



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

TUULIENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN KAUPPAMERENKULUSSA

Hanna Lausmaa

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö

Kesäkuu 2021

TIIVISTELMÄ

Tuulienergian hyödyntäminen kauppamerenkulussa

Hanna Lausmaa

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 31 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Eino Antikainen

Työn tavoitteena on tutustua tuulienergian hyödyntämismahdollisuuksiin kauppamerenkulussa. Kiristyvät päästövaatimukset pakottavat laivanrakentajat kehittämään uusia hiilineutraaleja energialähteitä. Yksi potentiaalisista vaihtoehtoista on tuulivoima, jonka hyödyntämisen mahdollisuuksia on tutkittu paljon viime vuosina.

Työn tarkoituksena on esitellä tuulienergian hyödyntämisen eri menetelmiä ja niistä saatuja tai mahdollisesti saatavia tuloksia. Teknologiat on jaettu kahteen osaan: propulsiovoimaa tuottaviin ja sähkövoimaa tuottaviin. Aihetta tutkitaan olemassa olevan kirjallisuuden ja eri yritysten tarjoamien teknologioiden perusteella.

Tuulienergiaa hyödyntävien teknologioiden avulla on osoitettu jopa kaksinumeroisten säästöjen polttoaineen kulutuksessa olevan mahdollisia. Sopivinta teknologiaa valittaessa on aina kuitenkin tärkeää tarkastella jokaista tapausta alus- ja reittikohtaisesti. Monet jo kehitetyt teknologiat ovat osoitettu hyviksi, mutta tuulienergiaa hyödyntävien laitteiden käytön yleistymiseen menee todennäköisesti vielä pitkään, sillä laitteet ovat kalliita asentaa ja myös muita kilpailevia ympäristöystävällisiä polttoaineita ja teknologioita on kehitteillä.

Asiasanat: tuulienergia, laivaliikenne, uusiutuvat energialähteet.

ABSTRACT

Utilising wind energy in merchant shipping

Hanna Lausmaa

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 31 pp.

Supervisor at the university: Eino Antikainen

The purpose of this thesis is to examine the possibilities of utilizing wind energy in merchant shipping. The increasing demands to decrease emissions forces shipbuilders to develop new carbon-neutral energy sources. One potential possibility seems to be wind energy of which possibilities have been researched a lot in recent years.

The aim of this thesis is to introduce different methods of utilizing wind energy and the possible results. The technologies have been divided into two different groups, the ones providing propulsive force and the ones creating electrical energy. The subject is examined based on literature and the technologies provided by current companies.

Two figure savings in fuel consumption have been indicated possible to reach by exploiting technologies utilizing wind energy. However, when choosing the right technology, it is important to consider each case individually by examining the vessel type and operating route.

Many of the existing technologies have already been proven efficient, but it is likely to still take some time before wind-utilizing technology becomes more common on ships due to the high costs of the devices. Meanwhile other competitive environmentally friendly fuels and technologies are being developed.

Keywords: wind energy, merchant shipping, renewable energy sources

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	6
2 TUULIENERGIA KAUPPAMERENKULUSSA.....	7
2.1 Historia.....	7
2.2 Tuulienergian hyödyntäminen nykyään.....	8
3 TUULIENERGIA PROPULSIOVOIMANA	9
3.1 Purjeet	9
3.1.1 Pehmeät purjeet	9
3.1.2 Siipipurjeet	11
3.2 Leijapurje.....	12
3.3 Roottoripurje	14
4 TUULIENERGIA SÄHKÖNTUOTOSSA	18
4.1 Turbiinit	18
4.1.1 Horisontaalisen akselin turbiini (HAWT)	19
4.1.2 Vertikaalisen akselin turbiini (VAWT)	20
4.1.3 Ilmassa lentävä turbiini (AWT)	21
5 MENETELMIEN VERTAILU	24
6 TUULIENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN TULEVAISUUDESSA	26
7 YHTEENVETO	27
LÄHTEET	

1 JOHDANTO

Työssä tarkastellaan tuulienergian hyödyntämismahdollisuuksia kauppamerenkulussa. Kauppamerenkululla tarkoitetaan väylämaksulain mukaan ”*ansiotarkoituksessa suoritettua toimintaa, kuten lastin ja matkustajien kuljettamista, hinausta, jäänmurtamista, pyyntiä tai pelastus- ja avustustoimintaa.*” (Finlex, 2021) Nykypäivänä 90 % maailman rahdista kuljetetaan meriteitse ja laivaliikenteen odotetaan tuplaantuvan vuoteen 2050 mennessä. (Tillig & Ringsberg, 2020)

Laivaliikenteestä aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi on tärkeää tutkia uusiutuvien energialähteiden hyödyntämismahdollisuuksia. Työn tarkoituksena on esitellä tuulienergiaa hyödyntäviä teknologioita ja niistä saatuja tai saatavia tuloksia polttoaineen kulutuksen vähentämiseksi. Aihe on rajattu teknologioihin, jotka voidaan asentaa suoraan laivaan. Työssä käytetyllä termillä “propulsio” tarkoitetaan työntöä eteenpäin. Propulsiojärjestelmä on siis järjestelmä, joka synnyttää kappaletta eteenpäin työntävää voimaa. (NASA, 2021)

2 TUULIENERGIA KAUPPAMERENKULUSSA

Nykypäivän laivaliikenne aiheuttaa noin 3 % maailman kaikista kasvihuonepäästöistä. (Tillig & Ringsberg, 2020) International Maritime Organization (IMO) asetti vuonna 2018 tavoitteeksi vähentää vuoteen 2050 mennessä laivaliikenteen aiheuttamia päästöjä puoleen vuoden 2008 määrästä. (IMO, 2018)

On arvioitu, että vuosien 2007-2012 välillä laivat tuottivat vuosittain 740-795 miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä. (Smith ym., 2014). Toisen arvion mukaan vuonna 2007 päästiin 943 miljoonan tonnin päästöihin polttoöljyn kulutuksen ollessa 297 miljoonaa tonnia yhteensä 45 620 aluksessa. (Corbett ym., 2007).

Tuulienergiaa voidaan hyödyntää laivoissa joko propulsiovoimana tai sähköenergiana. Tuulen propulsiovoimana hyödyntämisestä puhuttaessa tarkoitetaan, kun tuulienergian kineettinen voima muutetaan laivaa eteenpäin työntäväksi voimaksi. Nykypäivänä tuulta hyödynnetään pääasiassa vain apuvoimalähteenä pääkoneiden ohella. Tällä tavoin pystytään vähentämään pääkoneilta vaadittavaa tehomäärää ja siten myös polttoaineen kulutusta. (Lloyd's Register, 2015)

Sähköntuotossa tuulienergia muutetaan turbiinin avulla sähköksi samaan tapaan, kuin maalla sijaitsevien tuulimyllyjenkin avulla. Tuulesta muutettu sähköenergia voidaan sen jälkeen hyödyntää joko laivan propulsiojärjestelmässä tai laivan muissa sähkölaitteissa. Tässä työssä on keskitytty erilaisiin teknologioihin vain laivassa ja täten esimerkiksi tuulienergialla maissa tuotetun sähköön lataaminen laivaan jätetään tässä työssä käsittelemättä.

