



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SUURET 2-TAHTI DIESELMOOTTORIT MERILIIKENTEESSÄ

Elias Tuomaala

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Helmikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Suuret 2-tahti dieselmoottorit meriliikenteessä

Elias Tuomaala

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022 31 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Miro-Tommi Tuutijärvi

Työssä perehdytään suurten kaksitahtidieselmoottoreiden käyttöön meriliikenteessä nykypäivänä. Työssä tutustutaan erityisesti kaksitahtimoottorin toimintaperiaatteeseen ja meriliikenteessä käytettävien suurten hidaskäyntisten kaksitahtidieselmoottoreiden ominaisuuksiin ja niissä käytettäviin polttoaineisiin. Lisäksi pohditaan laivaliikenteen hyötyjä, haittoja ja tulevaisuutta. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena.

Asiasanat: Kaksitahti, Raskas polttoöljy, Meriliikenne

ABSTRACT

Large 2-stroke diesel engines in maritime transport

Elias Tuomaala

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelors's thesis 2022, 31 pp.

Supervisor at the university: Miro-Tommi Tuutijärvi.

The thesis focuses on the use of large two-stroke diesel engines in maritime transport today. The thesis introduces the principle of operation of a two-stroke engine and the characteristics of large low-speed two-stroke diesel engines used in maritime transport and the fuels used. In addition, the advantages and disadvantages of shipping in general are considered. The work was carried out as literature research.

Keywords: 2-stroke, Heavy fuel oil, Maritime transport

ALKUSANAT

Olen ollut kiinnostunut suurista kaksitahtidieselmootoreista siitä asti kun aloitin opinnot yliopistossa. Kuulin aiheesta ensimmäistä kertaa Wärtsilällä työskentelevien ystävieni kautta ja sitä myötä kiinnostus tällaisia raskaita moottoreita kohden on sitten vain syventynyt.

Nykyaikana laivaliikenne on usein esillä kun puhutaan ilmastonmuutoksesta ja sen hillitsemisestä. Työtä tehdessä on ollut mielenkiintoista perehtyä tarkemmin kaksitahtimoottoritekniikan nykyaikaisiin saavutuksiin ja laivaliikenteen ilmastovaikutuksiin.

Työn ohjaajana yliopistolla toimi Miro-Tommi Tuutijärvi. Häntä haluan kiittää kannustuksesta ja hyvästä ohjeistuksesta.

Oulu, 21.2.2022



Elias Tuomaala

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	7
2 Kaksitahtimoottori	8
2.1 Kaksitahtimoottorin historia.....	8
2.2 Kaksitahtiottomoottorin toiminta.....	9
2.3 Kaksitahtidieselmoottorin toiminta.....	10
2.4 Bensiini- ja dieselmoottoareiden vertailu	12
2.5 Kaksitahtimoottorin käyttö nykypäivänä	12
3 Kaksitahtidieselmoottori laivoissa	13
3.1 Rakenne.....	13
3.2 Koko.....	14
3.3 Operointi	14
3.4 Täriinä	15
3.5 Huoltovapaus.....	15
3.6 Polttoaine.....	16
3.7 Kaksitahtidieselin käyttö.....	16
4 Raskas polttoöljy	17
4.1 Ominaisuudet	17
4.2 Valmistus.....	17
4.3 Käyttö.....	18
4.4 Riskit	19
4.5 Nykypäivä	20
5 Muita polttoaineratkaisuja.....	21
5.1 MGO	21
5.2 LPG	21
5.3 Dual-fuel moottorit.....	22
5.4 LPG jälkiasennus	22
6 Laivaliikenteen hyödyt ja haitat	23
6.1 Hyödyt.....	24
6.2 Haitat	25
6.3 Vertailun yhteenvedo	26
7 Yhteenvedo	27
LÄHDELUETTELO.....	28

Kuva 1: Braytonin keinuvipumoottorin patenttipiirros (oldmachinepress.com)

Kuva 4: Wärtsilä Sulzer RTA96-C moottorin poikkileikkaus (emma-maerks.com)

Kuva 7: Twenty-foot equivalent unit (seapro.org)

MERKINNÄT JA LYHENTEET

AKK	Alakuolokohta
HFO	Raskas polttoöljy (Heavy Fuel Oil)
LPG	Nestekaasu (Liquefied Petroleum Gas)
MGO	Vähärikkinen laivapolttoneite (Marine GasOil)
YKK	Yläkuolokohta
2T	Kaksitahti
4T	Nelitahti

1 JOHDANTO

Työn aiheena on tarkastella suurten kaksitahtidieselmootoreiden käyttöä meriliikenteessä. Työssä perehdytään kaksitahtimootorin historiaan ja toimintaan yleisellä tasolla sekä sen käyttöön nykypäivänä. Lisäksi työssä tutustutaan erilaisiin nykyaikaisiin laivoissa käytettäviin dieselmootoreihin ja niiden ominaisuuksiin sekä erityisesti kaksitahtidieselmootorin käyttövoimaan ja päästöihin. Työssä tutustutaan myös niin raskaan polttoöljyn käyttöön ja ominaisuuksiin, kuin muihin käytettäviin polttoaineisiin ja moottoriratkaisuihin.

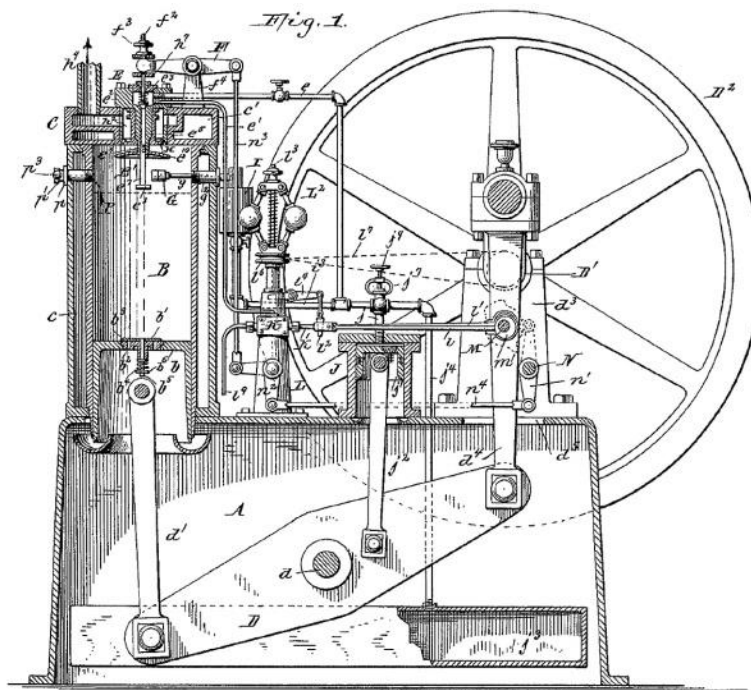
Kaksitahtidieselmootorin toimintaan tutustutaan niin kirjallisuuden, kuin valmistajan julkaisujen pohjalta. Työssä myös selvitetään millaisia päästöjä ja ympäristöhaittoja kaksitahtidieselmootori aiheuttaa, mistä ne johtuvat ja miten niihin voi vaikuttaa. Työssä pohditaan myös meriliikenteen hyötyjä ja haittoja sekä kaksitahtidieselmootorin nykytilaa ja tulevaisuuden näkymiä.

2 KAKSITAHTIMOOTTORI

Kaksitahtimoottori on mäntämoottoreihin kuuluva polttomoottori. Polttomoottorit kuuluvat lämpövoimakoneisiin, joiden toimintaperiaate on muuttaa polttoaineisiin kemiallisesti sidottu energia lämmöksi palamisprosessissa. Tällöin vapautuu lämpöä, josta puolestaan kehitetään paine-energiaa. Lopulta paine-energia muutetaan mekaaniseksi työksi (Juurikkala et al. 1981, p. 9). Tässä kappaleessa käsitellään kaksitahtimoottorin historiaa ja toimintaperiaatteita yleisellä tasolla.

