

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**MERIDIESELMOOTTORIN PAKOKAASUVIRRASTA
EROTETTUJEN PARTIKKELIEN KÄSITTELY JA
HYÖTYKÄYTTÖ**

**Handling and utilization of particulate matter separated from
exhaust gas flow of marine diesel engine**

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka
Työn ohjaaja: Laboratorioinsinööri, TkL, Simo Hammo
Työn ohjaaja: DI, Juha Kortterlainen

Lappeenrannassa 22.5.2020

Vertti Vesanto

TIIVISTELMÄ

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Environmental Technology

Vertti Vesanto

Meridieselmoottorin pakokaasuvirrasta erotettujen partikkelien käsittely ja hyötykäyttö

Kandidaatintyö

2020

34 sivua, 7 kuvaa, 1 taulukko, 2 kuvaajaa ja 4 liitettä

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka Työn ohjaajat: Laboratorioinsinööri, TkL, Simo Hammo; DI, Juha Kortelainen

Hakusanat: kandidaatintyö, hiukkaspäästöt, hyötykäyttö

Kandidaatintyössä selvitetään meridieselmoottorin synnyttämien hiukkaspäästöjen hyötykäyttömahdollisuuksia. Aineistona on käytetty kirjallisuuskatsausta sekä Wärtsilältä saatuja hiukkasmassa näytteitä. Työn tavoitteena on selvittää hiukkasmassan potentiaalisia hyötykäyttökohteita ja miten sitä tulee käsitellä. Arvioidaan eri polttoaineiden vaikutusta hiukkasmassan koostumukseen sekä itse hiukkasmassan rakennetta. Suurin vaikutus hiukkasmassan määrään on polttoaineen epäpuhtaudet ja käytetty moottorikuorma. Työssä selvitetään laivaliikenteen tuottaman hiukkaspäästön määrää eri erotusasteilla laivakohtaisesti case-tarkastelulla, missä seurataan yhden laivan reittiä Kemenistä Singaporeen ja lasketaan matkan tuottamat hiukkaspäästöt. Työssä ei keskitytä hiukkasmassan erotukseen pakokaasuvirrasta, vaan valmiiksi erotettuun hiukkasmassaan. Hyötykäyttöosiossa oletettu hiukkasmassa on suurimmaksi osaksi nokea. Potentiaalisin hyötykäyttö noelle on sähkölaitteissa sen keskiosan sipulimaisen rakenteen vuoksi. Se olisi halpa vaihtoehto yleisimmin käytetylle grafeenille. Noesta voidaan myös valmistaa vesiliukoista grafeenilevyä, millä poistetaan väriaineita jätevedestä. Muita esiin tuotuja hyötykäyttömahdollisuuksia on hiukkasmassan hyödyntäminen musteena tai polttoaineena.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Environmental Technology

Vertti Vesanto

Handling and utilization of particulate matter separated from exhaust gas flow of marine diesel engine

Bachelor's thesis

2020

34 pages, 7 charts, 1 table, 2 figures and 4 appendices

Examiner: Professor, D.Sc. Risto Soukka

Instructors: Laboratory Dr. TkL, Simo Hammo; DI, Juha Kortelainen

Keywords: bachelor's thesis, particulate matter emission, utilization

Bachelor's thesis investigates the possibilities of utilizing the particle emissions generated by the marine diesel engine. The material used is a literature review and particle mass samples from Wärtsilä. The aim of this work is to find out the potential applications of particulate mass and how to handle it. The effect of different fuels on the composition of the particulate mass and the structure of the particulate mass itself is evaluated. The biggest influence on the amount of particulate mass is fuel impurities and the used engine load. The work investigates the amount of particulate matter emitted by ship traffic at different separation degrees with case-review, which monitors the route of one ship from Kemen to Singapore and calculates the particle emissions generated during the voyage. The work does not focus on the separation of the particulate mass from the exhaust stream. The emphasis of the work is on pre-separated particulate mass. In the recovery section, the assumed particle mass is for the most part carbon black. The most potential utilization of carbon black is in electrical equipment due to the bulbous structure of its central part. It would be a cheap alternative to the most commonly used graphene. Soot can also be made into a water-soluble graphene sheet which can be used to remove dyes from the wastewater. Other utilization possibilities are using it as an ink or replacing coal in heat production.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	5
1 JOHDANTO	6
2 POLTOSSA SYNTYVÄT HIUKKASPÄÄSTÖT	8
2.1 Käytetyt polttoaineet	8
2.2 Polttoaineen ja moottorin käytön vaikutus hiukkaspäästöihin	11
3 CASE: RAHTIALUKSEN TUOTTAMA HIUKKASPÄÄTÖJEN MÄÄRÄ	15
3.1 Casen lähtötilanne	15
3.2 Tulokset	16
4 HIUKKASSMASSAN KÄSITTELY JA HYÖTYKÄYTTÖ	19
4.1 Hiukkasmassan hyödyntäminen litium-ioni-akuissa	19
4.2 Hiukkasmassan hyödyntäminen superkondensaattoreissa	21
4.3 Hiukkasmassan hyödyntäminen väriaineena	22
4.4 Hiukkasten hyödyntäminen polttoaineena	23
4.5 Hiukkasten hyödyntäminen orgaanisten väriaineiden poistamiseksi jätevedestä ..	25
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	27
6 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	31

LIITTEET

Liite 1. Pakokaasuvirran koostumus eri polttoaineilla ja moottorikuormilla

Liite 2. Case – vertailun laskenta

Liite 3. Mittauspöytäkirja: Polttoaineen kalorimetrisen lämpöarvon määrittäminen näytteelle LFO

Liite 4. Mittauspöytäkirja: Polttoaineen kalorimetrisen lämpöarvon määrittäminen näytteelle HFO

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

AOP	Advanced oxidation process, edistynyt hapetusprosessi
BET	Bruneaur-Emmet-Teller koe
HCO	Heavy cycle oil, raskas kaasuöljy
HFO	Heavy fuel oil, Raskas polttoöljy
HSDF	High sulfur diesel fuel, paljon rikkiä sisältävä diesel
IFO	Intermediate fuel oil, keskiraskas polttoöljy
IMO	International Marine Organization
LIB	Lithium Ion Battery, Litium akku
LSDF	Low sulfur diesel fuel, vähärikkinen diesel
MDO	Marine diesel oil, Meridiesel
PO	Palm Oil, Palmuöljy

Yksiköt

cSt	Viskositeetin yksikkö [mm ² /s]
kWh	Kilowattitunti

Alkuaineet ja yhdisteet

H ₂ O ₂	Vetyperoksidi
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
KMnO ₄	Kaliumpermanganaatti
MnO ₂	Mangaanioksidi
NiO	Nikkelioksidia

1 JOHDANTO

Väestön globaali kasvu on lisännyt raaka-aineiden ja tuotteiden kysyntää. Laivaliikenteen rooli maailman rahtiliikenteessä on merkittävä, ja se on jatkuvassa kasvussa. Rahdin määrän vuotuisen kasvun arvioidaan olevan keskimäärin 3,8 % vuosina 2018–2023. Vuonna 2017 meriteitse kulkevan rahdin määrä oli noin 10 700 miljoonaa tonnia. Varsinkin kehittyvissä maissa meriteitse kulkevan rahdin määrät ovat olleet suuressa kasvussa. Aasian vienti vuonna 2017 on kasvanut 6,7 % ja tuonti samana vuonna 9,6 %. (Unctad 2018, 4–6, 15.)

Laivaliikennettä on paljon ja se kuluttaa suuria määriä polttoainetta. Yleisimmin käytetty polttoaine on raskasta polttoöljyä (engl. heavy fuel oil, HFO.), jonka osuus vuonna 2011 polttoaineesta oli 77%. HFO:n rinnalla käytetään meridieseliä (engl. marine diesel oil, MDO) sekä kaasuöljyä (engl. marine gas oil, MGO), joista MDO:n osuus oli noin 20 % ja MGO:n noin 3 %. (Zhou et. al 2019, 78.) Laivaliikenteessä käytetään suurimmalta osalta heikkolaatuisia eli paljon rikkiä sisältäviä polttoaineita. Näitä muodostuu öljynjalostusprosessissa, eikä niille tällä hetkellä voimalaitosten lisäksi ole muita käyttökohteita kuin laivaliikenne. Vähäisien käyttökohteiden takia heikkolaatuisten polttoaineiden hinta pysyy edullisena. Vuonna 2012 heikkolaatuisesta polttoaineesta 49,5 % käytettiin laivaliikenteessä. (Concawe 2017, 2.)

Laivaliikenne tuottaa suuren määrän hiukkaspäästöjä. IMO on arvioinut vuonna 2014 laivaliikenteestä syntyneen noin 1,4 miljoonaa tonnia hiukkaspäästöjä. Toisen lähteen mukaan vuotuisesti hiukkaspäästöjä syntyy noin 0,9 -1,7 miljoonaa tonnia (Moldanová et al. 2009, 2632.). Vuonna 2013 Euroopan Unioni EU:n alueen laivaliikenteen arvioitiin tuottavan yli 20 % Euroopan hiukkaspäästöistä. Kansainvälinen merenkulkujärjestö (engl. International Maritime Organization, IMO 2019.) vuonna 2020 alussa voimaan astuvan säädöksen myötä meriliikenteessä käytettävä polttoaine saa sisältää korkeintaan 0,5 % rikkiä, aikaisemman 3,5 % sijaan (IMO 2019, 2.). Tämän takia päästöihin täytyy kiinnittää enemmän huomiota. Laivaliikenteessä tulee miettiä vähärikkisempiä polttoaineita, moottoreiden uusimisen vaikutuksia sekä pesureiden asentamisia puhdistamaan pakokaasua. Uusista säädöksistä huolimatta DNV GL:n mukaan vuonna 2050 on arvioitu HFO:n määrän olevan edelleen noin 10% käytetystä polttoaineesta laivaliikenteessä (DNV GL. 2019, 93.). Laivoista aiheutuvien hiukkaspäästöjen on havaittu aiheuttavan ihmisillä astmaa, sydän- ja verisuonisairauksia sekä hengitystiesairauksia (Moldovà et al. 2013, 3578.)

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan laivaliikenteen aiheuttamien hiukkaspäästöjen käsittelyä sekä hyötykäyttömahdollisuuksia. Tavoitteena on tunnistaa pakokaasuvirran hiukkaspäästöjen rakennetta sekä määriä. Tarkastellaan pakokaasuvirran primäärihiukkasia, sekä millä tavoin niitä tulisi käsitellä. Tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuuskatsausta sekä case-tarkastelua. Case-tarkastelussa selvitetään yksittäisen rahtialuksen tuottamat hiukkaspäästöt, laivan liikennöidessä Kemenistä Singaporeen. Tutkimuskysymyksenä on, minkälaisia hyötykäyttömahdollisuuksia pakokaasuvirrasta erotetuilla hiukkasilla on. Työssä keskitytään jo erotetun hiukkasmassan hyötykäyttöön, eli hiukkasten erotus rajataan pois. Kirjallisuuskatsauksella tunnistetaan hiukkasmassan ominaisuuksia sekä selvitetään hyötykäyttömahdollisuuksia. Kandidaatintyössä on tehty yhteistyötä Wärtsilän kanssa. Wärtsilältä on saatu hiukkasmassanäytteitä, joita analysoidaan laboratoriossa.