2.1 Historia

Tuulienergiaa on hyödynnetty laivoissa purjeiden avulla jo tuhansia vuosia, ja purjeet olivatkin pääasiallinen propulsiomuoto laivoissa yli 2000 tuhannen vuoden ajan. (Atkinson ym., 2018) 1800-luvulla klippereiden purjehtimisnopeus oli parhaimmillaan nykylaivojen tasolla, suotuisilla tuulilla parhaimmillaan 15 solmua. Purjelaiva Flying Cloud piti yli 130 vuotta maailman ennätystä nimissään nopeimmasta matkasta New Yorkin ja San Fransiscon välillä aina vuoteen 1989 saakka. (Lloyd's Register, 2015).

Purjelaivojen haasteena oli kuitenkin riippuvaisuus tuuliolosuhteista, joka saattoi johtaa purjehdusaikojen pituuden suureenkin vaihtelevuuteen. Teollisen vallankumouksen aikana kehitettyjen höyry- ja dieselkoneiden myötä purjelaivojen määrä alkoi hiljalleen vähentyä. Koneiden suurempi nopeus ja luotettavuus, sekä halvat polttoaineet öljy ja hiili tekivät niistä purjeita houkuttelevamman vaihtoehdon. 1920-luvulla purjelaivat eivät olleet enää operoivista laivoista enemmistössä. Ensimmäisiin höyrylaivoihin usein kuitenkin asennettiin myös mastot mahdollisen konerikon varalta. (Atkinson ym., 2018)

1980-luvulla tuulienergian hyödyntäminen otettiin uuteen tarkasteluun ja sen kehitystä jatkettiin silloisen korkean öljyn hinnan vuoksi. Tavoitteena oli saada vähennettyä polttoainekustannuksia. 80-luvulla saavutettiin tuulienergialla eri menetelmien avulla jopa 30% säästöjä polttoaineen kulutuksessa, mutta teknologioiden kehittäminen unohdettiin jälleen, kun öljyn hinta romahti. (Atkinson ym., 2018)

2.2 Tuulienergian hyödyntäminen nykyään

Viime vuosikymmeninä tuulienergian hyödyntäminen on tehnyt paluutaan modernin teknologian siivittämänä. Moni nykypäivän laivojen tuuliteknologioista ovat evoluutiota vanhemmista konsepteista. Esimerkiksi siipipurjeet ovat kehitetty 80-luvun Walker-siipipurjeista ja JAMDA-teknologiasta. Toinen esimerkki on DynaRig, joka kehitettiin alun perin 60-luvulla vanhojen klippereiden purjeita mukaillen. (Lloyd's Register, 2015)

Nykypäivän tuulienergian ratkaisuissa on hyödynnetty yhä enemmän ilmailutekniikan parempaa osaamista, jonka avulla saavutetaan parempi tehokkuus entisajan ratkaisuihin verrattuna. (Reche-Vilanova ym., 2021) Automaation, ohjausjärjestelmien, sääkartoituksen, uusien materiaalien ja tunnelitestauksen myötä saadaan paljon luotettavaa tietoa eri tuuliteknologioiden tehokkuudesta. (Lloyd's Register, 2015) Harva konsepti on kuitenkaan vielä kaupallisesti saatavilla.

3 TUULIENERGIA PROPULSIOVOIMANA

3.1 Purjeet

Purjemalleja ja -materiaaleja on kehitetty useita erilaisia ratkaisuja, joista moni on vielä konseptitasolla. Yleisimmät purjetyypit lienevät klassiset kankaaiset purjetyypit sekä pehmeät ja jäykät siipipurjeet, jotka on tässä kappaleessa esitelty. (Atkinson ym., 2018) Purjeen toimintaperiaate perustuu tuulen kohtaamiseen purjeen kanssa, joka saa aikaan nostevoiman (engl. lift force) sekä ilmanvastuksen (engl. drag force). Tuulen ja purjeen kohtaamiskulmaa säätämällä pystytään maksimoimaan tuulesta saatava noste. (Lloyd's Register, 2015)

Yleisesti kaikkien purjetyyppien haasteina on niiden suuri koko, joka vaikuttaa näkyvyyteen riippuen purjeiden sijainnista kannella. Purjeissa ja mastossa vaikuttava tuuli aiheuttaa laivaan myös kallistavia voimia. Mastot, joihin purjeet kiinnitetään, ovat yleensä korkeita ja kiinteitä rakenteita. Tämä lisää laivan korkeutta ja saattaa täten aiheuttaa hankaluuksia satamaan pyrkiessä esimerkiksi matkalla olevien siltarakenteiden tai satamassa olevien nosturien takia. (Atkinson ym., 2018)

3.1.1 Pehmeät purjeet

Pehmeillä purjeilla tarkoitetaan ns. vanhanaikaisia purjeita, jotka voivat nykypäivänä olla valmistettu esimerkiksi synteettisistä tekstiilimateriaaleista tai nylonista. Purjelaivojen ajan jälkeen on rekisteröity vain hyvin vähän pehmeitä purjeita käyttäviä kaupallisesti operoivia laivoja. Useimmat näistä olemassa olevista kaupallisista purjealuksista toimivat erikoisristeilyaluksina. (Atkinson ym., 2018)

Eräs nykypäivän purjetyyppi on DynaRig (kuva 1), jossa kangaspurjeet on kiinnitetty mastoon hyvin samantapaisesti kuin perinteisissä klippereissä. DynaRig -tekniikassa puuttuu mastoja tukeva köysistö, ja mastot ovat laakeroitu. Laakeroinnin ja automaation avulla mastoja voidaan kääntää, jolloin tuulienergian hyödyntäminen pystytään maksimoimaan. Pehmeät purjeet eivät kuitenkaan saa aikaan yhtä suurta nostovoimaa kuin siipipurjeet. Eroa voidaan kompensoida DynaRigin suuremmalla purjepinta-alalla, jolloin saadaan aikaan myös suurempi nostovoima. (Lloyd's Register, 2015)



Kuva 1: Dynarig (Dykstra Naval Architects, 2021).