2.1 Kaksitahtimoottorin historia

Ensimmäisen menestyksekkään kaksitahtisen polttomoottorin kehitti yhdysvaltalainen George Bailey Brayton vuonna 1872. Hänen moottorissaan käytettiin nestemäistä polttoainetta, joka sumutettiin ja ruiskutettiin hyödyntäen paineilmaa. Moottorissa oli kaksi sylinteriä: työ- ja apusylinteri. Ilma puristettiin apusylinterissä, jonka kampiakseli oli liitetty keiuvivulla työsylinterin kampiakseliin (kuva 1). Sylinterit liikkuivat vastakkaisiin suuntiin. Moottorissa ei ollut sytytystulppaa, vaan sytytys tapahtui liekkisytytysjärjestelmän avulla (Juurikkala et al. 1981, p. 30).



Kuva 1: Braytonin keiuvivumoottorin patenttipiirros (oldmachinepress.com)

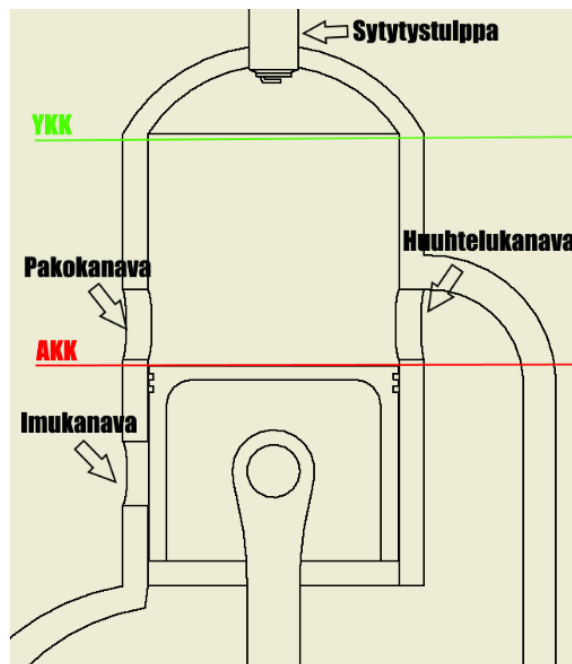
Moottorin ongelmana oli sen nelitahtisiin kilpailijoihinsa verrattuna huonompi hyötysuhde. Tämän takia useimmat niistä päätyivät käytettäviksi paikallismoottoreina. George Bailey Braytonin lisäksi muita tuon ajan kaksitahtimoottorin kehittäjiä ovat skotti-insinööri Dugald Clerk, joka patentoi keksintönsä vuonna 1881 ja britti-insinööri Joseph Day, joka patentoi oman kaksitahtimoottorinsa vuonna 1891. Ensimmäisen todella käytännöllisen kaksitahtimoottorin kehitti kuitenkin Alfred Angas Scott vuonna 1908.

2.2 Kaksitahtiottomoottorin toiminta

Perinteinen kaksitahtimoottori on ottomoottori. Tämä tarkoittaa sitä, että siinä käytetään joko kaasutinta tai polttoaineen ruiskutusta seoksen muodostamiseen. Seoksen sytytys toteutetaan ulkoisen kipinän avulla. Kaksitahtimoottorissa kaasunvaihto suoritetaan nimensä mukaisesti kahden tahdin aikana. Kaksitahtimoottorissa on kaksi tahtia: puristus- imu ja työ-huuhtelu. Kaksitahtimoottorissa männän ylä- ja alahelmat ohjaavat kaasujen virtausta sen liikkeessä ylös alas sylinterissä ja kampikammio toimii huuhtelupumppuna (Rantala 2002, p. 20). Moottorin toiminta tapahtuu seuraavasti:

1. Mäntä lähtee liikkeelle AKK:sta (alakuolokohta). Tällöin männän yläosa sulkee pako- ja huuhtelukanavat ja kampikammioon alkaa männän liikkeessä muodostua alipaine.
2. Männän alahelma avaa imukanavan ja kampikammioon virtaa tuoretta sumuuntunutta polttoaine-ilma-seosta.
3. Mäntä saavuttaa YKK:n (yläkuolokohta) jolloin sylinterissä oleva puristettu polttoaine-ilma-seos sytytetään ulkoisen kipinän avulla. Tästä seuraa nopea paineen ja lämpötilan nousu, joka pakottaa männän liikkumaan alaspäin
4. Männän alahelma sulkee imukanavan ja paine kampikammiossa alkaa kohota männän liikkeessä alaspäin. Lopulta mäntä saavuttaa AKK:n ja sen yläreuna avaa pakokanavan sekä huuhtelukanavan. Tällöin palanut seos virtaa ulos sylinteristä pakokanavan kautta ja tuore seos virtaa kampikammioista huuhtelukanavaa pitkin sylinteriin.

Koska kaksitahtimoottorin kaasunvaihto tapahtuu kampikammioon kehitetyn paineen avulla, päätyy myös tuoretta seosta käytännössä aina pakokanavaan. Tästä johtuen perinteisen kaasutinkäyttöisen kaksitahtimoottorin päästöt ovat aina korkeammat kuin vastaavan nelitahtimoottorin. Lisäksi kaksitahtimoottorissa polttoaineen sekaan tulee aina sekoittaa öljyä, jotta kampiakselin ja sylinterin voitelu saadaan toteutettua. Seos on moottorin koosta ja iästä sekä käytetystä voiteluöljystä riippuen 2–3 %. Kaksitahtisen ottomoottorin, eli 2T ottomoottorin sylinterin tärkeimmät osat on kuvattu kuvassa 2.



Kuva 2: Bensiinikäyttöinen 2T moottori

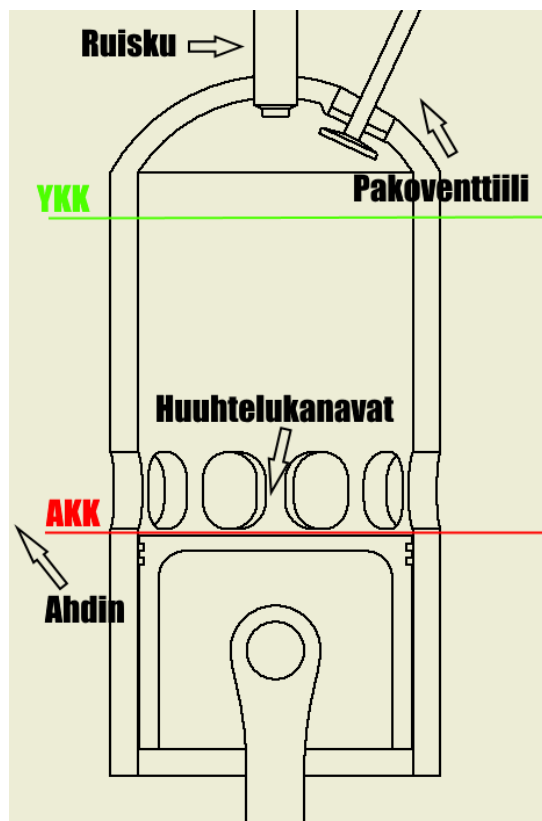
2.3 Kaksitahtidieselmoottorin toiminta

Kaksitahtiperiaatteella toimivalla dieselmoottorilla on yllä esitettyyn perinteiseen bensiinikäyttöiseen kaksitahtimoottoriin verrattuna merkittäviä eroavaisuuksia. Yhteistä niillä on mäntäohjattu huuhtelu. Kaksitahtidieselissä polttoaineen tuominen sylinteriin tapahtuu aina ruiskutuksen avulla ja huuhtelu toteutetaan ahtimen avulla (Rantala 2002, p. 25). Kaksitahtidieselmoottorin toiminta tapahtuu seuraavasti:

1. Männän ollessa AKK:ssa ahtimen paineistama ilma virtaa huuhtelukanavasta sylinteriin pakottaen palaneen seoksen poistumaan pakoventtiilin kautta.
2. Mäntä lähtee liikkumaan ylöspäin, jolloin se sulkee huuhteluaukot. Myös pakoventtiili sulkeutuu. Tällöin paine sylinterissä alkaa nousta.