2 POLTOSSA SYNTYVÄT HIUKKASPÄÄSTÖT

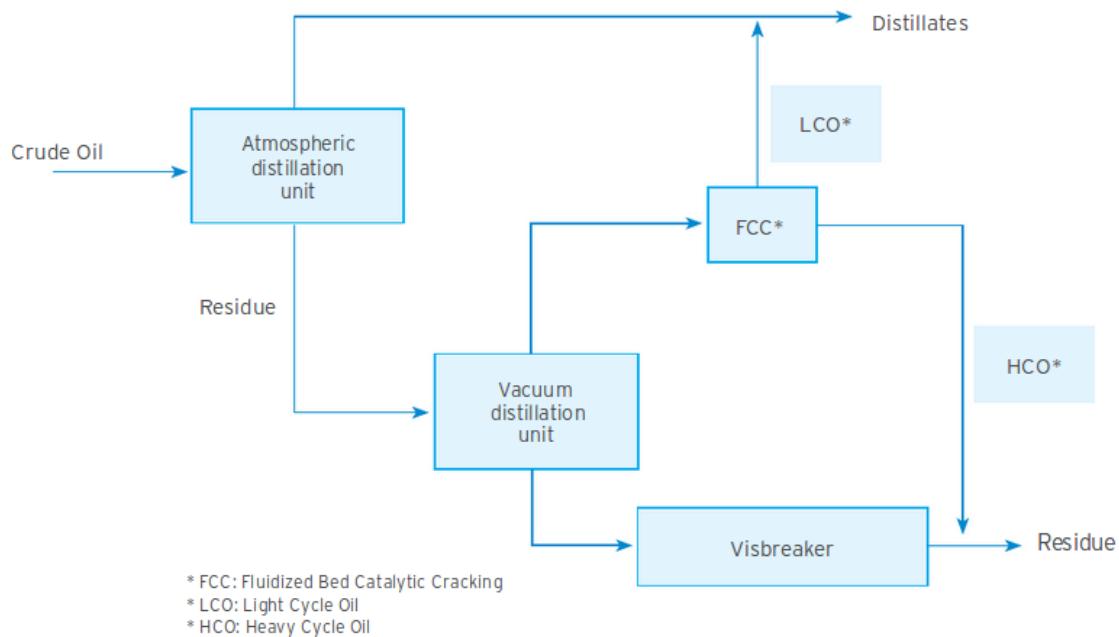
Suurissa laivoissa käytetään yleensä useampaa, kuin yhtä moottoria. Nopeat nelitahtimoottorit toimivat yleensä alusten päämoottoreina, apumoottoreina sekä tuomaan virtaa generaattoreille. Hitaat kaksitahtimoottorit toimivat suurten rahtialusten päämoottoreina. (Mollenhauer K, et. al. 2010, 576.) Wärtsilä (2019.) on jakanut moottorityypit seuraavalla tavalla:

Nopeat dieselmootorit	maksimikierronnopeus yli 1200 rpm
Keskinopeat dieselmootorit	maksimikierronnopeus 400–1200 rpm
Hitaat dieselmootorit	maksimikierronnopeus 400 rpm

Laivojen Hiukkaspäästöihin vaikuttavat polttoaineen lisäksi moottorin tyyppi, kunto, toimintatapa sekä käytetty voiteluaine (Moldovà et al. 2013, 3578.).

2.1 Käytetyt polttoaineet

Yleisimmin käytetyt polttoaineet syntyvät raakaöljyn jalostuksesta. Prosessi alkaa raakaöljyn tislauksella ilmakehän paineessa. Kolumnin pohjalle muodostuva pohjaöljystä poistetaan tislauksella jakeet, minkä jälkeen se tislataan uudelleen tyhjiökolumnissa. Tästä tislauksesta syntyvät jakeet siirretään katalyyttiseen krakkausyksikköön, missä öljyn hiilivetyketjut pilkkoutuvat. Tämän ansiosta saadaan lisättyä arvokkaampien jakeiden osuutta. Krakkauksen jälkeen liuoksesta saadaan tislattua kevyemmät jakeet. Näitä jakeita kutsutaan kevyeksi kaasuöljyksi (engl. Light Cycle Oil, LCO) sekä raskaaksi kaasuöljyksi (engl. Heavy Cycle Oil, HCO). Katalyytin kulumisen tislauksen aikana aiheuttaa sen, että HCO:ssa on hieman piitä ja alumiinia. HCO:n viskositeetti on tyypillisesti 130mm²/s, mikä on monin kerroin suurempi kuin LCO:n tyypillinen 2,5 mm²/s. HCO ja lämpökrakkausyksikön läpi kulkenut pohjaöljy sekoitetaan jäännösöljyksi. Tästä jäännösöljystä ja tisleestä syntyy raskasta polttoöljyä HFO:ta. Keskiraskasta polttoöljyä (engl. Intermediate Fuel Oil, IFO) saadaan tuotettua tislauksen ensimmäisen vaiheen jäännösöljystä sekä LCO:n ja HCO:n seoksesta. Tisleestä erotettujen jakeiden seoksista syntyy kevyitä polttoöljyjä MDO:ta ja MGO:ta. (Vermeire. 2012, 3-5.) Kuvassa 1 on esitetty raakaöljyn jalostusprosessin vaiheet.

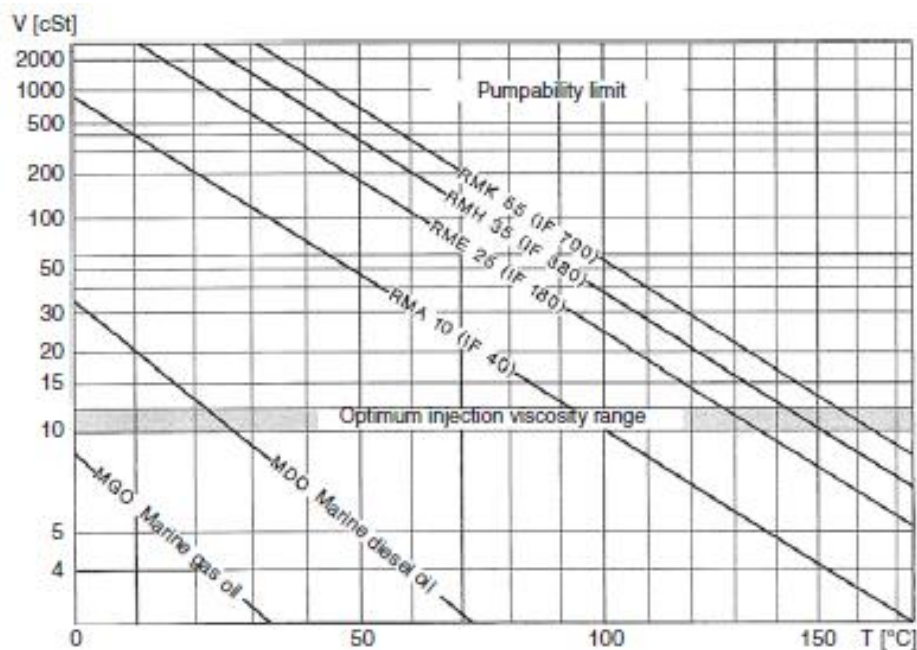


Kuva 1. Raakaöljyn leijukatalyyttinen krakkaus ja lämpökrakkaus.

Laivaliikenteessä käytetään eniten heikkolaatuisia polttoaineita. Heikkolaatuiset polttoaineet ovat raskasjakeisia ja sisältävät paljon rikkiä. Näihin kuuluva HFO sisältää noin 0,5 – 3,5 % rikkiä (Fritt-Rasmussen et al. 2018, 18.). Koska HFO valmistetaan raskasjakeisesta pohjaöljystä, sisältää se paljon epäpuhtauksia, kuten vettä, raskaita aromaattisia hiilivetyjä, metalleja sekä tuhkaa. (Aakko-Saksa et al. 2017, 10.). HFO valmistetaan pääosin jäännösöljyistä, joiden pääkomponentteina on hiilivetyyhdisteitä. HFO:n viskositeetti on 100°C lämpötilassa välillä 4,5-55mm²/s (cSt). Useimmiten kevyitä polttoöljyjä sekoitetaan HFO:n sekaan laadun parantamiseksi, sekä alemman viskositeetin saavuttamiseksi. Korkean viskositeetin lisäksi HFO:n tiheys, rikkipitoisuus, sekä tuhkan määrä on korkeampi verrattuna kevyisiin polttoöljyihin. Suuri aromaattisten hiilivetyjen sekä asfalteenin konsentraatio heikentää HFO:n syttymis- sekä palamisominaisuuksia. Myös epäpuhtaudet ja suuri määrä vettä huonontavat sen ominaisuuksia. (Mollenhauer K, et. al. 2010, 103-104.)

Raskas polttoöljy tulee prosessoida, jotta sitä voidaan käyttää dieselmoottoreissa. HFO:sta tulee poistaa vesi sekä kiinteät epäpuhtaudet kuten asfalteenit, jalostamon katalyyttijäännökset ja koksi. Mikäli edellä mainittuja aineita ei poisteta, altistuvat moottori ja sen osat korroosiolle ja kulumisvaurioille. Polttoaineen puhdistamisen lisäksi sen viskositeetti tulee saada dieselmoottorin

vaatimalle tasolle. Tämä tapahtuu polttoaineen esilämmittimen avulla, missä polttoaine lämmitetään 90-160°C lämpötilaan, riippuen sen viskositeetista. Optimaalinen viskositeetti dieselmoottorin ruiskutuksessa on alle 12 mm²/s. (Mollenhauer K et. al, 2010, 104-106.). Kuvassa 2 on esitetty esilämmityksen tarve eri polttoaineilla. Kuvasta huomataan, että mitä suurempi polttoaineen viskositeetti on, sitä enemmän sitä tarvitsee esilämmittää.



Kuva 2. Eri polttoaineiden esilämmityksen tarve ennen ruiskutusta. (Mollenhauer et al. 2010, 106)

Raskaan polttoöljyn vaatiman korkean lämpötilan takia, mikä voi olla jopa 160°C, on huomioitava useita seikkoja moottorin rakenteessa. Tiivistysosien on oltava sopivia, sekä männän ja sylinterien tulee toimia korkeammasta lämpötilasta huolimatta. Moottorin tulee kuitenkin tarvittaessa toimia vaihtoehtoisillakin polttoaineilla, joiden ruiskutuslämpötila on matalampi. Lisäksi ruiskutusjärjestelmässä on käytettävä lämpökäsiteltyjä materiaaleja, jotta osien lämpölaajeneminen ei haittaa prosessia. (Mollenhauer K et. al, 2010, 108.)