Pehmeitä purjeita ei ole vielä tuotteistettu kaupallisesti saataville. Pehmeitä purjeita on kuitenkin tarkoitus kokeilla myös rahtilaivakäytössä. Neoline uutisoi allekirjoittaneensa aiesopimuksen purjeavusteisen rahtilaiva-aluksen valmistamisesta. Aluksen, joka on esitetty kuvassa 2, rakentaminen on tarkoitus aloittaa vuonna 2024. (Neoline, 2021)

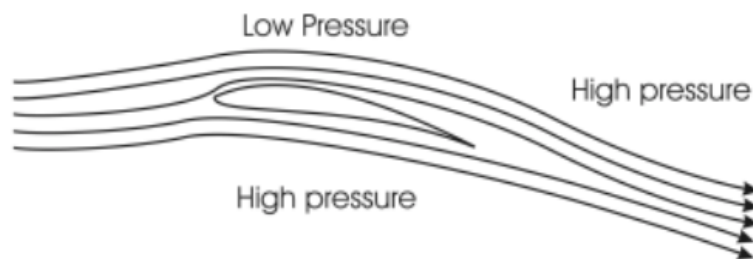


Kuva 2: Neolinen vuonna 2024 rakennettava purjeavusteinen rahtilaiva (Neoline, 2021).

3.1.2 Siipipurjeet

Siipipurjeita on olemassa pehmeitä ja jäykkiä malleja. Siipipurje on nimensä mukaisesti ulkonäöltään lentokoneen siipeä muistuttava purje. Siipipurjeita on kehitetty lukuisia eri malleja ja ratkaisuja. Pehmeät siipipurjeet ovat yleensä leijapurjeiden tapaan airfoil-tekniikkaa käyttäviä leijamaisia rakennelmia maston ympärillä, kun taas jäykät siipipurjeet voivat olla kiinteitä ja lentokoneen siipiä muistuttavia, esimerkiksi komposiittimateriaalista valmistettuja. Siipipurjeita voidaan asentaa yhdestä useampaan kappaleeseen laivan kannelle. Myös useamman purjeen voi kiinnittää vierekkäin samalle alustalle, mikäli vapaana oleva kansitila ja laivan koko sen sallivat. (Lloyd's Register, 2015)

Siipipurjeen toiminta perustuu lentokoneen siiven ja muiden purjeiden tapaan tuulen ja purjeen kohtaamiseen, jolloin syntyy aerodynaaminen voima, joka muodostuu nosteesta ja ilmanvastuksesta. Parhain noste saadaan, kun tuulen ja purjeen kohtaamiskulmaa säädetään optimaaliseksi. Kuvassa 3 on esitetty, miten purjeen epäsymmetrinen muotoilu aiheuttaa ilman erilaisen liikkeen purjeen sisä- ja ulkopinnoilla. Purjeen ulkopinnalla ilma liikkuu nopeammin ja tästä syntyy matalampi paine ('low pressure') verrattuna purjeen sisäpintaan, jossa vaikuttaa korkeampi paine ('high pressure'). Tästä syntyvä paine-ero aiheuttaa nostevoiman. (Ariffin & Hannan, 2020)



Kuva 3: Paine-ero purjeen pinnoilla (Glownia, 2007).

Siipipurje, kuten muutkin nykypäivän tuulienergiaa hyödyntävät propulsiojärjestelmät, ovat hyvin pitkälle automatisoituja. (Lloyd's Register, 2015) Modernien siipipurjeiden malleissa nostovoima on suurempi ja ilmanvastus on pienempi. Tätä kutsutaan L/D-suhteeksi (Lift/Drag -suhde), jonka myötä purje synnyttää eteenpäintyöntävää voimaa vähentäen samalla tuulen alukseen aiheuttamaa momenttia. Paremman L/D-suhteen myötä siipipurje on perinteistä purjemallia tehokkaampi. (Luyu ym., 2010)

Siipipurjeen on kaupallistanut ainakin Windship. (Windship, 2021) Myös teleskooppisia siipipurjeita hyödyntävä ja jopa 90 % polttoainekulujen säästöihin tähtäävä rahtilaiva Oceanbird (kuvassa 4), on suunnitteilla. Teknologiaa testataan parhaillaan pienoismallikoossa. (Oceanbird, 2021)



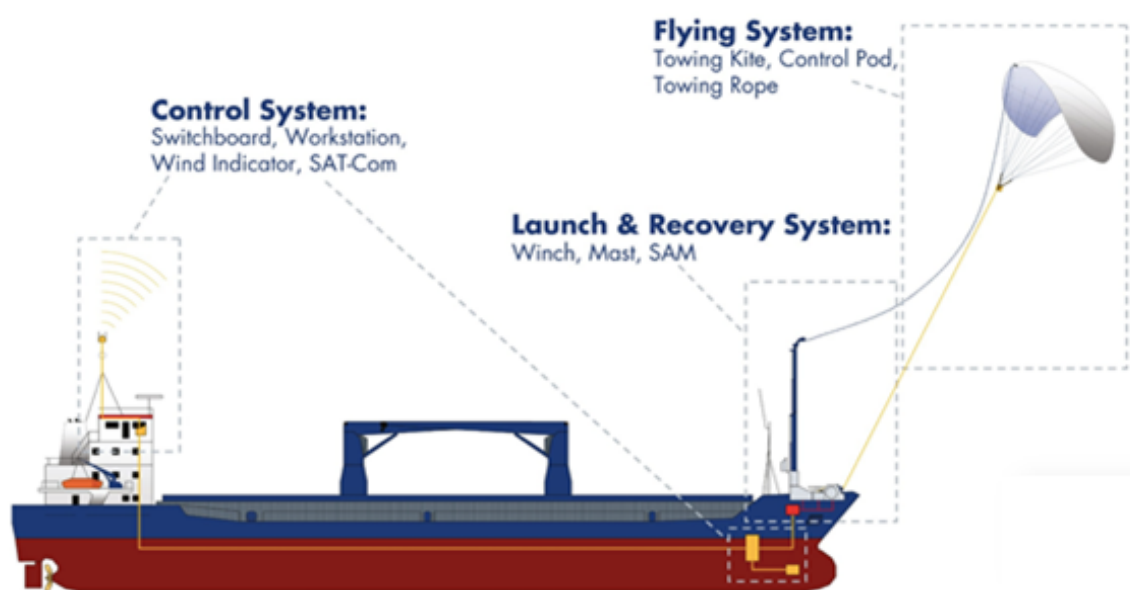
Kuva 4: Teleskooppiset siipipurjeet (Oceanbird, 2021).

3.2 Leijapurje

Leijapurjeita on kehitetty valjastamaan tuulienergiaa laivan propulsiovoimaksi jo 1980-luvulta lähtien. (Lele & Rao, 2016) Yleisesti leijapurjeteknologia perustuu parafoil-leijaan, joka vetää laivaa perässään. Parafoil-termiä käytetään kuvaamaan joustavaa purjetta, leijaa tai siipeä, joka on tehty vedenpitävästä kevyestä tekstiilikankaasta, kuten esimerkiksi ripstop nylonista. Parafoilissa on purjeen sisällä kennomainen rakenne, jonka tuuli täyttää.