3. Juuri kun mäntä on saavuttamassa YKK:n aloitetaan polttoaineen ruiskutus. Korkea paine ja lämpö sytyttävät ilma-polttoaineseoksen, jolloin paine ja lämpötila nousevat nopeasti. Tämä pakottaa männän liikkumaan alaspäin.
4. Männän saavuttaessa AKK:n pakoventtiili aukeaa ja männän yläreuna avaa huuhtelukanaavat ja prosessi alkaa alusta.

Merkittävänä rakenteellisena erona perinteisen bensiinikäyttöisen ja dieselikäyttöisen kaksitahtimoottorin välillä on dieselmoottorissa pienempi kanavien lukumäärä, pakoventtiili ja ahdin. Myös perinteisen bensiinikäyttöisen kaksitahtimoottorin ahtaminen on mahdollista, mutta se ei ole sen toiminnan kannalta välttämätöntä. Ahtaminen antaa dieselikäyttöiselle moottorille merkittävät edut: Tuoretta polttoainetta ei koskaan päädy pakoputkeen, sillä huuhtelu toteutetaan korkeapaineisella puhtaalla ilmalla. Dieselikäyttöisessä kaksitahtimoottorissa ei myöskään tarvitse sekoittaa polttoaineen sekaan öljyä, sillä kampiakselia ei käytetä huuhtelupumppuna ja kampiakseli voi täten olla roiskevoideltu. Kaksitahtidieselmoottorin tärkeimmät osat on havainnollistettu kuvassa 3.



Kuva 3: Dieselkäyttöinen 2T moottori

2.4 Bensiini- ja dieselmootoreiden vertailu

Kuten yllä huomattiin, kaksitahtibensiini- ja dieselmootoreiden toimintaperiaatteet ovat hyvin samankaltaisia. Moottoreilla on kuitenkin sytytystavan lisäksi muita tärkeitä eroavaisuuksia, jotka määrittelevät hyvin pitkälti moottorin käyttömahdollisuuksia. Näistä tärkeimpänä mainittakoon dieselmootorin suuri puristussuhde, joka saattaa nousta moottorista riippuen lähes 21:1. Lisäksi dieselmootorin käyntinopeusaluetta rajoittaa polttoaineen ja ilman sekoittumisnopeus. Liian suurilla kierrosnopeuksilla polttoaine ei ehdi sekoittua ilmaan ja palaminen jää epätäydelliseksi. Tästä on usein merkinä musta savu. Moottorin käytön kannalta oleellinen ero on se, kuinka dieselmootorin tehoa säädetään. Siinä missä bensiinikäyttöisen ottomoottorin tehoa säädetään rajoittamalla imuilman virtausta ja täten sylinteriin päätyvän seoksen määrää, dieselmootorin tehoa säädetään polttoaineen määrällä. Dieselmootorit käyvät suurella ilmaylimäärällä. Dieselmoottori on käytännössä aina bensiinimoottoria painavampi (Huhtamaa 2007, p. 203).

2.5 Kaksitahtimoottorin käyttö nykypäivänä

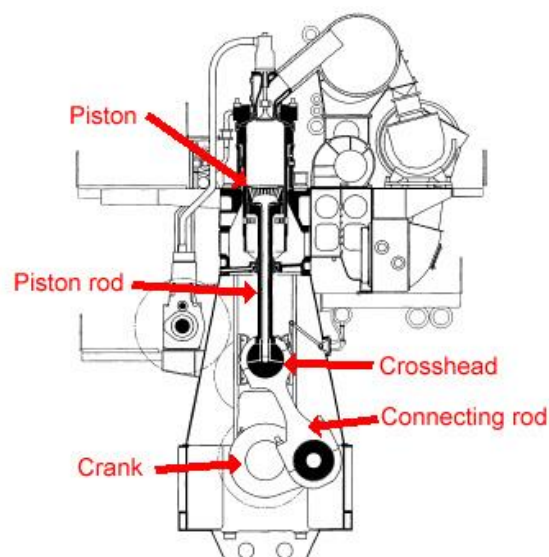
Nykypäivänä perinteisten bensiinikäyttöisten kaksitahtimoottoreiden käyttö rajoittuu pienkoneisiin kuten moottorisahoihin ja sähkövoimakoneisiin sekä keveisiin ajoneuvoihin kuten mopoihin, moottoripyöriin ja moottorikelkkoihin. Syynä tähän ovat mm. kaksitahtimoottorin yksinkertaisuus, keveys, hyvä teho-paino-suhde ja helppo huollettavuus. Kaksitahtiperiaatteella toimivia dieselmootoreita puolestaan käytetään laivojen päämoottoreina ja joissain tapauksissa mm. suurten sähkövoimakoneiden voimanlähteenä. Yhä kiristyvien päästörajoitusten ja jatkuvasti kehittyvän tekniikan takia perinteiset kaasuttimella toimivat kaksitahtimoottorit ovat auttamatta jäämässä historiaan ja nykyään lähes kaikki kevyet kaksitahtimoottorilla varustetut ajoneuvot on varustettu suoralla polttoaineen ruiskutuksella. Suuret 2T käyttöiset meridieselmootorit ovat nykypäivänä termiseltä hyötysuhteeltaan huippuluokkaa ja ovat kovassa suosiossa etenkin pitkiä matkoja merellä kulkevissa rahtialuksissa.

3 KAKSITAHTIDIESELMOOTTORI LAIVOISSA

Työssä käytetään esimerkkimoottorina maailmalla tunnettua Wärtsilän valmistamaa Sulzer RTA96-C kaksitahtidieselmoottoria. Moottori otettiin ensimmäistä kertaa käyttöön vuonna 2006, sen ollessa silloin maailman ensimmäinen 14-sylinterinen hidaskäyntinen kaksitahtidieselmoottori. Moottori tuottaa suurimman tehonsa 80080 kW ja vääntönsä 7600 kNm kierrosnopeudella 102 rpm. Sen omamassa on 2300 tonnia, pituus 27 m ja korkeus 13,5 m (Wärtsilä, 2006). Moottorin terminen hyötysuhde on parhaimmillaan 51,8 %. Seuraavaksi tarkastellaan suurten kaksitahtidieselmoottoreiden rakennetta sekä suosiota meriliikenteessä.

3.1 Rakenne

Vaikka aikaisemmin käsiteltiin kaksitahtidieselmoottorin rakennetta, on kuitenkin syytä perehtyä laivamoottorin rakenteellisiin poikkeuksiin. Suuresta koostaan johtuen monet suuret kaksitahtidieselmoottorit ovat ristikappalemootoreita (kuva 4). Tämä tarkoittaa sitä, että kiertokanki ei kiinnity suoraan mäntään, vaan männästä lähtee männänvarsi, johon kiertokanki kiinnittyy erityisen ristikappaleen avulla. Syynä tällaiseen ratkaisuun on moottoreiden suuri iskunpituus suhteessa poraukseen. Esimerkiksi Sulzerissa iskunpituus on hieman alle 2,5 m ja poraus 960 mm. Lisäksi ratkaisulla saadaan vähennettyä mäntään kohdistuvia sivuttaisvoimia, jotka aiheuttavat ennenaikaista kulumista.