Hyvälaatuiset polttoaineet sisältävät vähemmän rikkiä ja epäpuhtauksia kuin heikkolaatuiset polttoaineet. Näitä polttoaineita ovat MGO ja MDO. MGO sisältää rikkiä noin 0,10–1,50 %, kun taas

MDO hieman enemmän 0,3-2,0 %. Ominaisuuksiltaan hyvälaatuiset polttoaineet ovat muutenkin otollisempia laivojen dieselmootoreille. Niiden viskositeetti ja tiheys on heikkolaatuisia matalampi, minkä takia niitä ei tarvitse esilämmittää yhtä paljon ennen ruiskutusta. (Vermeire, 2012, 5-6.)

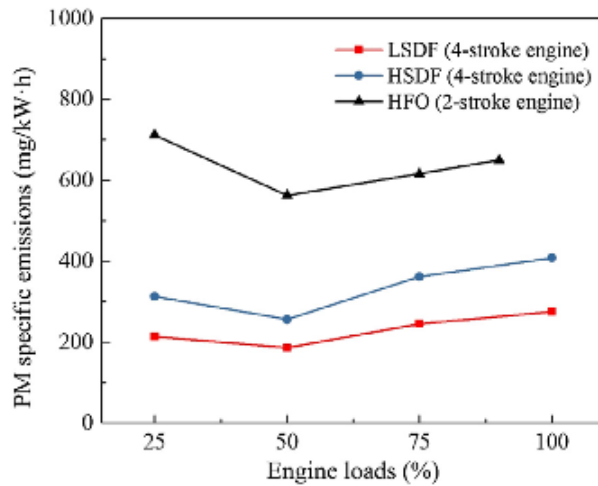
2.2 Polttoaineen ja moottorin käytön vaikutus hiukkaspäästöihin

Laivojen hiukkaspäästöt sisältävät suurimmaksi osaksi alkuainehiiltä (engl. elemental carbon, EC) sekä orgaanista hiiltä (engl. organic carbon OC). Lisäksi se sisältää rikkiä, mihin on sitoutunut vettä sekä metalleja. Polttoaine vaikuttaa hiukkaspäästöjen määrään ja luonteeseen. Raskasjakeisilla polttoaineilla syntyy suurempi määrä hiukkaspäästöjä, verrattuna kevyisiin. Rikki vaikuttaa suuresti hiukkaspäästöjen luonteeseen. Mitä enemmän rikkiä polttoaine sisältää, sitä enemmän sen pakokaasuvirrassa esiintyy sulfaatteja. Raskasjakeiset polttoaineet sisältävät katalyyttisesti aktiivisia epäpuhtauksia, minkä takia sen hiukkaspäästöt ovat kevyitä reaktiivisempia. HFO:n epäpuhtauksien takia pakokaasuvirrassa on enemmän metalleja kuten rautaa. (Moldova et al. 2013, 3593) VTT:n tutkimuksessa esiintyi monia eri metalleja, joista suurin osuus oli kuitenkin vanadiinia, alumiinia, kalsiumia, natriumia ja rautaa (Aakko-Saksa et al. 2017, 58.). Hiukkaspäästöissä esiintyy myös jonkin verran aromaattisia hiilivetyjä, mitkä lisäävät hiukkasmassan toksisuutta. Aromaattisten hiilivetyjen määrä polttoaineessa vaikuttaa suoraan tähän. (Zhang et al. 2019, 307.). Hyötykäytön tutkimisessa oletetaan kuitenkin hiukkasmassan olevan ei-toksista.

Hiukkasten määrään vaikuttaa myös palamislämpötila sekä happipitoisuus. Mitä korkeampi happipitoisuus, sitä vähemmän palaminen tuottaa hiukkasia. Kun moottorikuormaa suurennetaan ruiskuttamalla enemmän polttoainetta sylinteriin, kasvaa myös palamislämpötila. Palamislämpötilan kasvu aiheuttaa enemmän hiukkaspäästöjä. Pienillä moottorikuormilla sylinterissä on alhainen palamislämpötila, mikä saattaa laskea polttoainetehokkuutta ja johtaa korkeampiin hiukkasmääriin. (Rajak et al. 2019, 17-18.)

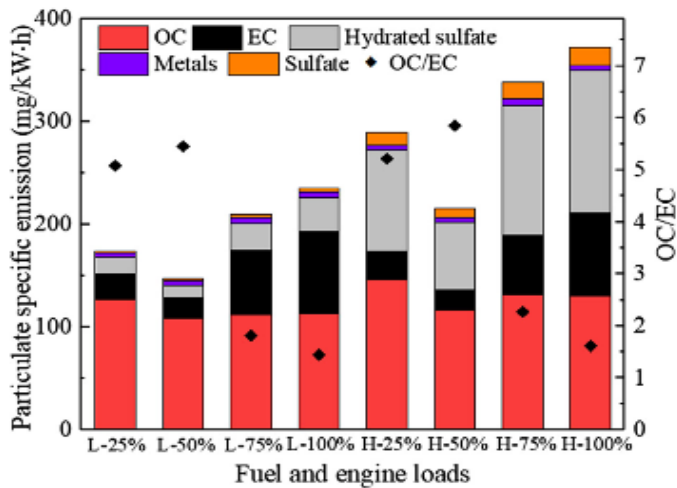
Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa testattiin eri polttoaineiden ja moottoreiden vaikutusta hiukkaspäästöihin. Kokeessa käytettiin kahta moottoria. Toinen tehtiin keskinopealla 4-tahtisella dieselmootorilla, missä käytettiin vähärikkistä dieseliä (engl. Low-sulfur diesel fuel, LSDF), minkä rikkipitoisuus oli 0,1 % sekä paljon rikkiä sisältävää dieseliä (engl. High-sulfur diesel fuel, HSDF), minkä rikkipitoisuus oli 3,09 %. Toinen koe tehtiin hitaalla 2-tahtimootorilla, missä käytettiin polttoaineena HFO 180, minkä rikkipitoisuus oli 0,5 %. Mittaukset suoritettiin eri moottorikuormilla. Polttoaineiden hiukkaspäästöt sisälsivät pääosin kuivaa tuhkaa, haihtuvia orgaanisia aineita,

sulfaatteja ja tuhkaa. (Zhou et al. 2019, 973-974.) Kuvassa 3 on esitetty hiukkaspäästöjen määrä eri polttoaineilla ja kuormilla.

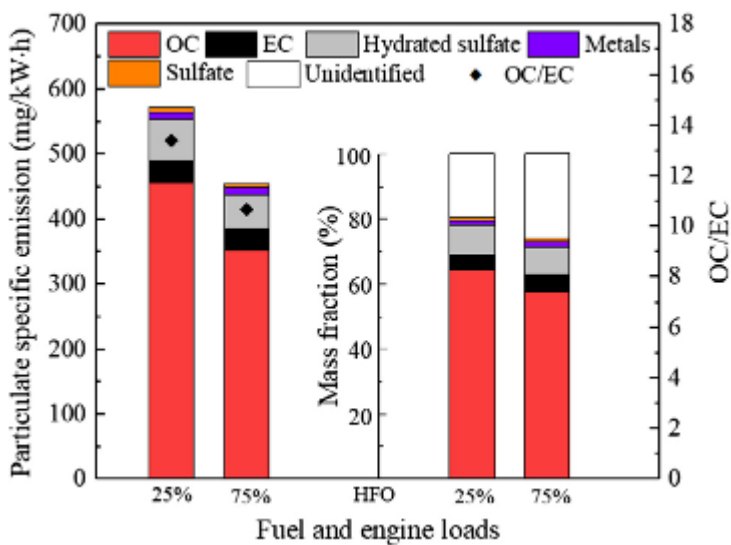


Kuva 3. Hiukkaspäästöjen määrä eri polttoaineilla ja moottorikuormilla. (Zhou et al. 2019, 974)

Kuvasta 3 nähdään eri polttoaineiden käyttäytyvän melko samalla tavalla moottorikuorman muuttuessa. Ainoana erona on HFO:n erityisen korkea hiukkaspitoisuus 25 % kuormalla. Tämä selittyy huonolla polttoainetehokkuudella, minkä takia pakokaasuvirta sisälsi palamatonta polttoainetta ja voiteluöljyä, mikä kasvatti hiukkaspäästöjä (Zhou et al. 2019, 974.). Optimaalisin moottoriteho hiukkaspäästöjen suhteen oli noin 50 %:ssa, jolloin hiukkasia muodostui vähiten energiayksikköä kohden. Moottoritehon suurentuessa huomaa, kuinka hiukkasten määrä kasvoi. Hiukkasmassojen koostumuksia ja massaosuuksia on esitetty nelitahtimoottorilla kuvassa 4 ja kaksitahtimoottorilla kuvassa 5.



Kuva 4. Hiukaspäästöjen koostumus eri moottorikuormilla 4-tahti moottorilla. (Zhou et al. 2019, 975.)



Kuva 5. hiukaspäästöjen koostumus ja massaosuudet eri moottorikuormilla HFO:lla, käyttäen 2-tahtimoottoria. (Zhou et al. 2019, 976.)

Kuvasta 4 nähdään hiukaspäästöjen määrä kWh kohden HSDF:llä ja LSDF:llä nelitahtimoottorissa. Noen, eli hiilipitoisia-aineita sisältävän aineen määrän ei juuri huomata muuttuvan eri polttoaineita käytettäessä. Suurin vaikutus määrään tulee polttoaineen sisältämästä rikistä, minkä takia sulfaattien määrä hiukasmassassa on myös suuri. (Zhou et al. 2019, 977.) Liitteessä I on vertailtu eri polttoaineilla ja moottoreilla saatuja tutkimustuloksia. Tästä nähdään selvästi polttoaineen

rikkipitoisuuden vaikuttavan sulfaattien määrään hiukkaspäästöissä. Raskaiden polttoaineiden hiukkaspäästöt sisältävät suurelta osin sulfaatteja sekä orgaanista ainesta, joka on suurimmalta osin OC:ta (Petzold et al. 2011, 10396.). Teknologian Tutkimuskeskuksen (VTT) tutkimuksessa (Aakko-Saksa et al. 2017, 62.) hiukkasmassan sulfaatit ovat pääosin rikkihappoa, orgaanisia, epäorgaanisia tai ammoniumsulfaatteja. Sulfaatit sitovat vettä, mikä kasvattaa niiden massaosuutta. Kyseisessä tutkimuksessa näytteenottolämpötila oli noin 400°C, mikä on suurempi kuin rikkihapon höyrystymispiste. (Aakko-Saksa et al. 2017, 62.) Voidaan siis olettaa hydratoituneiden sulfaattien haihtuvan hiukkasmassasta, jolloin sulfaattien määrä kuivassa hiukkasmassassa on pienempi.