Leijapurje kiinnitetään laivaan kestävällä, mutta kevyellä ja kelluvalla köydellä, jonka pituus ei muutu. Leija pystyy hyödyntämään korkealla lentäessään suuremmat tuulen nopeudet, sillä tuulen nopeus suurenee lähes lineaarisesti korkeuden kasvaessa. (Kim & Park, 2010) Vetovoiman maksimoimiseksi leijaa voidaan liikuttaa automaation avulla esimerkiksi kahdeksikon muotoista liikerataa, jolloin leijaan kohdistuva tuulinopeus suurenee. Näin saadaan tuulesta suurempi hyöty pienemmällä leijan koolla. Tutkimusten mukaan suurin veto leijasta saadaan, kun leijan vetoköyden pituus on 27-33 % leijan lentokorkeudesta. (Naajien & Koster, 2007)

Kuvassa 5 on esitetty leijapurjesysteemiin kuuluvat osat. Leijan ja köyden (”flying system”) lisäksi systeemiin yleisesti kuuluu leijan laukaisujärjestelmä (”launch & recovery system”) ja leijan automaattinen ohjausjärjestelmä (”control system”). Kun leija halutaan ottaa käyttöön, laukaisujärjestelmä nostaa leijan kannelle ja tuuli täyttää leijan solukot, jonka jälkeen leija on valmis laukaistavaksi. Automaattinen ohjausjärjestelmä ohjaa leijan liikerataa sekä leijan lentokorkeutta ja -kulmaa. Yllättävien sääolosuhteiden muutoksen varalta leija pystytään nopeasti tekemään neutraaliksi nostamalla se suoraan laivan yläpuolelle, jolloin leija ei enää kohdistaa laivaan vetoa. (Skysails, 2021a)



Kuva 5: Leijapurjesysteemin eri osat. (Skysails, 2021a)

Yleisimmin leija kiinnitetään laivan keulaan, jonka takia laivan runkoon ei tarvitse tehdä rakenteellisia muutoksia, sillä se on tarpeeksi kestävä jo keulassa sijaitsevan kiinnityslaitteiston ansiosta. Koska leijan kiinnityspiste on alhaalla eikä mastoja tarvita, ei laivaan myöskään vaikuta suuria kallistavia voimia. (Naajien & Koster, 2007) Leijapurjejärjestelmän suuri etu on sen pienikokoisuus. Leija pystytään varastoimaan pieneen tilaan, eikä järjestelmä vie suuria määriä kansitilaa muiden tässä työssä esiteltyjen järjestelmien tavoin. (Traut ym., 2014)

Traut ym. (2014) vertailivat tutkimuksessaan Flettner-roottoria ja leijapurjetta. Tulokset osoittivat, että tutkimuksessa tarkastellulla reitillä leijapurje suoriutui tehokkaammin ja tuotti suuremman tehomäärän Flettner-roottoriin verrattuna. Huomattavaa kuitenkin on

se, että leijapurjeen suorituskyky on riippuvaisempi tuulen suunnasta ja nopeudesta. Parhaan hyödyn leijapurjeesta saa, kun tuuli tulee laivan perästä päin. Leijasta saatava hyöty menee nolnaan, jos laivan kulkusuunnan ja tuulen suunnan välinen kulma on suurempi kuin 135 astetta. Leijapurje tuottaa siis paljon tehoa optimiolosuhteissa, mutta Flettner-roottorin tehontuoton vaihtelu oli huomattavasti pienempää olosuhteista riippumatta. (Traut ym., 2014)

SkySails Marine on tällä hetkellä ainoa automatisoituja leijapurjeita valmistava yritys. SkySailsin mukaan purjeilla on saavutettu vuositasolla keskimäärin 10-15 % säästöt polttoaineen kulutuksessa. Kuvassa 6 SkySailin avustuksella operoiva BBC Skysails. (SkySails, 2021b)

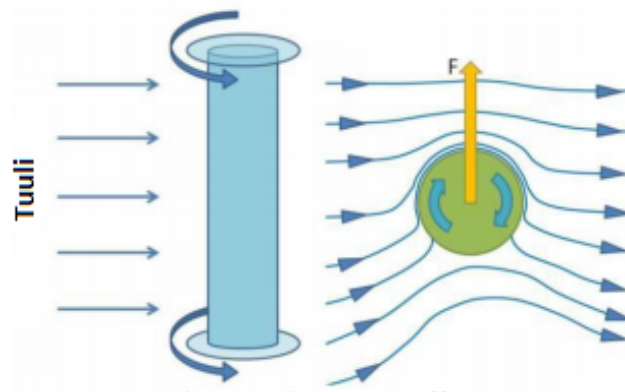


Kuva 6: BBC Skysails (Skysails, 2021b).

3.3 Roottoripurje

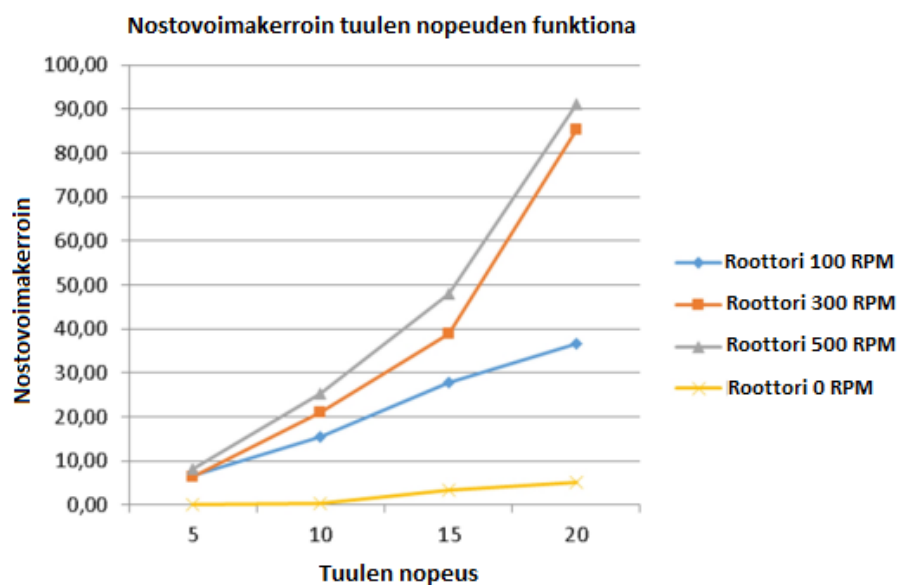
Flettner-roottori eli roottoripurje hyödyntää Magnus-efektiä. Magnus-efekti on peräisin 1850-luvulta, ja ensimmäisen kerran pyörivää Magnus-efektiä hyödyntävää roottoria kokeiltiin laivassa vuonna 1924, kun Anton Flettner keksi Flettner-roottorin. (Lele & Rao, 2016) Sen aikaiset roottorit eivät kuitenkaan pystyneet kilpailemaan diesel- ja höyrykoneiden kanssa, jonka takia menetelmä unohdettiin nopeasti. (Bordogna ym.,

2019) Roottori on korkea sylinterin muotoinen rakennelma, joka asennetaan laivan kannelle. Sylinteri voi olla kiinteä, teleskooppinen tai kaadettavaa mallia. (Lloyd's Register, 2015)



Kuva 7: Roottoripurjeen toimintaperiaate (mukaillen Pearson, 2014).