Kuva 4: Wärtsilä Sulzer RTA96-C moottorin poikkileikkaus (emma-maerks.com)

3.2 Koko

Yksi merkittävimmistä syistä kaksitahtidieselmoottoireiden suosioon meriliikenteessä on niiden koko. Vaikka 27 m pitkä ja 13,5 m korkea moottori kuulostaa suurelta, se tuottaa kuitenkin samankokoisen nelitahtidieselmoottoriin verrattuna suuremman tehon. Tähän syynä on moottorin kaksitahtinen toimintaperiaate. Siinä missä nelitahtinen moottori, eli 4T moottori tarvitsee kaksi kampiakselin pyörähdystä yhden työkierron toteuttamiseen, 2T moottori tarvitsee vain yhden. Lisäksi 2T moottoreissa voidaan yleensä käyttää suurempaa sylinterin porauskokoa, jolloin tuotettu teho/työtahti on suurempi. Monissa suurissa 2T dieselmoottoireissa isku-poraus-suhde on välillä 3.0–4.2 (Mollenhauer et al. 2011, p. 595).

3.3 Operointi

Kaksitahtidieselmoottorin tyypillinen operointikierronnopeus on noin 100 rpm. Koska 2T moottori tuottaa huipputehonsa hyvin kapealla kierrosalueella, ei sen kierrosnopeutta tarvitse juurikaan muuttaa. Tämä mahdollistaa moottorin kytkemisen suoraan potkuriakseliin, jolloin ei tarvita ollenkaan alennusvaihdetta. Ratkaisu vähentää painoa ja helpottaa huoltamista. Suurten 4T dieselmoottoireiden tyypillinen operointikierronnopeus on välillä 300–1200 rpm. Siitä johtuen moottoria ei voida kytkeä suoraan potkuriakseliin, vaan on käytettävä apuna alennusvaihdetta, joka tuo lisää painoa ja vaatii luonnollisesti enemmän huoltoa. Monessa suuressa aluksessa 4T moottoreita käytetään kuitenkin 2T moottoreiden rinnalla käsittelymoottoreina esim. satamissa ja muissa ahtaissa paikoissa, joissa 2T moottorin käyttäminen olisi yksinkertaisesti liian hankalaa (Mollenhauer et al. 2011). Näissä tilanteissa 4T moottorin laaja kierrosalue pääsee oikeuksiinsa. Nykypäivänä myös sähkökäyttöisten apumoottoreiden käyttö on lisääntynyt. Sähkömoottoreita voidaan käyttää esimerkiksi kölipotkureissa, joilla saadaan ohjattua laivaa sivuttaissuunnassa.

3.4 Tärinä

Kaksitahtimoottorissa on luonnollisesti nelitahtimoottoria vähemmän liikkuvia osia. Liikkuvien osien pienempi määrä yhdistettynä alhaisempaan kierroslukuun tarkoittaa tasaisempaa käyntiä. Tärinän vähentämiseen on myös kehitetty monia erilaisia vaimentimia. Yhtenä tärkeimmistä värinänvaimennuskeinoista on moottorin sijoituksen tarkka suunnittelu.

Tavoitteena on sijoittaa moottori siten, että se ei vahvista laivan rungon luonnollisia värähdystaajuuksia. Moottorin sijoituksen lisäksi värinää voidaan vaimentaa mm. vastapainojen ja sähköisten epätasapainottajien avulla. Näissä tavoitteena on estää värinöiden syntyminen pienentämällä moottorille ja potkurille luonnollisten värähtelyiden suuruutta (Mollenhauer et al. 2011). Näin saadaan vähennettyä osien kulumista ja lisättyä miehistön mukavuutta. Luonnollisesti tasaisempi käynti tarkoittaa myös pienempää melua.

3.5 Huoltovapaus

Koska 2T moottorissa on vähemmän liikkuvia osia ja pienempi operointikierronnopeus on se myös huoltovapaampi kuin nelitahtimoottori. Vaikka 2T moottori on usein kalliimpi hankinta, pitkällä tähtäimellä katsottuna alhaisemmat huoltokustannukset tekevät siitä hyvän valinnan liiketoimintaa harjoittaviin aluksiin. Vaikka raskaan polttoöljyn laatu on öljynjalostusprosessin tehostuessa huonontunut viimeisten vuosikymmenten aikana, on kaksitahtidieselmoottoreiden luotettavuus kuitenkin parantunut nykyaikaisten materiaalien ja suunnitteluratkaisujen ansiosta. Nykyaikaisen kaksitahtidieselmoottorin huoltoväli on jopa 18000 käyttötuntia, joka vastaa monessa aluksessa niiden perinteistä huoltoväliä, jolloin laiva käytetään telakalla huollettavana (Mollenhauer et al. 2011). Lisäksi nykytekniikka tarjoaa jo käytössä oleville kaksitahtidieselmoottoreille erilaisia päivitysmahdollisuuksia, jotka voidaan toteuttaa huollon yhteydessä.

3.6 Polttoaine

Yhtenä tärkeimmistä seikoista kaksitahtidieselmoottorin suosioon ovat laajat polttoainemahdollisuudet. Suurissa kaksitahtidieseleissä voidaan polttaa raskasta polttoöljyä eli HFO:ta (Heavy Fuel Oil). Raskas polttoöljy on valmistuskustannuksiltaan edullisempaa kuin jalostetummat tuotteet kuten vähärikkinen laivapolttoneste (MGO). Raskaasta polttoöljystä käytetään myös nimeä bunkkeriöljy. HFO soveltuu hyvin käytettäväksi suurissa kaksitahtidieselmoottoreissa niiden hitaan käynnin vuoksi. Joissain aluksissa HFO:ta voidaan käyttää myös 4T moottoreiden polttoaineena. Raskasta polttoöljyä käsitellään tarkemmin kappaleessa 4. Perinteisten nestemäisten polttoaineiden lisäksi moottoreissa voidaan käyttää myös nestekaasua ja nykyään jopa maakaasua.

3.7 Kaksitahtidieselin käyttö

Kuten yllä on mainittu, kaksitahtidieselmoottoreita käytetään laivoissa usein päämoottoreina ja niiden rinnalla käytetään usein apumoottoreina pienempiä nelitahtidieselmoottoreita. Koska suurissa kaksitahtidieselmoottoreissa käytetään pääsääntöisesti samoja toimintaperiaatteita, voidaan alusta suunniteltaessa valita eri valmistajien tarjonnasta kyseiseen alukseen sopiva moottori. Moottorin valinta tapahtuu esim. valitsemalla optimaalinen potkurikoko aluksesta ja sen suunnitellusta nopeudesta riippuen, tutkimalla mahdollisesti haitallisia värinöitä ja optimoimalla sähköntuotto. Esimerkiksi konttialuksissa käytetään usein suhteellisen nopeakäyntisiä, pitkäiskuisia 2T moottoreita, joiden isku-poraus-suhde on 3,2–4,0 (marinegyaan.com, 2017). Sulzer RTA96-C on esimerkki tällaisesta moottorista. Hitaammassa tankkereissa puolestaan käytetään suhteellisen hidaskäyntisiä, erittäin pitkäiskuisia (super-long stroke) 2T moottoreita, joiden isku-poraus-suhde on 4,0–4,7 (Mollenhauer et al. 2011).

4 RASKAS POLTTOÖLJY

Kuten aikaisemmin mainittu yksi tärkeimmistä kaksitahtidieselmoottorin ominaisuuksista on sen kyky polttaa raskasta polttoöljyä. Raskaat polttoöljyt ovat pääasiassa tislatusa raakaöljystä jäänyttä tislajätettä. Niiden suuren viskositeetin vuoksi niitä ei usein voida käyttää esimerkiksi autojen moottoreissa. Seuraavaksi tutustutaan raskaan polttoöljyn ominaisuuksiin sekä valmistukseen ja käyttöön laivamoottoreissa.