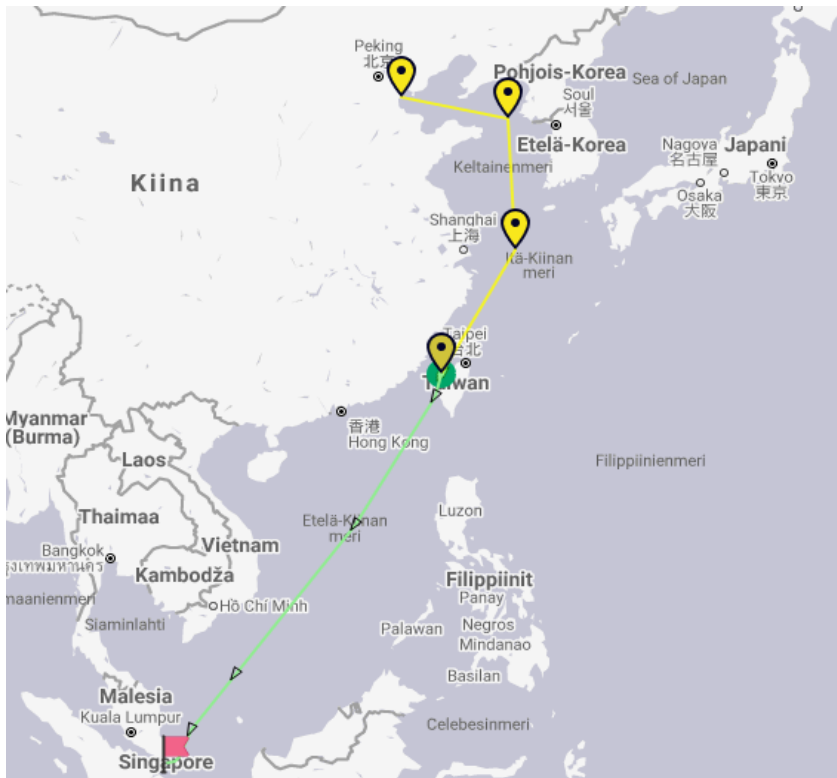
Kuvassa 5. HFO:n alhainen rikkipitoisuus näkyy sulfaattien määrässä. Hiukkasmassaa on syntynyt kuitenkin enemmän kuin paljon rikkiä sisältävällä HSDF:lla. Tämä johtuu HFO:n sisältämistä epäpuhtauksista, mitkä aiheuttavat epäpuhtaamman palamisen. Epäpuhtaampi palaminen tuottaa suuremman määrään OC:ta. (Aakko-Saksa et al. 2017, 102.) HFO:n poltosta syntyy enemmän hiukkaspäästöjä, verrattuna puhtaampiin polttoaineisiin. HFO:n korvaaminen puhtaammilla polttoaineilla vähentäisi siis hiukkaspäästöjen määrää. Hiukkaspäästöjen luonne pysyy kuitenkin melko samana riippumatta polttoaineesta. Suurin ero näyttäisi tulevan polttoaineen sisältämästä rikin määrästä. Voidaan siis todeta laivojen muodostaman hiukkasmassan olevan suurimmalta osaltaan hiilipitoista ainesta, eli nokea. Lisäksi mukana on muutamia prosentteja metalleja, sulfaatteja sekä tuhkaa.

3 CASE: RAHTIALUKSEN TUOTTAMA HIUKKASPÄÄTÖJEN MÄÄRÄ

Tässä kappaleessa tarkastellaan rahtialuksen tuottamat hiukkaspäästöt liikennöidessä Kiinan Kemenin satamasta Singaporen satamaan. Tarkoituksena on arvioida aluksen tuottamaa hiukkaspäästö määrää kyseisellä matkalla, käyttäen eri polttoaineita. Alus on valittu MaritimeTrafficin nettisivuilta ja sen reitti on määräytynyt oikean aluksen reitin mukaan. Alustyyppiä valittiin rahtialus, koska yli 40 % maailman liikennöivistä aluksista on rahtialuksia (IMO 2018, 24.). Reitti haluttiin löytää Aasiasta, koska noin puolet maailman laivaliikenteestä kulkee sen alueella (IMO 2018, 8). Aluksen valintaan vaikutti myös se, kuinka paljon tietoa kyseisestä aluksesta oli saatavilla. Laskennassa oletetaan hiukkaspäästöjä muodostuvan eri polttoaineilla luvussa kaksi esitettyjen kuvan 5 sekä liitteessä I käytetyn HFO:n mukaan.

3.1 Casen lähtötilanne

Alukseksi valikoitui vuonna 2012 valmistunut, yhdysvaltalainen rahtialus. Aluksen pituus on 289 metriä ja leveys 45 metriä. Aluksen rahtikapasiteetti on 55 800 tonnia. Moottorina toimii kuusi sylinterinen, hidas dieselmoottori, minkä maksimikierto nopeus on 108 rpm ja moottorin teho 8450 kW. Huippunopeus on 16 solmua, eli noin 30 km/h. Aluksen kulkema matka Kemenistä Singaporeen on 2820 merimailia, eli noin 5200 km. Aluksen matka-ajaksi on arvioitu 9 päivää ja 17 tuntia. (MarineTraffic 2019.) Aluksen reitti on esitetty kuvassa 6.

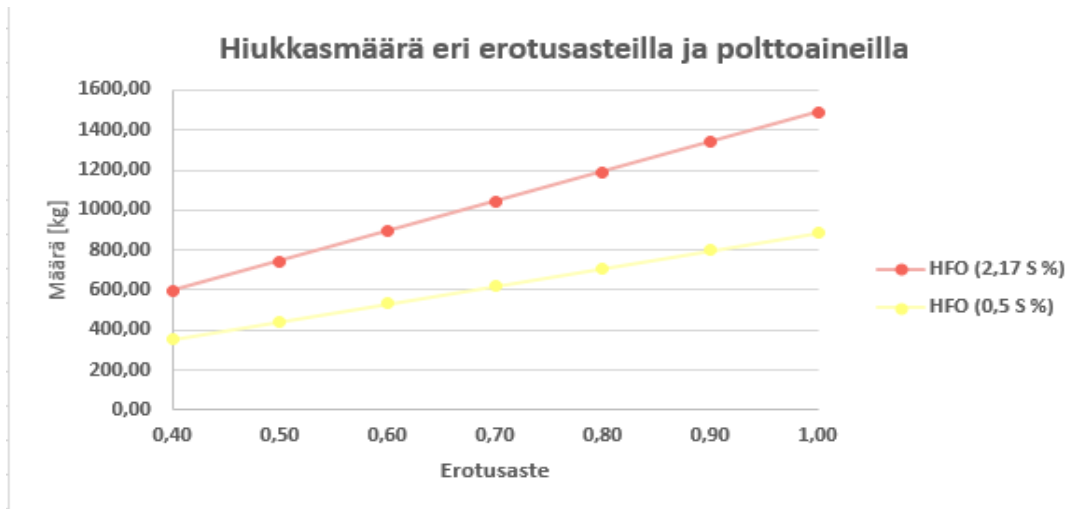


Kuva 6. Aluksen reitti Keministä Singaporeen (MarineTraffic. 2019.).

Moottorikuormaa ja sen vaihtelevuutta on vaikea arvioida, eikä sitä tietoa ole saatavilla. Laskennassa oletetaan moottorin käyvän keskimäärin 75 % kuormalla kyseisen matkan ajan. Tarkastellaan kahden polttoaineen tuottamia päästöjä. Polttoaineet ovat 0,5 % sekä 2,7 % rikkiä sisältävää HFO:ta. Matkasta syntyvän hiukkaspäästön määrä saadaan laskettua, kun tunnetaan aluksen moottorin nimellisteho, mikä kerrotaan matka-ajalla. Saatu energia kerrotaan hiukkassan päästökertoimella yksikössä g/kWh, jolloin saadaan hiukkaspäästön massa koko matka-ajalta. Hiukkasmassan tiheyden avulla saadaan laskettua matkan aikana muodostuvan hiukkasmassan tilavuus.

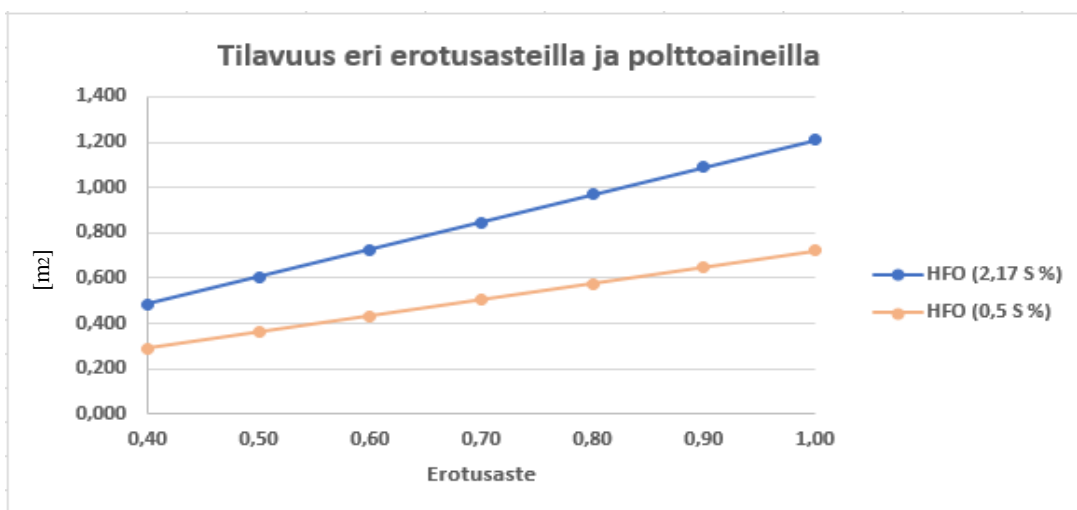
3.2 Tulokset

Laskennan tulokset on esitetty liitteessä II. Ensin on laskettu hiukkasmassan paino kuljetulla matkalla. Tässä on oletettu, että tutkimuksissa muodostuva hiukkasmassa on ollut kokonaismuodostumismäärä. Todellisuudessa on mahdotonta saada kerättyä 100 % hiukkasista talteen, joten on laskettu talteen saatu hiukkasmassa eri erotusasteilla. Tulokset on esitetty kuvaajassa 1.



Kuvaaja 1. Talteen kerätty hiukkasmassa eri erotusasteilla ja polttoaineilla.

Kuvaajasta 1 nähdään koko matkalla syntyvän hiukkasmassan määrä 100 % erotussuhteella. Määrä luonnollisesti laskee, mitä alhaisempi erotusaste on. Enemmän rikkiä sisältävällä polttoaineella syntynyt hiukkasmassa on noin 1500 kg ja toisella polttoaineella noin 900 kg. Käytetyllä polttoaineella on siis suuri ero hiukkaspäästöjen muodostumisen kannalta. Laivoista kertyvän hiukkasmassan kiintotiheys on 1230 kg/m³, jossa ei olla huomioitu hiukkasmassan sisältämää ilmaa ollenkaan (Petzold et al. 2008, 2392.). Tiheyden avulla saadaan laskettua kerätyn hiukkasmassan tilavuus eri erotusasteilla. Tilavuudet eri erotusasteilla on esitetty kuvaajassa 2.