Jotta Magnus-efekti saadaan aikaan, on sylinteriä pyöritettävä mekaanisesti laivan sähköllä. Kuvassa 7 on esitetty roottorin toimintaperiaate. Kun tuuli kohtaa pyörivän sylinterin, syntyy noste, joka työntää laivaa eteenpäin. (Lloyd's Register, 2015) Arief ym. (2018) ovat tarkastelleet työssään roottorin pyörimisnopeuden, tuulen nopeuden sekä roottoripurjeen synnyttämän työntövoiman välistä suhdetta. Kuvasta 8 nähdään, että roottorin pyörimisnopeus vaikuttaa syntyvään työntövoimaan: mitä suurempi roottoripurjeen pyörimisnopeus, sitä suurempi hyöty.



Kuva 8: Nostovoimakertoimen tuulen nopeuden funktiona (mukaillen Arief ym., 2018)

Parhaimman hyödyn roottoripurje saa tuulesta, kun tuulen suunta on kohtisuorassa laivan kulkusuuntaan, eli laivaan ja roottoripurjeeseen vaikuttaa sivutuuli. Tällöin tuulesta saadaan aikaan laivaa työntävä voima, vaikka laivan nopeus olisi suurempi kuin tuulen nopeus. (Lloyd's Register, 2015) Tämä on roottoripurjeen merkittävä etu moneen muuhun tässä työssä esiteltyyn teknologiaan verrattuna, joka mahdollistaa roottorin hyvän hyödynnettävyyden maantieteellisestä sijainnista tai sääolosuhteista riippumatta. Huomioitavaa kuitenkin on, että laivan kulkusuuntaan nähden vasta- tai myötätuulella roottorin tuotto saattaa olla hyvin pieni tai jopa negatiivinen tuulesta aiheutuvan ilmanvastuksen (engl. drag force) takia. (Traut ym., 2014).

Myös pinnanlaadun vaikutusta roottorin synnyttämään työntövoimaan on tarkasteltu. Everts ym. totesivat artikkelissaan, että roottorin karkeammalla pinnalla pystytään synnyttämään suurempi työntövoima. Tämä edellyttää kuitenkin myös suurempaa pyörimisnopeutta ja suurempaa Reynoldsin lukua. (Everts ym., 2014).

Roottoripurje pysäytettynä aiheuttaa vain hyvin minimaalisia aerodynaamisia kuormia, joten systeemi on nk. ”fail-safe”. Tällä tarkoitetaan sitä, että mahdollisesta laitteen vikaantumisesta johtuvasta pysähdyksestä ei aiheudu laivalle suuria ylimääräisiä kuormia. Järjestelmä on myös yksinkertainen kontrolloida, sillä toiminta perustuu vain yhteen muuttujaan; roottorin pyörimisnopeuteen. (Babarit ym., 2020). On kuitenkin huomioitava, että roottori vie arvokasta tilaa laivan kannelta ja saattaa vaikeuttaa lastin lastaamista tai purkamista. Roottorien asentaminen laivan kannelle kasvattaa mitä todennäköisimmin laivan korkeutta, joka täytyy huomioida laivan painopistettä laskiessa ja satamien luoksepäästävydessä. (Traut ym., 2014)

Tillig ja Rinsberg (2020) vertailivat artikkelissaan nykyisiä tutkimustuloksia roottoripurjeiden suorituskyvystä. Kävi ilmi, että jokaisella tarkastelun kohteena olleella reitillä on suuri taloudellinen potentiaali roottoripurjeiden suhteen, asennus ja kunnossapitokustannukset huomioiden. Roottoripurjetta hyödyntämällä ollaan raportoitu jopa 40 % säästöä polttoaineen kulutuksessa alustyyppistä ja reitistä riippuen. Näin suuri säästöpotentiaali sekä operoinnin helppous huomioon ottaen Flettner-roottorit ovat ehdottomasti yksi lupaavimmista vaihtoehdoista tuulienergian hyödyntämiseksi ja laivojen päästöjen alentamiseksi. (Tillig & Ringsberg, 2020)

Roottoripurjeita valmistaa esimerkiksi Norsepower (Norsepower, 2021a) ja Anemol Marine. (Anemol Marine, 2021). Norsepowerin roottoreita on käytössä esimerkiksi

Maersk Pelicanilla, jossa on Norsepowerin uutisoinnin mukaan saavutettu 8,2 % säästöt polttoaineen kulutuksessa. Maersk Pelican on esitetty kuvassa 9. (Norsepower, 2021b)



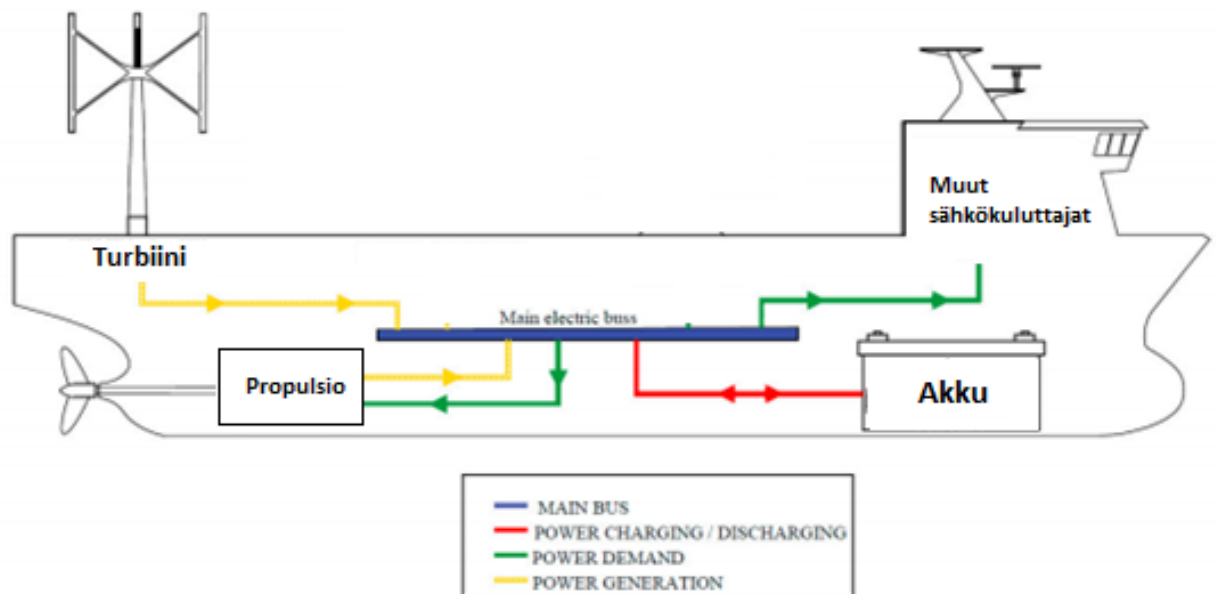
Kuva 9: Maersk Pelican (Norsepower, 2021b)