4.1 Ominaisuudet

Polttoaineiden yleinen vaatimus on, että niiden tehollisen lämpöarvon tulee olla mahdollisimman korkea (Juurikkala et al. 1981, p. 364). Dieselöljyjen tapauksessa lämpöarvot eivät poikkea eri tuotteiden välillä kovinkaan paljon toisistaan. Raskaiden polttoöljyjen tehollinen lämpöarvo on noin 40 MJ/kg, kun taas kevyemmällä tuotteella se on noin 43 MJ/kg. Raskaalle polttoöljylle (HFO) on ominaista sen suuri viskositeetti kylmänä. HFO onkin huoneenlämpötilassa erittäin paksua, lähes hunajamaista mustanruskeaa nestettä. Se saavuttaa pumpattavuuden vasta noin 20 °C lämpötilassa. Pumpattavuudelle määritelty viskositeetti on 1000 cSt (tai mm²/s). Ruiskutettavuuden HFO saavuttaa vasta 90–100 °C lämpötilassa, sen viskositeetin ollessa tällöin noin 30 cSt (Stokes). Viskositeetti on ilmoitettu HFO:n kinemaattisena viskositeettina, joka mittaa tietyn nestemäärän virtaamista tietynlaisen kapillaariputken läpi paineen alaisena tietyssä lämpötilassa (Juurikkala et al. 1981). Jotta HFO:ta pystytään käyttämään polttoaineena, tulee se siis esilämmittää ennen ruiskutusta ja olosuhteista riippuen jopa ennen pumppausta. Juuri tämän takia se ei sovellu poltettavaksi autonmoottoreissa.

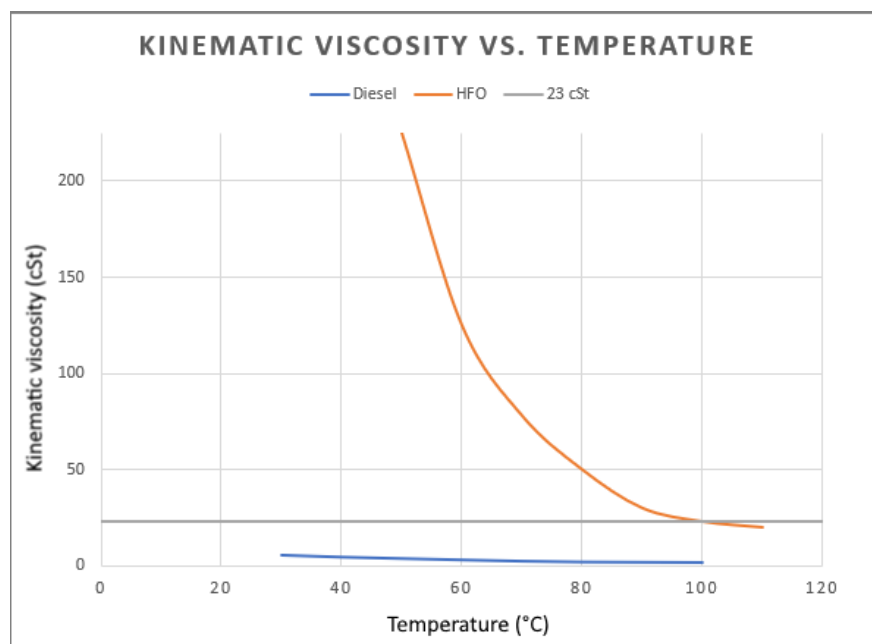
4.2 Valmistus

Raakaöljyn tärkeimpänä jalostuskeinona on tislauk. Tislauksessa raakaöljyn nestemäiset komponentit höyrystyvät ja ne voidaan erottaa öljystä. Tislauk siis perustuu eri komponenttien kiehumispisteiden eroihin. Koska tuotteiden kiehumispisteet ilmakehän paineessa saattavat olla hyvinkin korkeat, tapahtuu öljynjalostus nykyään kahdessa vaiheessa: atmosfäärisessä- ja tyhjiötislauksessa.

Atmosfäärin tislauksen tislajäte tislataan uudestaan tyhjiötislauksessa, jossa raskaimpien yhdisteiden kiehumispisteitä saadaan alennettua alipaineen avulla (Juurikkala et al. 1981, p. 363). Tyhjiötislauksesta saaduille tuotteille kuten polttoöljylle ja raskaalle jäännösöljylle suoritetaan vielä krakkaus, jonka avulla muutetaan raskaita hiilivetyjä kevyemmiksi ja hyödyllisemmiksi yhdisteiksi (Wikipedia, 2018). Lopulta krakkauksen tuloksena on muiden tuotteiden ohella raskasta polttoöljyä. Saatuja tuotteita voidaan vielä jatkojalostaa, jotta niille saadaan halutut ominaisuudet. Tuotteiden jatkojalostuksessa niiden litrahinta luonnollisesti kasvaa. Koska HFO on käytännössä tislajätettä, on sen hinta myös alhainen verrattuna jalostetumpiin tuotteisiin. Esimerkiksi Rotterdamin satamassa sen hinta on 400 €/tonni siinä missä MGO:n hinta 630 €/tonni (pbt-international.com, 13.1.2022).

4.3 Käyttö

Raskaan polttoöljyn käytöstä polttoaineena erityisen hankalaa tekee sen suuri viskositeetti alhaisissa lämpötiloissa. Sen ominaisuuksiin kuitenkin kuuluu viskositeetin nopea lasku lämpötilan kasvaessa. Muihin polttoaineisiin verrattuna HFO:n pumppaus- ja ruiskutuslämpötila on korkeampi (kuva 5). Kuvassa vertailuna perinteinen autoissa käytetty dieselöljy.



Kuva 5: Lämpötilan vaikutus kinemaattiseen viskositeettiin eri polttoaineilla

Polttoaineen ruiskutukseen vaikuttaa myös kinemaattisen viskositeetin lisäksi dynaaminen viskositeetti, joka kuvaa nesteen kykyä vastustaa virtausta (Wikipedia, 2020). Nämä viskositeetit voidaan yhdistää toisiinsa seuraavalla kaavalla:

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$, jossa ν = kinemaattinen viskositeetti, μ = dynaaminen viskositeetti ja ρ = nesteen tiheys.

Kaavaa tarkastelemalla voidaan huomata dynaamisen viskositeetin käyttäytyvän kinemaattisen viskositeetin kaltaisesti lämpötilan noustessa. Dynaaminen viskositeetti on ruiskutuksen kannalta paras, kun polttoaine on lämmitetty 120 °C lämpötilaan, jolloin se saa arvon 14 cP (Poisi) (Park et al. 2015). Koska polttoaineen pitää olla lämmitetty suhteellisen korkeisiin lämpötiloihin (vrt. henkilöauton moottorin käyntilämpötila noin 90 °C), tarvitaan laivaan erilliset lämmitys ja suodatusjärjestelmät, jotta HFO:n käyttäminen on mahdollista. Järjestelmissä on useita erilaisia suodatusmekanismeja ennen polttoaineen lämmittämistä käyttölämpötilaan.

4.4 Riskit

Raskaan polttoöljyn poltosta aiheutuvat riskit ovat niin terveystorisejä kuin ympäristörisejä. Terveystoriseet aiheutuvat pienhiukkaspäästöistä, jotka ovat verrattavissa autoissa käytettävien dieselmootoreiden päästöihin. HFO:ta poltettaessa pienhiukkaspäästöt voivat olla jopa neljä kertaa suuremmat kuin jalostetummilla tuotteilla. Toisaalta tuotettujen hiukkasten keskiverto koko on suurempi etenkin pienillä kuormituksilla. Kaksitahtidieselmootorin tuottamat hiukkaset HFO:ta käytettäessä sijoittavat kokohaarukkaan 10 nm – 1800 nm (Zhou et al. 2019). Ihmiselle haitallisia pienhiukkasia ovat alle 2,5 µm kokoiset hiukkaset, jotka pääsevät pienen kokonsa vuoksi keuhkorakkuloihin asti. Alle 10 µm hiukkaset pääsevät myös keuhkoihin, mutta eivät keuhkorakkuloihin (Wikipedia, 2020). Tuotetut hiukkaset ovat siis jopa satoja kertoja pienempiä kuin terveydelle haittaa aiheuttavat hiukkaset, joten ne pääsevät helposti keuhkorakkuloihin. Autoliikenteen tavoin, näiden hiukkasten poistamiseen pakokaasusta on käytössä useita erilaisia ratkaisuja, kuten pakokaasun takaisinkierrätys (EGR), hiukkassuodatin (DPF) ja SCR-katalysaattori (Park et al. 2015).