Kuvaaja 2. Hiukkasmassan tilavuus eri erotusasteilla.

Tällä hetkellä hiukkasmassalle ei löydy hyötykäyttökohteita laivoissa, joten hiukkasmassan keräyksessä tulee huomioida sen säilytys ja kuljetus turvallisesti määränpäähän. Hiukkasmassa on pölyävää, joten se tulee saada varastoitua aluksella suljettuun tilaan. Enemmän rikkiä sisältävällä polttoaineella syntyvän hiukkasmassan tilavuus on noin 1,2 m³. Realistisemmalla, 80 % erotusasteella tilavuus olisi noin 1 m³ luokkaa. Alus tarvitsisi siis yhden kuution kokoisen säiliön kyseisen matkan tuottamille hiukkasille, mikäli erotusaste olisi 80 %. Tulokset on laskettu kiintotiheydellä, joten kyseisessä tilanteessa hiukkasmassa olisi puristettu kasaan. Tällöin hiukkasten väliin ei jää ilmaa, eli aine ei ole huokoista. Realistisessa tilanteessa hiukkasmassa olisi kuitenkin huokoista, joten tilavuus olisi huomattavasti suurempi. Säiliön koossa tulisi myös huomioida vaihtelevat matkat sekä tyhjentämismahdollisuudet. Vaikka hiukkasten talteenotto yleistyisikin, ei todennäköisesti läheskään jokaisessa satamassa ole käsittelykeskusta mihin säiliö saataisiin tyhjennettyä. Säiliön tulisi siis olla suurempi, kuin saatu hiukkasmäärä.

Suuremmilla aluksilla ja pidemmällä matkoilla tarvittava säiliö kasvaisi huomattavasti. Marine Trafficin mukaan matka eräällä aluksella Indonesiasta Hawaijille kesti 3 viikkoa. Aluksen päämoottorin teho oli 14200 kW. (Marine Traffic 2019.) Kyseiseltä matkalta alus tuottaisi noin 3,5 m³ päästöjä ajettaessa 2,7 % rikkiä sisältävällä polttoaineella ja mikäli erotusaste olisi 80 %. Tarpeeksi suuret säiliöt tulisivat siis olemaan useita, jopa kymmeniä kuutioita, joiden sisällyttäminen alukseen vaatisi lisäjärjestelyitä.

4 HIUKKASMASSAN KÄSITTELY JA HYÖTYKÄYTTÖ

Vaikka uudet säädökset vuonna 2020 tulevat painostamaan polttoaineen vaihtamista puhtaampiin, synnyttää laivaliikenne silti paljon hiukkaspäästöjä. (IMO 2019, 117.) Tässä työssä oletetaan, että hiukkasmassa saadaan kerättyä talteen pakokaasuvirrasta. Kerätylle hiukkasmassalle tulisi löytää hyötykäyttökohteita, jotta se voidaan tulevaisuudessa hyödyntämään.

4.1 Hiukkasmassan hyödyntäminen litium-ioni-akuissa

Uudelleenladattavien litium-ioni-akkujen (engl. lithium-ion batteries, LIB) anodiosana käytetään usein kiteistä grafiittia (Inagaki et al. 2014, 15.). Laivojen dieselmoottorista syntyvä noki sisältää noin 80% hiiltä (Ess et al. 2016, 158.). Scientific Reports (2018) tutki pystytäänkö laivan pakokaasuvirrassa olevasta noesta valmistamaan kiteisen grafiitin rakennetta muistuttavaa anodimateriaalia uudelleen ladattavaan litium-ioni-akkuun. Tutkimuksessa käytettiin huonolaatuista, 2,9 % rikkiä sisältävää HFO380:a suuressa rahtialuksessa. Noki kerättiin talteen savukaasuesilämmittimestä, missä suurin osa siitä muodostuu. Kerätylle noelle tehtiin CHNS-mittaus (Carbon Hydrogen Nitrogen Sulphur) ja se sisälsi noin 80 % Hiiltä, 1,20 % Happea, 0,77 % typpeä ja 3,16 % Rikkiä. Epäpuhtaudet tekevät hiilirakenteesta erittäin epäsäännöllisen. Kerätyn noen muita aineita ei mitattu tutkimuksessa. (Won-Ju et al. 2018, 2-4.)

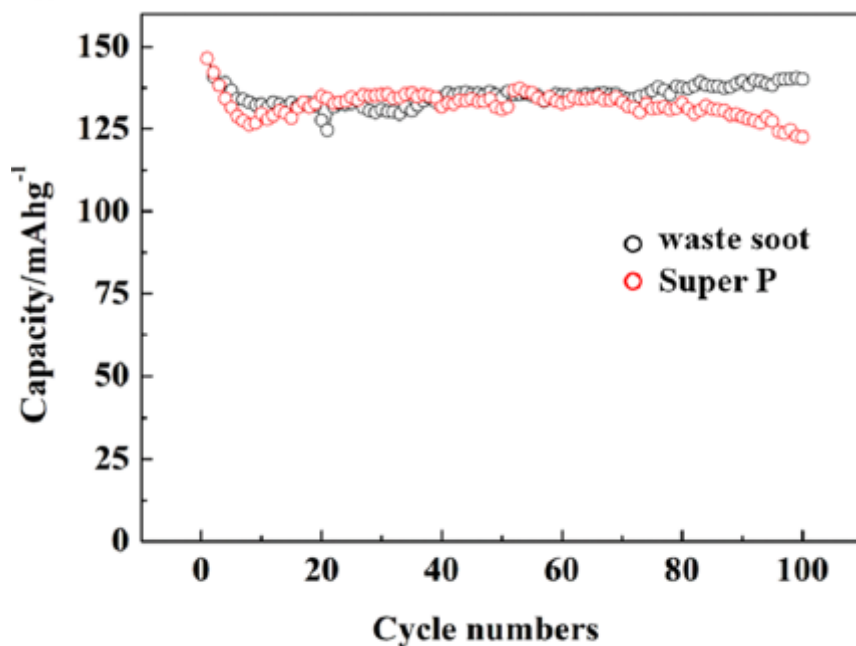
Kerätylle noelle suoritettiin grafitointi, eli lämpökäsittely, missä sen rakennetta pyritään muokkaamaan kiteiseksi. Nokea asetettiin 10g erittäin korkean lämpötilan uuniin, missä se lämmitettiin 2700°C seuraavasti:

- 1800°C:seen 10°C minuutissa
- 1800-2400°C:seen 5°C minuutissa
- 2400-2700°C:seen 3°C minuutissa

Noki pidettiin kyseisessä lämpötilassa kaksi tuntia, minkä jälkeen uunin annettiin viilentyä ympäröivään lämpötilaan. Viilennyksen jälkeen saatiin kerättyä talteen hehkutettu noki. Lämpökäsittelyn jälkeen noelle tehtiin uusi CHNS-mittaus, minkä tuloksena hiiltä oli lähes 99 %, eikä muita tutkittuja aineita löydetty. Muissa tutkimuksissa selvisi noen sisältävän pieniä määriä nikkelioksidia NiO:ta. Hehkutetun noen rakennetarkasteluissa huomattiin noen, aiemmin epäjärjestyksessä olevan rakenteen järjestäytyneen kiteiseksi. Rakenne erosi kiteisestä grafiitista kuitenkin siten, että sen kerrosten väli oli hieman laajempi. Noki ei siis grafitoitunut täydellisesti lämpökäsittelyssä. (Won-Ju et al. 2018, 3-4.)

Hehkutetun noen sähkökemiallista suorituskykyä testattiin galvaanisella lataus/purkaus kokeella. Yleensä akusta saatava energia vähenee, mitä enemmän sinne syötetään virtaa. Kokeessa testattiin ominaisuuksia ensin kolmella kierrolla, minkä jälkeen jatkettiin 150 kierrokseen asti. Koe osoitti hyvää kierronkestävyyttä ja palautumista, mitkä ovat tärkeitä tekijät LIB:n anodiosassa. Hehkutetulle noelle suoritettiin Bruneaur-Emmet-Teller (BET) koe, missä mitattiin sen rakenteellisia ominaisuuksia. BET:n tulos kertoo anodihiukkasten koosta. Mitä pienempiä hiukkaset ovat, sitä suurempi sen pinta-ala on. Ennen hehkutusta tuhkan tulos oli 8,2 m²/g ja hehkutuksen jälkeen tulos oli 13,3 m²/g. Pinta-alan kasvun arveltiin johtuvan hehkutuksen aikana poistuneesta vedystä. LIB:ssä yleensä käytetyn grafiitin vastaava arvo on noin 2 m²/g, mikä on lähes 7 kertaa pienempi kuin hehkutetulla tuhalla. Suuri pinta-ala, eli anodien pieni hiukkaskoko mahdollistaa nopeamman latauksen, mutta vaikuttaa negatiivisesti ensimmäisen kierron tehokkuuteen. Tämä saadaan kuitenkin korjattua johtamalla ylimääräistä litiumia ensimmäiseen kiertoon. Kokeessa verrattiin kaupallista, grafiitista valmistettua, anodimateriaalia hehkutetusta noesta valmistettuun materiaaliin. (Won-Ju et al. 2018, 5-6.)

Tulokset on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Kaupallisen (Super P) sekä noesta (waste soot) valmistetun anodimateriaalien vertailu 100 kierroksella. (Won-Ju et al. 2018, 8.)

Kuvasta 7. nähdään kuinka tulokset poikkeavat vähän toisistaan. Näiden tulosten perusteella hehkutetulla noella on hyvät ominaisuudet sähkön johtavuudessa. Se todettiin hyväksi materiaaliksi LIB:n anodin käytössä. Toimivuutensa lisäksi se olisi myös edullinen vaihtoehto yleisesti käytetylle grafiitille. (Won-Ju et al. 2018, 8.)

4.2 Hiukkasmassan hyödyntäminen superkondensaattoreissa

American Chemical Society (on tutkinut tieliikenteen dieselmoottorien hiukkaspäästöjen hyötykäyttöä superkondensaattoreissa. Hiukkaspäästöjen hiukkasten keskiosassa olevaa puhdasta hiiltä ympäröi palamattomia hiilivetyjä. Keskiosan hiilirakenteella on havaittu sipulimainen muoto, minkä on todettu olevan hyvä materiaali superkondensaattorien energiavarastoina. Meripuolen hiukkaspäästöjen noessa on havaittu samankaltainen sipulimainen rakenne, kuin tieliikenteessä

(Won-Ju et al 2018, 3.). Täten tutkimusta voidaan ajatella hyödynnettäväksi myös meriliikenteen hiukkaspäästöille.

Superkondensaattorin toimintaperiaate on lähes sama kuin akuilla. Siinä on kaksi erimerkkistä elektrodilevyä, mitkä varastoivat saman suuruiset sähkövaraukset. Elektrodilevyjen välille muodostuu sähkökenttä, mihin energia varastoituu. Superkondensaattorissa käytetään aktiivisia elektrodimateriaaleja, joiden pinta-ala on laaja. Elektrodimateriaali pinnoitetaan metallisella oksidilla. (Ratha et al. 2018, 5.) Kerätty noki puhdistettiin vahvasti hapettavalla seoksella, mikä sisälsi rikkihappoa (H_2SO_4) sekä Kaliumpermanganaattia ($KMnO_4$). Kyseisten aineiden yhdistelmä johtaa erittäin hapettavan permanganaatti-ioni-liuoksen muodostumiseen, mikä myöhemmin saadaan kiteytettyä hiiliytimen kuoreksi.