4 TUULIENERGIA SÄHKÖNTUOTOSSA

4.1 Turbiinit

Tuuliturbiinilla tarkoitetaan laitetta, jolla kerätään tuulen energia turbiinin pyörivän liikkeen avulla. (Kim & Yaakob, 2016) Kuvassa 10 on kuvattu, kuinka laivaan sijoitettua turbiinia voidaan käyttää muuttamaan tuulienergia sähköenergiaksi, joka sen jälkeen voidaan hyödyntää joko propulsiovoimana tai laivan muissa toiminnoissa. Keltaisella on kuvattu tehon muodostuminen, punaisella energian jakelu/säilöntä ja vihreällä energian kulutus.

Tuulen energiaa ei pystytä kuitenkaan hyödyntämään täysin, sillä vain osa turbiinin läpi kulkevan tuulen energiasta siirtyy turbiiniin sen pyöriessä. Betzin lain mukaan tuulesta saadaan hyödynnettyä vain 59.3 prosenttia sen kineettisestä energiasta. Tämä 59.3 % teoreettinen maksimi tunnetaan nimellä Betzin raja, joka saavutetaan vain, jos ulosvirtaavan ilman nopeus on 1/3 turbiiniin virtaavan ilman nopeudesta. Tuuliturbiinien yksi eduista on niiden kyky hyödyntää tuulienergiaa myös laivan operoissa suoraan vastatuuleen. (Böckmann & Steen, 2011)



Kuva 10: Tuuliturbiinin toimintaperiaate (mukaillen Juliä ym., 2020)

Tuuliturbiineista on tehty paljon tutkimusta maalla, mutta on tärkeää huomata, että merellä laivoissa turbiineihin kohdistuu erilaisia vaatimuksia. Ionescu ym. (2015) ovat nostaneet julkaisussaan esiin tärkeimpiä vaatimuksia turbiineille meriolosuhteissa, joita ovat esimerkiksi kyky kestää turbulenssia ja puuskaista tuulta, hiljaisuus ja meriolosuhteisiin sopiva pinnoitus. Muita vaatimuksia on kyky tuottaa energiaa pienilläkin tuulen nopeuksilla (3-5 m/s), sekä turbiinin oltava mittasuhteiltaan sopiva laivan kannelle asennettavaksi. Turbiini ei saa myöskään aiheuttaa laivan runkoon tärinää. (Ionescu ym., 2015)

Kuten muissakin laivan kannelle tulevissa systeemeissä, on turbiineissakin huomioitava laitteen sijoitteluun liittyvät rajoitukset. Turbiini ei saa olla miehistön tiellä, eikä se saa häiritä laivan toimintaa. Turbiini ei saa aiheuttaa vaaraa miehistölle, matkustajille tai muille laivoille tai eläimille. (Ionescu ym., 2015) Turbiinin, tai minkä tahansa kannelle lisättävän laitteen osalta on tärkeää huomioida myös laitteen asentamisen vaikutukset laivan toimintaan. (Kim & Yaakob, 2016)

Laivan leveys saattaa muuttua, mikäli turbiinin leveys on suurempi kuin laivan leveys. Tämä tulee ottaa huomioon kapeammilla merireiteillä, jossa toiset laivat ovat normaalia lähempänä. Laivan kokonaiskorkeus saattaa myös muuttua turbiinin takia, joka saattaa asettaa joidenkin satamien luoksepäästävyys suhteen rajoituksia. Tämän lisäksi on erittäin tärkeää huomioida turbiinin asentamisesta aiheutuvat vaikutukset aluksen painopisteeseen ja vakauteen. (Kim & Yaakob, 2016)

4.1.1 Horisontaalisen akselin turbiini (HAWT)

Horisontaalisen akselin tuuliturbiinilla tarkoitetaan kaikista yleisimpiä maallakin näkyviä tuulimyllyjä. Yleisin horisontaalisen akselin tuuliturbiinin - lyhyemmin HAWT – rakenne on kolmilapainen roottori maston päässä, joka on esitetty kuvassa 11. Kaksilapaisen roottorin hyödyt laivakäytössä ovat esimerkiksi sen pienempi massa ja komponenttimäärä. (Ionescu ym., 2015)



Kuva 11: Kolmilapainen horisontaalisen akselin turbiinin prototyyppi aluksessa (Carlson & Nilsson, 2015).

Kaksilapaisen turbiinin huonoja puolia ovat melu ja tärinä sekä huonompi tehokkuus verrattuna saman kokoiseen kolmilapaiseen turbiiniin. Huonompi tehokkuus voidaan mahdollisesti paikata kaksilapaisen roottorin hieman suuremmalla halkaisijalla, sillä roottorin ollessa pysähdyksissä ei rakenne ole yhtä korkea kuin kolmilapaisen roottorin. Roottori voidaan pysäyttää lapojen ollessa vaakatasossa, jolloin koko turbiinin korkeus on vain yhtä korkea kuin maston korkeus. (Ionescu ym., 2015)

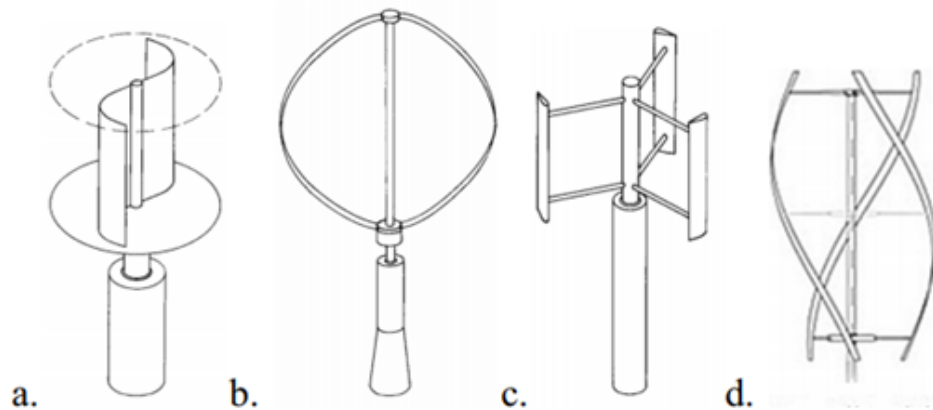
Kaksi- ja kolmelapaisen roottoreiden lisäksi voidaan käyttää myös useampilapaisia roottoreita, jolloin saadaan parempi aerodynaaminen tehokkuus. Tällöin kuitenkin lapojen tulee olla ohuempia, joka puolestaan vaikuttaa turbiinin rakenteen vahvuuteen, sillä turbiiniin kohdistuu tuulen aiheuttamia taivutusjännityksiä. Kääntökoneisto (eng. yaw motor) on tärkeä osa tuulienergian hyödyntämisen kannalta, sillä kääntökoneiston avulla tuulivoimala suuntaa itsensä optimaaliseen kulmaan tuulen suuntaan nähden. (Kim & Yaakob, 2016)