Ympäristöriskit aiheutuvat päästöjen lisäksi esimerkiksi mahdollisista polttoainevuodoista. HFO on jähmeän koostumuksensa vuoksi hankalaa siivota pois merestä ja se tarttuu helposti esimerkiksi eläinten turkkiin ja höyheniin. Esimerkiksi Sulzer RTA96-C kuluttaa polttoainetta noin 6300–14000 l/h riippuen laivan nopeudesta. Tämä tarkoittaa aluksesta riippuen useiden miljoonien litrojen polttoainesäiliötä. Polttoainevuodon sattuessa vaikutukset näkyvät laajalla alueella mm. merivirtojen sekä tuulten takia ja niiden siivoaminen on kallista.

4.5 Nykypäivä

Nykypäivänä jatkuvasti kiristyvät päästörajoitukset ovat alkaneet vaikuttaa tiukemmin myös raskaan polttoöljyn laatuvaatimukseen. Tutkimusten mukaan raskaan polttoöljyn ympäristölle ja terveydelle haitallisin osa ovat sen sulfuripäästöt. Vuonna 2020 International Maritime Organisation (IMO) antoi uuden määräyksen, jonka mukaan laivoissa käytetyn HFO:n sulfuripitoisuus ei saa ylittää 0,5 %. Aikaisemmin tämä raja on ollut 3,5 %. Kiristys säännöksessä on siis merkittävä. Päästörajoitetuilla alueilla (ECA:s) suurin sulfuripitoisuus säilyi ennallaan 0,1 % (wagenborg.com, 2021). Käytännössä vastuu muutoksen toteuttamisesta jää laivayhtiöille. Ratkaisuvaihtoehtoja onkin useampia, kuten parempilaatuisten polttoaineiden käyttäminen, suodatusjärjestelmien asentaminen ja joissain tapauksissa jopa vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttäminen. Muita HFO:n käyttöön liittyviä rajoituksia on yritys kieltää sen käyttö arktisilla vesillä. Tämän perusteena on esimerkiksi HFO:n polttamisesta jäävän noen laskeutuminen jääpinnoille ja täten heikentävän sen heijastuskykyä, joka johtaa jään sulamiseen. Lisäksi polttoainevuoto arktisissa kylmissä vesissä tarkoittaisi jopa usean vuoden haittavaikutuksia paikalliselle ekosysteemille (hfofreearctic.org, 2021).

5 MUITA POLTTOAINERATKAISUJA

Raskaan polttoöljyn ollessa yhä tärkein voimanlähde kaksitahtidieselmootoreissa tänä päivänä, on sen rinnalle noussut myös muita polttoaineratkaisuja, joita voidaan soveltaa 2T periaatteella toimivissa moottoreissa. Näistä tärkeimpänä ovat vähärikkinen laivapoltoneste (MGO) ja nestekaasu (LPG), joita voidaan nykyään hyödyntää niin uusissa dual-fuel moottoreissa raskaan polttoöljyn kanssa, kuin jälkiasenteisissa (retrofit) järjestelmissä. Seuraavaksi perehdytään tarkemmin MGO:n ja LPG:n ominaisuuksiin sekä dual-fuel moottoreihin.

5.1 MGO

MGO:n etuna raskaaseen polttoöljyyn on sen sopiva viskositeetti käyttölämpötilassa. Tämä tarkoittaa, että sitä ei tarvitse esilämmittää ennen sen polttamista moottorissa. MGO on vain hieman dieseliä paksumpaa. Raskaaseen polttoöljyyn verrattuna MGO:n pienhiukkas- ja nokipäästöt ovat huomattavasti pienemmät. MGO:ta käytetään perinteisesti pienemmissä aluksissa ensisijaisena polttoaineena (marquard-bahls.com, 2015).

5.2 LPG

LPG puolestaan on kaasu, joka tarkoittaa ajoneuvokäytössä haastavampaa säilytystä ja tarkkoja kriteereitä mm. paineen suhteen. LPG:tä on käytetty autojen polttomoottoreissa jo vuodesta 1935 lähtien, mutta esimerkiksi Suomessa tällaiset moottorit ovat harvassa puutteellisen jakeluverkoston ja verotuksen takia. Nestekaasun etuina ovat sen korkea energiatiheys 46,4 MJ/kg ja puhtaat palot tuotteet, jotka ovat pääasiassa hiilidioksidia ja vettä. Nestekaasua saadaan niin kaasukentiltä sivutuotteena, kuin valmistamalla öljynjalostuksen sivutuotteena (cnghouse.fi, 2009). Laivanmoottorissa käytettynä se tuottaa raskaaseen polttoöljyyn verrattuna 90 % vähemmän pienhiukkaspäästöjä ja jopa 20 % pienemmät hiilidioksidipäästöt (wartsila.com, 2020).

5.3 Dual-fuel moottorit

Esimerkkinä dual-fuel moottorista on MAN B&W ME-LGIP moottori, joka perustuu MAN ME-C kaksitahtidieselmoottoriin. Siinä voidaan käyttää raskaan polttoöljyn lisäksi MGO:ta ja LPG:tä (man-es.com, 2021). Dual-fuel moottorit mahdollistavat laivaoperaattoreille vaihtoehdon valita käytettävä polttoaine hinnan ja mahdollisten päästörajoitusten mukaisesti. Nykypäivänä suosittu polttoainevaihtoehto raskaan polttoöljyn rinnalle on LPG sen alhaisen hinnan ja helpon säilytettävyyden vuoksi.

5.4 LPG jälkiasennus

Vuonna 2020 Wärtsilä suoritti BW LPG yhtiön alukseen maailman ensimmäisen LPG jälkiasennuksen (LPG Retrofit), jossa raskaan polttoöljyn rinnalle käyttövoimaksi saatiin LPG. Laiva suoritti ensimatkinsa täysin nestekaasukäyttöisenä Tyynen valtameren yli lokakuussa 2020 (wartsila.com, 2020). LPG jälkiasennuksen suurena etuna on sen nopeus ja ympäristöystävällisyys. Siinä missä uuden aluksen rakentamiseen kuluu kaksi vuotta, LPG jälkiasennukseen kuluu kaksi kuukautta ja se tuottaa 97 % pienemmän hiilijalanjäljen. Lisäksi sen etuna on alhainen hinta. Yhden aluksen LPG jälkiasennus kustantaa noin 8 miljoonaa euroa. Vertailun vuoksi uuden aluksen rakentaminen samoilla vaatimuksilla kustantaa noin 80 miljoonaa euroa eli 10 kertaa enemmän (bwlpg.com, 2021).

6 LAIVALIIKENTEEN HYÖDYT JA HAITAT

Nykypäivänä maailmanlaajuisesti meriteitse kuljetetun rahdin määrän on arvioitu olevan noin 11,08 miljardia tonnia vuosittain (unctad.org, 2020). Verrattuna esimerkiksi ilmaitse vuosittain kuljetettuun 66 miljoonaan tonniin, voidaan todeta meriteitse kuljetuksen olevan nykypäivänä tärkein rahdin kuljetusmuoto. Kapasiteetin lisäksi tärkeitä tekijöitä ovat tänä päivänä hinta ja ympäristövaikutukset (kuva 6), esimerkiksi auton kuljettaminen mantereelta toiselle on meriteitse arviolta noin 2–3 kertaa halvempaa ja tuottaa 11 kertaa vähemmän hiilidioksidipäästöjä kilometriä kohden kuin ilmaitse kuljettaminen (timeforchange.org, 2020). Vuonna 2021 kuljetetun rahdin määrää pienensi koronaviruspandemia.

	g/ton/km
Airplane (B747)	500
Modern truck	60 - 150
Modern train	30 - 100
Modern ship	10 - 40

Kuva 6: Eri kuljetusmuotojen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt.