Kokeessa 250 mg dieselmoottorin nokeen sekoitettiin 10 ml H_2SO_4 :a noin tunnin ajan, kunnes seoksen värin havaittiin muuttuvan mustaksi. Tämän jälkeen lisättiin 250 mg $KMnO_4$ kiteitä sekoittaen 4 tuntia $70^\circ C$ lämpötilassa. Seos jäähdytettiin 100 ml vettä. Veteen oli lisätty 1 ml vetyperoksidia (H_2O_2), mikä estää mangaanioksidin (MnO_2) saostumisen. Jäähdytymisen jälkeen seos suodatettiin $0,45 \mu m$ raekokoon, mikä kuivattiin. Prosessista saatua hiukkasmassaa kutsutaan hydrofiiliseksi mustaksi hiileksi (engl. hydrophilic carbon black, HCB), mikä toimii aktiivihiilenä. HCB:n pinnalle saatiin syntetisoitua mangaanioksidikuori, kun viilennyksessä vältettiin H_2O_2 :n käyttöä, jolloin MnO_2 saostui. Materiaalia valmistettiin noki $KMnO_4$ suhteella 1:4, jolloin MnO_2 saostui ovaalinmuotoiseksi kuoreksi HCB:n ympärille. Optimaalisin suhde kokeessa oli 1:2, jolloin HCB:n ympärille muodostui tasainen MnO_2 kuori. Kaikilla kolmella suhteella valmistettujen materiaalien sähkökemiallisia ominaisuuksia testattiin, mistä 1:2 suhteella valmistettu materiaali osoitti parasta sähkönjohtavuutta ja varastointiominaisuuksia.

4.3 Hiukkasmassan hyödyntäminen väriaineena

Muodostuvien hiukkasten suuri hiilipitoisuus aiheuttaa hiukkasmassan mustan värin (Aakko-Saksa et al. 2017, 9.). Air Ink niminen yritys on keksinyt tavan hyödyntää tätä väriä, tekemällä fossiilisten polttoaineiden tuottamasta hiukkasmassasta väriainetta. Hiukkasmassasta poistetaan epäpuhtaudet, kuten metallit. Puhdistaminen alkaa suurten hiukkasten painovoimaisella erotuksella, mistä katalysoinnin jälkeen hiukkaset jauhetaan vakioartikkelikokoon. Tämän jälkeen jauheesta saadaan

valmistettua nestemäistä mustetta. Gravity Labs vakuuttaa musteen käytön olevan yhtä turvallista kuin markkinoiden vastaavien tuotteiden. (Gravity Labs 2019.) Puhdistamisen vaiheista ei löydy lähteitä, joten prosessin kestosta ja sen sivutuotteista ei ole tietoa.

4.4 Hiukkasten hyödyntäminen polttoaineena

Hiukkaspäästöjen ollessa suurimmalta osalta nokea, eli palavia aineita, voidaan ajatella käytettävän kyseinen aine polttoaineena. Wärtsilältä saatiin kahta näytettä meridieselmoottorin tuottamasta hiukkaspäästöistä kahdella eri polttoaineella. Näytteitä merkattiin nimillä HFO ja LFO. Saaduista näytteistä mitattiin niiden kalorimetristä lämpöarvoa. Kalorimetriseen lämpöarvoon lasketaan mukaan polttoaineen sisältämän vedyn palamisenergia sekä palamisessa muodostuvan veden höyrystymisenergia (Alakangas et al 2016. 28.). Molemmilla näytteillä tehtiin kaksi koetta. Tarkemmat tulokset ja laskeminen on esitetty liitteissä III ja IV. Palamaton aines koostuu pääosin mineraaliaineksesta, mikä on suurimmalta osalta tuhkaa (Alakangas et al 2016. 12.). Vertailussa palamaton aines oletetaan olevan tuhkaa. Seuraavaksi tuloksia verrataan Suomessa käytetyn kivihiilen ominaisuuksiin ja miten hiukkasmassa soveltuisi kivihiilen korvaajaksi. Kokeiden keskiarvolla saadut tulokset sekä venäläisen kivihiilen ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Näytteistä saadut kalorimetriset lämpöarvot sekä palamaton aines (Pelkonen, Sähköpostiviesti 25.11.2019; Alakangas et al 2016. 173.).

Polttoaine	Kalorimetrinen lämpöarvo [Mj/kg]	Palamatonta ainesta (tuhka) [%]
HFO	20,90	20
LFO	13,94	48
Venäläinen kivihiili	29,17	12,5

Kivihiilen tuonti suomeen on noin 4-7 miljoonaa tonnia vuodessa. Laskennassa käytetään venäläisen kivihiilen ominaisuuksia, koska noin 90% Suomessa käytetystä kivihiilestä on tuotu Venäjältä. Lasketaan, paljonko hiukkasmassaa tarvitaan suhteessa kivihiileen kilogrammaa kohden, jotta saadaan tuotettua sama energiamäärä.

$$m_{\text{vertailu}} = \frac{HHV_{\text{hiukkas}}}{HHV_{\text{hiili}}} \quad (1)$$

$$m_{\text{vertailu}} = \text{massa} \left[\frac{\text{kg}_{\text{hiukkas}}}{\text{kg}_{\text{hiili}}} \right]$$

$$HHV_{\text{hiukkas}} = \text{hiukkasmassan kalorimetrinen lämpöarvo [MJ]}$$

$$HHV_{\text{hiili}} = \text{kivihiilen kalorimetrinen lämpöarvo [MJ]}$$

Kaavalla 1 lasketaan hiukkasmassan määrä, jotta saadaan tuotettua sama energiamäärä kuin kilogrammalla kivihiiltä. Esimerkkisijoitukset on tehty HFO:lle. LFO:lle on esitetty vain saatu tulos.

$$m_{\text{HFO}} = \frac{29,17^{\text{MJ}}/\text{kg}_{\text{HFO}}}{20,90^{\text{MJ}}/\text{kg}_{\text{hiili}}}$$

$$m_{\text{HFO}} = 1,40 \frac{\text{kg}_{\text{HFO}}}{\text{kg}_{\text{hiili}}}$$

$$m_{\text{LFO}} = 2,09 \frac{\text{kg}_{\text{LFO}}}{\text{kg}_{\text{hiili}}}$$

Näytteiden otannat eivät ole laajoja, eikä polttoaineista ole tarkempia tietoja, joten saadut tulokset ovat suuntaa-antavia. Tuloksista nähdään näytteiden soveltuvuus kivihiilen korvaajaksi. LFO:ksi merkattua näytettä vaadittaisiin yli kaksinkertainen määrä kivihiileen verrattuna. Näyte sisältää 48 % tuhkaa, joten lähes puolet polttoaineesta päätyisi takaisin ilmaan. HFO:n tulokset ovat lähempänä kivihiiltä, minkä takia sitä tarvitaan 1,4 kertainen määrä kivihiileen nähden. Hiukkasmassan polttaminen olisi yksi edullisimmista ja helpoimmista tavoista uusiokäyttää se. Hiukkasmassa on kuitenkin lähtöisin fossiilisesta polttoaineesta, joten sen käyttäminen polttoaineena voidaan ajatella olevan haitallista ympäristölle. Ympäristövaikutuksista ei kuitenkaan ole tarkempaa tietoa. Työ- ja

elinkeinoministeriön mukaan Suomessa on voimassa laki, mikä kieltää kivihiilen käytön lämmön- ja energiantuotannossa 1.5.2029 (Työ- ja elinkeinoministeriö 2019.). Tämän jälkeen hiukkasmassaa voitaisiin ajatella käytettäväksi myös toisen kiinteän polttoaineen rinnalla.

4.5 Hiukkasten hyödyntäminen orgaanisten väriaineiden poistamiseksi jätevedestä

Orgaanisia väriaineita käytetään paljon elintarvikkeissa, tekstiileissä, kosmetiikassa sekä lääketeollisuudessa. Väriaineet liukenevat veteen ja kulkeutuvat täten luontoon. Useat väriaineet ovat haitallisia eläville organismeille. Organismien käyttäessä jätevettä ravinteena, päätyvät väriaineet suoraan sen elimistöön. Väriaineet vaikuttavat myös välillisesti vesistöissä, sillä ne heijastavat auringonvaloa takaisin ylös, jolloin kasvit saavat valoa vähemmän. Kasvien kasvu hidastuu tai ne saattavat kuolla valonpuutteen vuoksi. (Fernandez et al 2010. 1202.)

Väriaineiden poistaminen jätevedestä on usein hankalaa ja työlästä, sillä väriaineiden poistamisen yhteydessä syntyy sivutuotteita, mitkä täytyy poistaa vedestä jälkeinpäin. Tietty tekniikat väriaineiden poistamiseksi toimivat biohajottavasti, joten niiden käyttö vaatii eläviä organismeja. Tästä syystä puhdistettavan veden ominaisuudet, kuten lämpötila, pH ja toksisuus tulee huomioida. Vääränlaisissa olosuhteissa organismit eivät onnistu puhdistamaan jätevettä. Useimmat tekstiilijätevedet eivät sovellu puhdistettavaksi biohajottavalla keinoilla. Useimmin käytetty menetelmä on edistynyt hapetusprosessit (engl. Advanced oxidation process, AOP). Kyseisessä menetelmässä väriaineet muuttuvat alhaisen molekyylipainon omaaviksi aineiksi kuten pieniksi epäorgaanisiksi yhdisteiksi, aldehydeiksi tai karboksyylihapoiksi. Menetelmät ovat nopeita eivätkä synnytä merkittäviä sivutuotteita, mitä jouduttaisiin poistamaan jälkikäteen. AOP:n heikkoutena on sen energiaintensiivisyys ja kalleus. (Fernandez et al 2010. 1205-1206.)

Viime aikoina tutkimukset ovat kohdistuneet grafeenin laajoihin käyttökohteisiin. Yksi käyttökohteista on väriaineiden poistaminen jätevedestä auringonvalon avulla. Scientific reportsin tutkimuksessa kerättiin polttomoottorin nokea. Noen sisältämästä mustasta hiilestä valmistettiin

vesiliukoista grafeeninanolevyä. Väriaineiden poisto tapahtuu valohajoamisella, eli grafeenilevy toimii väriaineiden poistajana auringonvalon yhteydessä. Kyseisen grafeenilevyn vaikutusta kolmen yleisimmän väriaineen: kristallivioletin, rodamiinin, metyyliinisinisen sekä näiden sekoituksen poistamiseksi jätevedestä tutkittiin vehnäkasvin avulla. Vehnäkasvi soveltuu hyvin vedenlaadun tutkimiseen, koska se on yksi herkimmistä ja nopeimmin kasvavista kasveista. Kasvi istutettiin tislattuun talousveteen, veteen mikä sisälsi kyseisiä väriaineita sekä väriaineita sisältävään veteen, mikä oli puhdistettu grafeenilevyä käyttäen. Tulokset osoittivat, että kasvi kasvoi yhtä hyvin puhdistetussa kuin tislatussakin vedessä. Vettä puhdistettaessa saatiin poistettua noin 99 % sen sisältämistä väriaineista. Kokeen aikana tehtiin neljä sykliä, joiden jälkeen grafeenilevyn kyky hajottaa väriaineita laski noin 22 %. (Gunture et al 2019. 1-7.)