4.1.2 Vertikaalisen akselin turbiini (VAWT)

Vertikaalisen akselin tuuliturbiinilla (lyhyemmin VAWT) tarkoitetaan radiaaliturbiineita, joista tunnetuimmat mallit on esitelty kuvassa 12. Toisin kuin horisontaalisen akselin turbiini, VAWT ei tarvitse kääntökoneistoa, vaan on kykenevä hyödyntämään tuulen

kaikista suunnista. Muita VAWT-mallin etuja HAWT-malliin verrattuna on esimerkiksi mahdollisuus rakentaa matalammiksi ja vakaammiksi, sillä painopiste on matalalla. VAWT-mallin generaattorin huollettavuus on helpompaa, sillä generaattori voidaan sijoittaa matalammalle. Toiminta on myös turvallisempaa matalamman pyörimisnopeuden takia, sekä VAWT on HAWT:ia äänettömämpi malli. Malliin ei myöskään kohdistu niin suuria vaihtuvia gravitaatiovoimia, joka yleensä on rajoittava tekijä HAWT-mallien koossa. (Kim & Yaakob, 2016)

Darrieus ja Savonius –malleista Darrieus on yleisesti pidemmälle kehitelty, sillä se pystyy hyödyntämään tuulen energian tehokkaammin. Savonius –turbiini ei pysty pyörimään tuulen nopeutta nopeammin, kun taas Darrieus pystyy. (Kim & Yaakob, 2016)



Kuva 12: a) Savonius b) Darrieus classic c) H-Darrieus d) Helical Darrieus (Ionescu ym., 2015).

4.1.3 Ilmassa lentävä turbiini (AWT)

Ilmassa lentävällä turbiinilla (lyhyemmin AWT) tarkoitetaan turbiinia, jota lennätetään lapamaisen siiven avulla ilmassa (kuva 13). Siipi turbiiniin on kiinnitetty köydellä laivan keulaan, jossa se lentää korkeuksissa ympyrän muotoista liikerataa hyödyntäen siellä suuremmat tuulen nopeudet. AWT:n liikerata on kuvattu kuvassa 14. Ilma liikkuu turbiinin lapojen läpi saaden turbiinit pyörimään. Koska AWT pyörii ympyränmuotoista liikerataa ilmassa, on sen toimintaperiaate samanlainen kuin perinteisessä tuulimyllyssä. Vaikka AWT:n rakenne on pienempi tuulimyllyyn verrattuna, saadaan siitä kuitenkin

hyvä hyöty, sillä tuulimyllyissä 50 % saadusta kokonaisenergiasta tuotetaan turbiinin lavan kärkiosalla, viimeisellä 25 % lavasta. (Gilje, 2013)



Kuva 13: Ilmassa lentävä turbiini (Gilje, 2013).



Kuva 14: AWT:n liikerata ilmassa (Gilje, 2013).

Gilje (2013) tutki diplomityössään AWT:n suorituskykyä ja esitti, että AWT:n lentämiseksi vaaditaan 4-5 m/s tuulen nopeus ja sähköenergian tuottamiseksi vaaditaan tuulta vähintään 9 m/s nopeudella. 10 m/s tuulilla Gilje arvioi turbiinin tuottavan noin 5 MW sähköä. Tutkimuksen lopputulos oli, että ilmassa lentävä turbiini ei vielä niillä ominaisuuksilla sopinut käytettäväksi laivan polttoaineen vähentämisessä. (Gilje, 2013)

Mitään tässä kappaleessa käsiteltyjä turbiinimalleja ei ole vielä tuoteistettu laivakäyttöön.

5 MENETELMIEN VERTAILU

Tuulienergia lienee yksi harvoista teknologioista, jonka avulla voidaan saavuttaa kaksinumeroisia lukuja polttoaineen säästöjen suhteen. Huomioitavaa kuitenkin on, että eri teknologioiden tuomat säästöt vaihtelevat pitkälti aluksesta, laivan reitistä ja sääolosuhteista riippuen. (Lloyd's Register, 2015)

Useat eri tahot ovat tehneet laskelmia ja tutkimuksia tuulta hyödyntävien teknologioiden tuomista polttoainesäästöistä. Esimerkiksi Pearson ym. (2014) laskelmoivat tutkimuksessaan kahden Flettner-roottorin tuovan 10 % säästöt aluksen vuosittaisista polttoainekuluista, kun taas Tillig ym. (2020) osoittivat 30 % säästöjen olevan mahdollisia tankkereille ja 14 % säästöjen RoRo-aluksille Flettner-roottorin avulla. Myös Traut ym. (2012) osoittivat kolmen Flettner-roottorin bulkkerialuksella tuovan 16 % mahdolliset säästöt, ja Traut ym. (2014) osoittivat yhden Flettner-roottorin keskimääräisen tuulienergiasta saavan tehon vaihtelevan noin 193 kW ja 373 kW välillä.

Talluri ym. (2016) osoittivat vertikaalisen akselin turbiinin tuovan 14-16 % säästöt polttoaineen kulutuksessa, ja Shukla & Ghosh (2009) esittivät siipipurjeelle olevan mahdollista saavuttaa 8,3 % säästöt. Leloup ym. (2014) osoittivat laskelmissaan 10 % säästöt polttoaineen kulutuksessa leijapurjeella mahdollisiksi lähes 10 m/s tuulen nopeudella, sekä 50 % säästöt 15,7 m/s tuulinopeuksilla.