Seuraavaksi vertaillaan laivaliikenteen ja lentoliikenteen tärkeimpiä eroja rahdinkuljetuksessa.

6.1 Hyödyt

Laivaliikenteen tärkeimpänä etuna muihin kuljetusmuotoihin on sen suuri kapasiteetti. Konttialusten kantokyky vaihtelee nykypäivänä pienistä (Panamax tyyppi) 3000 TEU (twenty-foot equivalent unit, kuva 7) kantokyvyn aluksista suuriin 24000 TEU aluksiin. Yhden tavallisen kontin keskivertopaino lastattuna on noin 20 tonnia. Vertailun vuoksi esimerkiksi perinteiseen Boeing 747-8F rahtikoneen rahtikapasiteetti on 139 tonnia. Tämä vastaa vajaata seitsemää (7) tavallista 20 tonnin konttia. Käytännössä 747-8F koneeseen ei kuitenkaan voida lastata seitsemää konttia rajallisten sisätilojen takia.



Kuva 7: Twenty-foot equivalent unit (seapro.org).

Tästä päästäänkin laivaliikenteen toiseen hyötyyn eli rahdin purkamisen ja lastaamisen helppouteen. Meriteitse kuljetettavaksi tarkoitettut kontit voidaan lastata niiden lähtöpaikassa, jonka jälkeen ne suljetaan. Tämän jälkeen kontit kuskataan esimerkiksi kuorma-autoilla tai junilla satamaan, jossa ne lastataan laivaan esimerkiksi nosturilla. Standardin mukaisten konttien lastaaminen laivaan on helppoa ja suhteellisen nopeaa. Standardisoitujen konttien lisäksi erityyppisillä aluksilla pystytään kускаamaan myös muuta tavaraa.

Meriteitse kускаaminen mahdollistaakin suurten ja raskaiden kappaleiden kускаamisen. Näin saadaan asiakkaan päässä säästettyä niin rahtikustannuksissa kuin työvoimakustannuksissa. Laivaliikenteen suurena hyötynä nykypäivänä ovat myös laajat polttoainevaihtoehdot ja jatkuvasti kehittyvä tekniikka, joka mahdollistaa esimerkiksi aikaisemmin mainittujen dual-fuel moottoreiden käyttämisen.

Lentoliikenteessä polttoainevalikoima on hyvin rajallinen ja riippuu pitkälti lentokoneen tyypistä. Nykyisissä suihkuturbiinikäyttöisissä rahtikoneissa käytetään pääasiassa Jet A-1 luokan kerosiinia, jonka hinta on noin 680 €/tonni maailmanlaajuisesti (jet-a1-fuel.com, 13.1.2022). Eli raskaaseen polttoöljyyn verrattuna se on lähes kaksi kertaa kalliimpaa tonnilta. Polttoaineen kulutuksesta mainittakoon, että B747-8F kuluttaa noin 11000 litraa polttoainetta tunnissa 139 tonnin kuormalla ja rahtilaiva jopa 14000 litraa/tunti (Sulzer RTA96-C) 14800 TEU (208000 t) kuormalla. Vaikka lentokone kattaakin merkittävästi suuremman etäisyyden samassa ajassa, on sen polttoaineenkulutus kuljetettavaa tonnia kohden huomattavasti suurempi.

6.2 Haitat

Laivaliikenteen merkittävimpänä haittapuolena ovat siihen liittyvät ympäristöriskit ja tämän päivän hektisessä yhteiskunnassa sen hitaus. Kuten tekstissä jo aikaisemmin on mainittu laivat operoivat monenlaisissa olosuhteissa ja aiheuttavat aina riskin merien ekosysteemille. Erityisesti korostuvat arktiset alueet, sekä vesistöt, joiden ekosysteemi on tarkka ympäristöstään. Lisäksi monilla satama-alueilla ja rannikoilla pienhiukkaspäästöjen määrät ovat laivaliikenteen takia korkeat, aiheuttaen täten terveysriskin asukkaille ja ympäristölle. Tämä pienhiukkasten ja kasvihuonekaasujen määrä johtuu lähinnä käytetyistä polttoaineista, ja niihin voidaan vaikuttaa nykyaikaisilla polttoaineratkaisuilla (Mueller et al. 2011).

Lento- ja laivaliikennettä vertaillessa lentoliikenteen merkittävänä etuna on sen nopeus. B747-8F rahtikoneen nopeus on 914+ km/h, joka tarkoittaa, että kone ylittää Atlantin valtameren parhaimmillaan viidessä (5) tunnissa. Rahtilaivalla vastaavaan suoritukseen kuluu reilut 10 vuorokautta riippuen pitkälti laivan koosta ja sääolosuhteista.

Yhä kiristyvien päästövaatimuksien ja nousevien polttoaineiden hintojen takia monet laivat ajavat nykyään hiljennettyä nopeutta, jolloin saadaan säästettyä merkittävästi polttoainetta ja täten myös vähennettyä päästöjä. Kääntöpuolena on tietenkin matkajen aikojen pidentyminen entisestään.

6.3 Vertailun yhteenveto

Yhteenvetona voidaan sanoa, että kuskattaessa suuria tavaramääriä, on järkevää turvautua laivaliikenteeseen. Tällöin kuljetuskustannukset saadaan pidettyä hyvin aisoissa, mikä on edullista niin asiakkaan kuin toimittajankin kannalta. Lisäksi toimittaja voi mainonnassaan hyödyntää meriliikenteen ympäristöystävällistä luonnetta. Laivaliikenne mahdollistaa myös monenkokoisten ja -painoisten tavaroiden kускаamisen helposti.

Kun tavaralta vaaditaan nopeaa toimitusta ja/tai tavaramäärä ei ole suuri, voidaan käyttää lentoliikennettä. Tällöin kuljetuskustannukset kuitenkin väistämättä kasvavat ja samoin kasvaa tavaroiden hiilijalanjälki. Vaikka suihkumoottoritekniikka menee koko ajan eteenpäin, ei se pysty kuitenkaan kilpailemaan laivoissa käytetyille kaksitahtidieselmooottoreille kuljetettavien tavaramäärien ollessa suuria.

Nykyaikainen tekniikka mahdollistaa jo käytössä olevien kaksitahtimoottoreiden mukauttamista taloudellisemmaksi ja ympäristöystävällisemmäksi. Lisäksi niiden pitkä elinkaari ja matalat huoltokustannukset yhdistettynä suureen hyötysuhteeseen ovat yhdistelmä johon suihkuturbiineilla ei päästä kovin helposti.

7 YHTEENVETO

Nykypäivänä laivaliikenteellä on edelleen suuri merkitys niin kansainvälisessä rahdin- ja ihmisten kuljetuksessa kuin useissa paikallisissakin käyttökohteissa. Polttoaineiden ja tekniikan kehittyessä jatkuvasti eteenpäin nähdään tulevaisuudessa niin yhä energiatehokkaampia polttomoottoreita kuin sähkö- ja tuulivoimaa. Suurilla kaksitahtikäyttöisillä dieselmootoreilla on laivaliikenteessä yhä vahva jalansija suurissa pitkää matkaa kulkevissa aluksissa. Lähivuosina on kuitenkin nähty sähkön ja automaation yleistymistä pienemmän skaalan ratkaisuisissa. Kotimainen operaattori Finferries operoi 3.12.2018 menestyksekkäästi maailman ensimmäistä täysin autonomista lauttaa Turun saaristossa. Lautta kulkee perinteisillä fossiililla polttoaineilla, mutta se kykenee automaation ansiosta tunnistamaan reitillensä olevia esteitä ja väistämään niitä. Lisäksi se kykenee suorittamaan automaattisen rantautumisen, jota voidaan valvoa etäohjauksella (finferries.fi, 2018).