Toisessa tutkimuksessa valmistettiin grafeeninanolevyjä vanhojen litium-ioni-akkujen grafeenista. Kokeessa valmistettiin grafeenioksidia vanhasta grafeenista, mikä lämpökäsiteltiin eri lämpötiloissa. Syntynyt grafeeninanolevy osoitti hyvää liukoisuutta veteen, etanoliin sekä muihin liuottimiin. Paras tulos saatiin, kun se lämpökäsiteltiin 220°C. Korkeammissa lämpötiloissa levyn pinta oli alttiimpi surkastumaan. (Zhao et al 2018. 1-2.) Luvussa 4.1 käsiteltiin noesta valmistetun grafeenin käyttöä litium-ioni-akuissa. Täten noesta valmistettu grafeeni voitaisiin hyötykäyttää edelleen, akun käytön jälkeen.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Uusien säädöksiä myötä epäpuhtaiden polttoaineiden käyttö vähenee, mutta ne tulevat silti olemaan suuressa osassa laivaliikennettä. Vaikka tulevaisuudessa raskasta polttoöljyä ei käytettäisi ollenkaan, tuottavat puhtaammat polttoaineet huomattavan määrän hiukkaspäästöjä. Kasvava ilmastonmuutos ja hiukkaspäästöjen havaitut terveysriskit pakottavat toimimaan, eikä tulevaisuudessa ole enää suotuisaa päästää hiukkasia ilmakehään nykyisellä tavalla. Mikäli hiukkasmassa saadaan kerättyä talteen, täytyy se saada varastoitua laivoihin, kunnes hiukkasmassa voidaan kuljettaa jatkokäytettäväksi. Kuljetuksessa ja varastoinnissa täytyy huomioida hiukkasten pieni partikkelikoko, mikä aiheuttaa sen pölyämisen.

Laivoista kerätyn hiukkasmassan hyötykäytöstä ei ole paljoa tutkimuksia, mutta tieliikenteen hiukkaspäästöille tehtyjä tutkimuksia voidaan ajatella sovellettavaksi myös laivaliikenteen päästöille. Hiukkaspäästöjen noen on havaittu muodostavan grafeenimaisen rakenteen, mikä osoittaa hyvää sähkönjohtamis- sekä sen varastointikykyä. Kokeissa on saatu valmistettua elektrodimateriaalia hiukkaspäästöjen noesta, mikä on osoittanut potentiaalia litium-ioni-akuissa sekä superkondensaattoreissakorvaamaan yleisimmin käytetyn grafeenin. Hiukkasmassasta valmistettu materiaali on halpa vaihtoehto grafeenille ja sen valmistuksessa hiukkasmassan sisältämät epäpuhtaudet saadaan poistettua.

Hiukkasten tumma väri sopii väriaineeksi valmistukseen. Voimalaitoksesta kerätystä noesta valmistetaan jo mustetta, joten sen tulisi olla mahdollista myös laivaliikenteen hiukkaspäästöille. Hiukkasmassa täytyy käsitellä, jottei siitä valmistettu väriaine ole ympäristölle ja terveydelle vaarallista. Käsittelyn vaiheista ei löydy lähteitä, joten sen sivutuotteiden haitallisuudesta ei ole tietoa.

Hiukkasmassa sisältää paljon hiiltä, jolloin sitä voitaisiin ajatella käytettävän polttoaineena kivihiilen korvaajana. Kalorimetrinen lämpöarvojen vertailun perusteella kahdesta näytteestä toinen osoitti paremman tuloksen, mutta näytteiden alkuperästä ei ole paljon tietoa. Molempia näytteitä tarvitaan kuitenkin enemmän kivihiileen verrattuna, koska niiden kalorimetrinen lämpöarvo on kivihiiiltä pienempi. Kivihiilen ja muiden epäpuhtaiden polttoaineiden käyttöä pyritään vähentämään, joten kivihiiiltä tarvitsisi polttaa vähemmän, mikäli sitä poltettaisiin yhdessä hiukkasmassan kanssa. Sen polttaminen ei välttämättä ole paras mahdollinen vaihtoehto, sillä se on epäpuhdasta, eikä sen polttamisen vaikutuksia ympäristöön tiedetä tarkasti.

Potentiaalisimmaksi hyötykäyttömahdollisuudeksi osoittautui tutkimus, missä käytettyjen litium-ioni-akkujen grafeenista onnistuttiin valmistamaan vesiliukoista grafeenilevyä, minkä avulla jätevedestä saadaan poistettua haitallisia väriaineita. Toisessa tutkimuksessa myös noesta saatiin valmistettua vastaavaa grafeenilevyä. Laivaliikenteen hiukkasmassaa olisi siis mahdollista hyötykäyttää ensin litium-ioni-akuissa grafeenina ja akun poistuttua käytöstä voitaisiin se käyttää uudelleen jäteveden puhdistamisessa. Tutkimuksissa on käsitelty pieniä määriä hiukkasmassaa, joten suurempien määrien käsittelystä ei ole tietoa.

6 YHTEENVETO

Laivaliikenteen arvioidaan tuottavan noin 20 % Euroopan hiukkaspäästöistä. Maailmanlaajuisesti hiukkaspäästöt ovat suuri ongelma terveydelle sekä ympäristölle. Laivaliikenteessä suurin hiukkaspäästöjen lähde on polttoaineena käytettävät raskaat polttoöljyt, joita syntyy öljynjalostuksessa. Niitä käytetään paljon, koska ne eivät sovellu käytettäväksi muuhun kuin voimalaitoksiin laivojen lisäksi. IMO:n uusien säädösten myötä yli 0,5 % rikkiä sisältävien polttoaineiden käyttöä tullaan rajoittamaan ilman pakokaasua puhdistavaa pesuria. Sen käyttö tulee silti olemaan suuressa osassa laivaliikennettä tulevaisuudessa. Tämä johtuu pääosin sen alhaisesta hinnasta verrattuna vaihtoehtoisin polttoaineisiin, ja siitä että sen käyttökohteet ovat hyvin rajalliset.

Hiukkaspäästöjen määrään ja rakenteeseen vaikuttaa suurelta osin käytetty polttoaine. Suurin tekijä huomattiin olevan polttoaineen sisältämät epäpuhtaudet, mitkä siirtyvät suurelta osin pakokaasuvirtaan. Moottorikuormalla on myös vaikutus muodostuvan hiukkasmassan määrään. Optimaalisin polttoainetehokkuus saavutetaan noin 50 % moottorikuormalla, jolloin syntyy vähiten hiukkaspäästöjä. Työssä keskityttiin erotettuun hiukkasmassaan ja sen hyötykäyttömahdollisuuksiin, eikä sen erottamista pakokaasuvirrasta käsitelty. Kirjallisuuskatsauksen ja oletusten avulla päästiin tulokseen, että hiukkasmassa on suurimmalta osalta nokea. Lisäksi se sisältää usein rikkiä, mikä on peräisin polttoaineen sisältämästä rikistä sekä pienen määrän metalleja.

Maailman laivaliikenteessä muodostuu paljon hiukkaspäästöjä. Vaikka uusien säädösten myötä käytetyt polttoaineet vaihdettaisiin parempilaatuisiin, syntyy hiukkaspäästöjä silti paljon. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi tulee näihin päästöihin alkaa kiinnittää entistä enemmän huomiota. Kerätyllä hiukkasmassalla on selvästi potentiaalia uusiokäyttöön. Erityisesti elektroniikassa hiukkasmassan hiilikomponentit ovat osoittautuneet hyväksi vaihtoehdoksi nykyisten materiaalien tilalle. Hiukkaspäästöistä valmistetut uusiomateriaalit ovat halpa vaihtoehto, koska sen käyttökohteet ovat hyvin rajalliset.

Case-tarkastelussa Marine Trafficin sivuilta valittiin rahtialus, minkä moottoriteho sekä reittitiedot saatiin selville. Aluksen kulkemalta matkalta Kemenistä Singaporeen arvioitiin sen tuottamat hiukkaspäästöt ja paljonko aluksella vaadittaisiin säilytystilaa, mikäli hiukkaset saataisiin kerättyä talteen eri erotusasteilla, olettaen ettei hiukkasmassaa saada hyötykäytettyä laivassa. Maailman

mittakaavassa laivan kulkema matka ei ole kovinkaan pitkä. Kyseisen matkan tuottama hiukkasmassa raskaalla polttoöljyllä ja 80 % erotusasteella vaatisi noin kuutiometrin tilavuuden.

Hyötykäyttömahdollisuuksista tehtyjä tutkimuksia löytyi varsinkin tieliikenteen hiukkaspäästöistä, joita sovellettiin meriliikenteen käyttöön. Hiukkasmassaa voitaisiin käyttää polttoaineena esimerkiksi kivihiilen rinnalla. Yhdessä kivihiilen kanssa poltettaessa se vähentäisi kivihiilen tarvetta. Polttoaineena käyttö olisi yksi helpoin tapa sen käyttöön, kuitenkin hiukkasmassalle näyttäisi olevan muitakin hyötykäyttökohteita, joten polttaminen ei ehkä ole paras ratkaisu. Hiukkasmassan väri soveltuu musteen valmistukseen. Tämä vaatisi kuitenkin paljon käsittelyä, jotta musteesta saataisiin epäpuhtaudet poistettua. Nokihukkasten keskiosan on havaittu muodostuvan sipulimaisesta hiilirakenteesta, millä on todettu olevan hyvä sähkönjohto- ja varastoimiskyky. Lämpökäsittelyllä noesta saadaan valmistettua grafeenimaista rakennetta, mikä soveltuu litium-ioni-akkujen anodimateriaaliksi. Kyseisellä rakenteella nähdään myös potentiaalia tulevaisuudessa superkondensaattoreissa. Litium-ioni-akkujen anodimateriaalista on pystytty valmistamaan vesiliuokoista grafeenilevyä, millä saadaan poistettua haitallisia väriaineita jätevedestä. Sama tutkimus valmisti kyseistä grafeenilevyä hiukkaspäästöjen noesta.

