F.;Sokhansanj, S.;Rezaei, H.;Lim, C.;Lau, A.;Bi, X.;. . Kim, C. (2014). *Measurement of Off-Gases in Wood Pellet Storage*. Kanada: InTech.

Liite 1 – Pelleteistä haihtuvien yhdisteiden kromatografiset tulokset



Liite 2 – Hiilimonoksidipitoisuus pellettikuormaa purettaessa