Vuoden 2021 syksyllä norjalainen Yara Birkeland konttialus luovutettiin Yara-yhtiölle. Alus kulkee täysin sähköllä ja se on täysin automatisoitu. Kantavuutta aluksella on 120 TEU:n edestä ja sen on arvioitu korvaavan vuosittain noin 40000 rekkamatkaa. Toistaiseksi laivaa on ajettu koekäytössä, mutta tulevaisuudessa se kykenee suorittamaan reitin täysin omatoimisesti ilman miehistöä (navigatormagazine.fi, 2021). Yara Birkeland kulkee noin 13 km mittaista reittiä Norjassa Herøyan ja Brevikin välillä.

Suurten kaksitahtidieselmootoreiden tulevaisuus lepää todennäköisesti pitkälti dual-fuel järjestelmien ja uudenlaisten polttoaineiden harteilla. Väistämättä jossain vaiheessa kiristyvät ympäristömääräykset tulevat rajoittamaan etenkin raskaan polttoöljyn käyttöä merkittävästi. Tällöin ainoa vaihtoehto ovat vaihtoehtoiset polttoaineet. Loppuvuodesta 2021 Wärtsilä uutisoi aloittavansa 2022 vuoden alkupuoliskolla ohjelman, jonka pyrkimyksenä on mahdollistaa Wärtsilän kaksitahtisten dieselmootoreiden muutos tulevaisuuden polttoaineisiin kuten metaaniin (Two-Stroke Future Fuels Conversion). Ohjelman tavoitteena on tehdä polttoaineen muutos jo käytössä oleviin aluksiin helpoksi ja täten pienentää aluksen omistajalle kertyviä kustannuksia (wartsila.com, 2021).

LÄHDELUETTELO

Huhtamaa, P., 2007. *Auto- ja kuljetusalan erikoistumisoppi. 2, Moottori*. Helsingissä: Otava.

Juurikkala, J., Kleimola, M., Pohjanpalo, Y. and Nurmi, O., 1981. *Autotekniikan käsikirja. Dieselmoottori : rakenne, toiminta ja korjaukset*. Hki: Tammi.

Mollenhauer, K., Tschöke, H. and Johnson, K. G. E., 2011. *Handbook of diesel engines*. Choice Reviews Online. Berlin.

Mueller, D., Uibel, S., Takemura, M., Klingelhofer, D. and Groneberg, D. A., 2011. Ships, ports and particulate air pollution - an analysis of recent studies. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* [online], 6 (1), 31. Saatavissa: <https://doi.org/10.1186/1745-6673-6-31>.

Park, J., Jang, J. H. and Park, S., 2015. Effect of fuel temperature on heavy fuel oil spray characteristics in a common-rail fuel injection system for marine engines. *Ocean Engineering*, 104, 580–589.

Rantala, J., 2002. *Auto- ja kuljetusalan perusoppi. 6, Moottori : moottorin perusteet, poltto- ja voiteluaineet, kuntohuolto*. Uudistetun. Helsingissä: Otava.

Zhou, S., Zhou, J. and Zhu, Y., 2019. Chemical composition and size distribution of particulate matters from marine diesel engines with different fuel oils. *Fuel* [online], 235, 972–983. Saatavissa: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85052297194&doi=10.1016%2Fj.fuel.2018.08.080&partnerID=40&md5=b3988933e37e9b4deecc4d0d363006ee>.

wartsila.com, 2006. *The world's most powerful engine enters service*. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/media/news/12-09-2006-the-world%27s-most-powerful-engine-enters-service>. Viitattu 16.10.2021.

marinegyaan.com, 2017. *What are the advantages of super long stroke?*. Saatavissa: <https://marinegyaan.com/what-are-the-advantages-of-super-long-stroke/>. Viitattu 17.2.2022.

wikipedia.org, 2018. *Krakkaus (kemia)*. Saatavissa: [https://fi.wikipedia.org/wiki/Krakkaus_\(kemia\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Krakkaus_(kemia)). Viitattu 3.11.2021.

pbt-international.com, 2021. *Oil price information*. Saatavissa: <https://pbt-international.com/price-information/>. Viitattu 7.11.2021.

wikipedia.org, 2020. *Viskositeetti*. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Viskositeetti>. Viitattu 7.11.2021.

wikipedia.org, 2020. *Pienhiukkanen*. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Pienhiukkanen>. Viitattu 7.11.2021.

wagenborg.com, 2020. *Sulphur 2020: Everything you need to know about the upcoming regulations*. Saatavissa: <https://www.wagenborg.com/cases/sulphur-2020-everything-you-need-to-know-about-the-upcoming-regulations>. Viitattu 27.11.2021.

hfofreearctic.org, 2021. *Risks of heavy fuel oil use in the arctic*. Saatavissa: <https://www.hfofreearctic.org/en/front-page/>. Viitattu 27.11.2021.

marquard-bahls.com, 2015. *Marine Gasoil (MGO)*. Saatavissa: <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-gasoil-mgo.html>. Viitattu 18.1.2022.

cnghouse.fi, 2009. *LPG*. Saatavissa: <http://www.cnghouse.fi/lpg/>. Viitattu 18.1.2022.

wartsila.com, 2020. *Retrofit highlights use of LPG as a marine fuel*. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/insights/article/retrofit-highlights-use-of-lpg-as-a-marine-fuel>. Viitattu 18.1.2022.

man-es.com, 2021. *Introducing the MAN B&W ME-LGIP: the world's first dual-fuel LPG marine engine.* Saatavissa: https://www.man-es.com/marine/products/lgip?utm_medium=sea&utm_source=google&utm_campaign=always_sea_2021_man_generic_marine_products_bmm&utm_term=selsesm&gclid=Cj0KCCQiAy4eNBhCaARIsAFDVtI0FgWxSpG4YLNd6Is7x5tgK7PnBv3D2qpw390fG6PBorab0RujOguwaAhSvEALw_wcB&gclidsrc=aw.ds. Viitattu 18.1.2022.

bwlp.com, 2021. *Retrofit vs Newbuild.* Saatavissa: <https://www.bwlp.com/our-fleet/lpg-propulsion/retrofit-vs-newbuild/>. Viitattu 18.1.2022.

unctad.org, 2020. *Review of maritime transport 2020.* Saatavissa: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf. Viitattu 13.1.2022.

timeforchange.org, 2020. *CO2 emissions for shipping of goods.* Saatavissa: <https://timeforchange.org/co2-emissions-for-shipping-of-goods/>. Viitattu 13.1.2022.

jet-a1-fuel.com, 2022. *Jet Fuel price Today.* Saatavissa: <https://jet-a1-fuel.com/>. Viitattu 13.1.2022.

finferries.fi, 2018. *Finferriesillä maailman ensimmäinen täysin autonominen lautta-alus.* Saatavissa: <https://www.finferries.fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet/finferriesilla-maailman-ensimmainen-taysin-autonominen-lautta-alus.html>. Viitattu 18.1.2022.

navigatormagazine.fi, 2021. *Miehittämätön sähköllä toimiva rahtilaiva aloittaa liikennöinnin Norjassa.* Saatavissa: <https://navigatormagazine.fi/uutiset/miehittamaton-sahkolla-toimiva-rahtilaiva-aloittaa-liikennoinnin-norjassa/>. Viitattu 18.1.2022.

wartsila.com, 2021. *Wärtsilä to launch ground-breaking 2-stroke future fuels conversion solution and joins forces with MSC for technology demonstration.* Saatavissa: <https://www.wartsila.com/media/news/16-11-2021-wartsila-to-launch-ground-breaking-2-stroke-future-fuels-conversion-solution-and-joins-forces-with-msc-for-technology-demonstration-3007238>. Viitattu 18.1.2022.