LÄHTEET

Aakko-Saksa, Murtonen, Vesala, Koponen et al. 2017. Black carbon emissions from a ship engine in laboratory [verkkodokumentti]. [viitattu: 1.10.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2017/VTT-R-02075-17.pdf>

Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama, & Korhonen. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia [verkkodokumentti]. [viitattu: 18.11.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Concawe. 2017. Marine Fuel Facts [verkkodokumentti]. [viitattu: 28.9.2019]. Saatavissa: https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/01/marine_factsheet_web.pdf

DNV GL. 2019. Maritime Forecast to 2050. [verkkodokumentti]. [viitattu: 11.12.2019]. Saatavissa: <https://eto.dnvgl.com/2019/download>

Ess, Bladt, Mühlbauer, Seher, Zöllner, Lorenz, Brüggemann, Nieken, Ivleva, & Niessner. 2016. Reactivity and structure of soot generated at varying biofuel content and engine operating parameters [verkkodokumentti]. [viitattu: 5.11.2019]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218015003193>

Fernandez, Larrechi & Callao. 2010. An Analytical overview of processes for removing organic dyes from wastewater effluents. [verkkodokumentti]. [viitattu: 29.1.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0165993610002190>

Fritt-Rasmussen, Wegeberg, Gustavson, Sorheim, Daling, Jorgensen, Tonteri, & Holst-Andersen. 2018. Heavy Fuel Oil (HFO) [verkkodokumentti]. [viitattu: 20.10.2019]. Saatavissa: <http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:1259220/FULLTEXT01.pdf>

Gunture, Singh, Bhati, Khare, Tripathi & Sonkar 2019. Soluble Graphene Nanosheets for the Sunlight-Induced Photodegradation of the Mixture of Dyes and its Environmental Assesment. [verkkodokumentti]. [viitattu: 20.10.2019]. Saatavissa: <https://www.nature.com/articles/s41598-019->

38717-1.pdf

Graviky Labs. 2019. AIR-INK. [Internet-sivu]. [viitattu: 23.11.2019]. Saatavissa: <http://www.graviky.com/air-inktrade.html>

Inagaki, Kang, Toyoda, and Konno. 2014. Advanced materials science and engineering of carbon [verkkodokumentti]. [viitattu: 20.11.2019]. Saatavissa: <https://wilma.finna.fi/lut/Record/wilma.180302>

International Marine Organization. 2019. Guidelines for consistent implementation of the 0.50% Sulphur limit under marpol annex VI [verkkodokumentti]. [viitattu: 16.9.2019]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/Documents/MEPC.320%2874%29.pdf>

International Marine Organization. 2014. Third IMO Greenhouse Gas Study 2014 [verkkodokumentti]. [viitattu: 18.9.2019]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>

MarineTraffic. 2019. Castillo de Catoira. [verkkosivu]. [viitattu: 11.12.2019]. Saatavissa: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:369034/mmsi:308659000/imo:9300362/vessel:CASTILLO_DE_CATOIRA/_:2fbe95a62b32d53a643aa8dbfe5fdfeb

Moldanová, Fridell, Popovicheva, Demirdjian, Tishkova, Faccinetto, and Focsa. 2009. Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine [verkkodokumentti]. [viitattu: 12.10.2019]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009001253>

Moldova, Fridell, Winnes, Holmin-Fridell, Boman, Jedynska, Tishkova et al. 2013. Physical and chemical characterisation of PM emissions from twoships operating in European Emission Control Areas [verkkodokumentti]. [viitattu: 18.10.2019]. Saatavissa: <https://www.atmos-meas-tech.net/6/3577/2013/amt-6-3577-2013.pdf>

Mollenhauer. 2010. Handbook of Diesel Engines [verkkodokumentti]. [viitattu: 6.10.2019]. Saatavissa: https://wilma.finna.fi/lut/PrimoRecord/pci.springer_s978-3-540-89083-6_48927

Pelkonen, Minna. 2019. Tutkimusinsinööri, LUT Yliopisto. Sähköpostiviesti 25.11.2019.

Petzold, Hasselbach, Lauer, Baumann, Franke, Gurk, Schlager & Weingartner. 2008. Experimental studies on particle emissions from cruising ship, their characteristic properties, transformation and atmospheric lifetime in the marine boundary layer. [verkkodokumentti]. [viitattu: 10.12.2019]. Saatavissa: <https://www.atmos-chem-phys.net/8/2387/2008/acp-8-2387-2008.pdf>

Petzold, Lauer, Fritsche, Hasselbach, Lichtenstern, Schlager & Fleischer. 2011. Operation of Marine Diesel Engines on Biogenic Fuels: Modification of Emissions and Resulting Climate Effects [verkkodokumentti]. [viitattu: 23.10.2019]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1021/es2021439>

Rajak, Nashine, & Nath Verma. 2020. Numerical study on emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-spirulina microalgae-ethanol blends at various operating conditions [verkkodokumentti]. [viitattu: 15.11.2019]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0016236119318733>

Ratha, & Samantara. 2018. Supercapacitor: Instrumentation, Measurement and Performance Evaluation Techniques [verkkodokumentti]. [viitattu: 15.11.2019]. Saatavissa: <https://wilma.finna.fi/lut/Record/wilma.170966>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2019. Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa [verkkodokumentti]. [viitattu 2.3.2020]. Saatavissa: https://tem.fi/artikkeli/-/asset_publisher/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa

Unctad. 2018. Review of marine transport 2018. [verkkodokumentti]. [viitattu: 28.9.2019]. Saatavissa: https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf

Vermeire. 2012. Everything you need to know about marine fuels [verkkodokumentti]. [viitattu: 8.10.2019]. Saatavissa:

https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/Brochures/Chevron_EverythingYouNeedToKnowAboutFuels_v3_1a_DESKTOP.pdf

Won-Ju, Han, Jae-Hyuk, Gasidit, Young-Chan, Beom-Seok, & Jun. 2018. Recycling Waste Soot from Merchant Ships to Produce Anode Materials for Rechargeable Lithium-Ion Batteries. [verkkodokumentti]. [viitattu: 18.11.2019]. Saatavissa: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-23945-8#citeas>

Wärtsilä. 2019. Diesel Engine. [verkkosivu]. [viitattu: 11.12.2019]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/diesel-engine>

Zhang, Chen, Cui, Feng, Yang, Chen, Zhang et al. 2019. Emission factors and environmental implication of organic pollutants in PM emitted from various vessels in China [verkkodokumentti]. [viitattu: 18.10.2019]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S135223101830863X>

Zhao, Liu, Wan, Ye, Wu. 2018. Soluble Graphene Nanosheets from Recycled Graphite of Spent Lithium Ion Batteries. [verkkodokumentti]. [viitattu: 18.10.2019]. Saatavissa: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007/s11665-018-3156-6.pdf>

Zhou, Zhou, & Zhu. 2019. Chemical composition and size distribution of particulate matters from marine diesel engines with different fuel oils [verkkodokumentti]. [viitattu: 12.10.2019]. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118314509>


Pakokaasun ominaisuudet eri polttoaineilla ja moottorikuormilla (Petzold et al. 2011, 10396.)

	CO ₂ , kg	NO _x , g	SO _x , g	CO, g	HC, g	CH ₂ O, g	PM _{dry} , mg	SO ₄ , mg	OM, mg	EC, mg	Ash, mg
HFO											
100%	0.675	14.12	9.13	0.20	0.072	0.013	776	613	104	21	38
75%	0.679	15.33	9.17	0.19	0.083	0.007	756	581	129	13	33
25%	0.898	17.45	11.67	0.70	0.095	0.008	423	236	128	15	44
10%	1.69	26.09	23.3	2.37	0.29	0.026	1009	447	375	94	93
MGO											
100%	0.632	12.81	<0.40	0.17	0.170	N/A	89	9	70	8	2
75%	0.639	14.65	<0.40	0.17	0.300	N/A	72	5	58	7	2
25%	0.856	17.3	<0.54	0.64	0.660	N/A	87	4	68	12	3
10%	1.552	23.39	<0.97	2.67	2.030	N/A	301	8	226	62	5
PO											
100%	0.651	12.95	0.003	0.19	0.047	0.019	121	2	106	10	3
75%	0.652	14.38	0.003	0.15	0.037	0.011	191	2	178	8	3
25%	0.864	18.68	0.004	0.45	0.090	0.018	216	3	195	14	4
10%	1.563	25.7	0.008	1.57	0.340	0.050	794	4	716	65	9

Case – tarkastelun laskenta

Matka-aika [h]		Hiukkasmassan tiheys [kg/m ³]
233		1230
Moottorin teho [kW]		Moottorin tuottama energia [kWh]
8450		1968850
PM [g/kWh] 75 % moottorikuormalla		PM koko matkalta [kg]
HFO (2,17 S %)	0,76	1488,45
HFO (0,5 S %)	0,45	885,98
Erotusaste	kerätty PM koko matkalta	
0,40	595,38	354,39
0,50	744,23	442,99
0,60	893,07	531,59
0,70	1041,92	620,19
0,80	1190,76	708,79
0,90	1339,61	797,38
1,00	1488,45	885,98
Erotusaste	Hiukkasmassan tilavuus [m ³]	
0,40	0,484	0,288
0,50	0,605	0,360
0,60	0,726	0,432
0,70	0,847	0,504
0,80	0,968	0,576
0,90	1,089	0,648
1,00	1,210	0,720

Mittauspöytäkirja: Polttoaineen kalorimetrisen lämpöarvon määrittäminen näytteelle LFO

	MITTAUSPÖYTÄKIRJA: POLTTOAINEEN KALORIMETRISEN LÄMPÖARVON MÄÄRITYS	
Polttoaine (hake, pelletti...)	LFO	LFO
Koesarja	Sarja 1	Sarja 2
Näytteen massa [g]	1,0475	1,0480
Näytteen analysikosteus [%]	6,94	
Mitattu lämpöarvo [MJ/kg]	12,8398	13,1099
Kosteus saapumistilassa [%]		


$$K_{av} = 12,97485$$

Ryhmän jäsenet	
Mittauspäivämäärä	30.10.2019
Laitteet/Huomioita	Tuhtassa palamattomuus 48 %

$$Q_{gr,d} = \text{Kalorimetrisen lämpöarvo} \quad \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$= 12,97485 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{100}{(100 - 6,94)} = \underline{\underline{13,942 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}}$$

Mittauspöytäkirja: Polttoaineen kalorimetrisen lämpöarvon määrittäminen näytteelle HFO

		MITTAUSPÖYTÄKIRJA: POLTTOAINEEN KALORIMETRISEN LÄMPÖARVON MÄÄRITYS	
Polttoaine (hake, pelletti...)	HFO	HFO	
Koesarja	Sarja 1	Sarja 2	
Näytteen massa [g]	0,4949	0,5005	
Näytteen analyysikosteus [%]	10,11		
Mitattu lämpöarvo [MJ/kg]	18,9621	18,6103	KA 18,7862
Kosteus saapumistilassa [%]			
Ryhmän jäsenet			
Mittauspäivämäärä	30.10.2019		
Laitteet/Huomioita	Tuhkassa palamattomuus 20%		

$$Q_{gr,d} = \text{Kalorimetrisen lämpöarvo} \quad \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$= 18,7862 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{100}{(100 - 10,11)} = \underline{\underline{20,899}} \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$