Lienee siis selvää, että kaikki tässä työssä esitellyt teknologiat vähentävät laivojen polttoaineen kulutusta tuulesta saatavan energian avulla. Huomioitavaa on kuitenkin eri menetelmien vaatimat optimiolosuhteet. Roottoripurjeet toimivat parhaiten, kun tuuli osuu roottoriin 90 asteen kulmasta laivan kulkusuuntaan nähden, kun taas useimmat muut ratkaisut toimivat paremmin tuulen suunnan ollessa yli 90 astetta laivan kulkusuuntaan nähden. Mikäli tavoitteena on saavuttaa merkittäviä säästöjä, tarvitaan yleensä suuriin kaupallisiin aluksiin useampi kuin yksi laite. Usealla laitteella laivan kannella saattaa kuitenkin olla negatiivinen vaikutus toistensa suorituskykyyn, sekä myös esimerkiksi laivan komentosilta saattaa vaikuttaa tuulen virtaukseen. (Ballini ym., 2017)

Flettner-roottorit aiheuttavat laivaan kallistavia voimia suhteellisen vähän, kun taas muut mastorakenteiset laitteet kallistavat alusta huomattavasti enemmän. Tuulienergiasta propulsiovoimaa saavat laivat joutuvat mukauttamaan moottorilta vaadittavaa propulsiotehoa tuulesta saatavan työntövoiman perusteella. Tämä saattaa aiheuttaa nopeitakin nopeudenmuutosvaatimuksia moottorille. Dieselkoneet, jotka pyörittävät suoraan potkurin akselia, ovat hitaita vastaamaan pyörimisnopeuden muutosvaatimuksiin. Sopivaa tuulienergiaa hyödyntävää menetelmää laivaan valittaessa tulisi aina kiinnittää huomiota myös rungon rakenteeseen ja muuhun laivassa käytettyyn tekniikkaan mahdollisimman hyvän suorituskyvyn takaamiseksi. (Ballini ym., 2017)

Näiden seikkojen takia eri menetelmistä saatavia hyötyjä on vaikea arvioida. Laivan rungonmuoto, reitti, tavoitenopeus ja tuuliolosuhteet määräävät, miten tehokkaita eri menetelmät laivassa ovat. Parasta menetelmää valittaessa tulisi siis aina tarkastella asiaa alus- ja reittikohtaisesti. Tämän takia ei välttämättä ole edes mahdollista pystyä laskemaan polttoaineen säästöä tarkasti tai vertailukelpoisesti.

6 TUULIENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN TULEVAISUUDESSA

Vaikka tuulienergian hyödyntäminen saattaisi tuoda jopa kaksinumeroisia säästöjä polttoaineen kulutuksessa, on menetelmien hyödyntämisessä vielä paljon epävarmuuksia. Laivateollisuus on tunnettu hitaudestaan muutoksien suhteen. Uudet, pitkälti vielä konseptitasolla olevat teknologiat herättävät paljon kysymyksiä. Olisiko mahdollista saavuttaa tarpeeksi säästöjä jo olemassa olevilla ja hyväksi todetuilla menetelmillä?

Uudet menetelmät, joiden näyttö perustuu toistaiseksi vielä pitkälti vain arvioihin, ovat aina riskisijoitus laivan omistajalle. Koska tuulienergiaa hyödyntävät teknologiat ovat lähes poikkeuksetta suurikokoisia ja pitkälti automatisoituja, on tällaisen systeemin lisääminen laivaan myös kallista. Vaihtoehtoiset menetelmät polttoaineen kulutuksen vähentämiseksi ja muut, halvemmat polttoaineet (esimerkiksi LNG, metanoli, etanoli, biodiesel ja typpi) vaikuttavat tuulienergian hyödyntämisen kiinnostavuuteen. Polttoaineen hinta vaikuttaa myös systeemin takaisinmaksuaikaan: mitä alhaisempi polttoaineen hinta on, sitä kauemmin systeemillä menee maksaa itsensä takaisin. Laivan elinikä nä tapahtuvat reittimuutokset täytyy ottaa myös huomioon, sillä tietyille reitille optimoitu teknologia ei välttämättä tuota toivottuja tuloksia toisella reitillä. (Lloyd's Register, 2015; Atkinson ym., 2018)

IMO:n päästövähennystavoitteiden myötä myös merenkulussa ollaan kiinnitetty huomiota uusiutuviin energiamuotoihin ja vihreämmästä merenkulusta on tullut trendi. Tuulienergiaan investoimalla yrityksellä on mahdollisuus houkutellessa asiakkaita ja parantaa yrityksen imagoa. Korkeat polttoainehinnat, joiden ennustetaan pysyvän ylhäällä, lisäävät mielenkiintoa kehittää polttoainetta säästäviä menetelmiä. Nykyinen 'slow steaming' -menetelmä, jolla pyritään vähentämään polttoaineen kulutusta, tarkoittaa laivan operoimista alhaisilla nopeuksilla. Tuulienergiaa hyödyntävät menetelmät, jotka sopivat yleisesti hyvin etenkin matalille laivan nopeuksille, voisi slow steaming -menetelmään yhdistettynä päästä tulevaisuudessa entistä parempiin tuloksiin. (Atkinson ym., 2018)

7 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin eri tuulienergiaa hyödyntäviä teknologioita ja niiden tuomia mahdollisia säästöjä polttoaineen kulutuksessa. Tutkimuksen perusteella säästöjä on mahdollista saada esitellyillä menetelmillä parhaimmillaan jopa 50 %, mutta keskimäärin kuitenkin noin 20 %. Jotta esitellyistä teknologioista saataisiin mahdollisimman suuri hyöty, tulisi sopivin teknologia valita aina laiva- ja reittikohtaisesti.

Vaikka leijapurjeella on saavutettu suurimpia säästölukemia, osoittautui roottoripurje näiden tulosten perusteella luotettavimmaksi valinnaksi. Flettner-roottori toimii monessa tuulensuunnassa ja -nopeudessa kohtalaisen hyvin, eikä suorituskyvyssä tästä johtuen ollut kovin suurta vaihtelua esimerkiksi reitistä tai vuodenajasta riippumatta. Flettner-roottorista vuoden aikana saatava hyöty osoittautui siis keskimäärin parhaimmaksi.

Vaikka tutkimuksia on tehty eri menetelmistä runsaasti, perustuu tämänhetkinen tieto pitkälti vain arvioihin ja laskuihin. Moni menetelmä on vielä konseptitasolla. Tuulienergiaa hyödyntäviä teknologioita ei ole kaupallistettu vielä kuin vain kourallinen. Jotta päästötavoitteisiin päästään, olisi tärkeää jatkaa tutkimuksia ja soveltaa menetelmiä myös käytännössä.

LÄHDELUETTELO

Anemoui Marine. (2021). Anemoui Rotor Sails: Propelling ships into a sustainable future. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.anemoimarine.com> [viitattu 23.6.2021].

Arief, I. S., Santoso, A., & Azzam, A. (2018). Design of Flettner Rotor in Container Carrier 4000 DWT with CFD Method. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 2(2).

Ariffin, N. I. B., & Hannan, M. A. (2020). Wingsail technology as a sustainable alternative to fossil fuel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 788, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.

Atkinson, G., Nguyen, H., & Binns, J. (2018). Considerations regarding the use of rigid sails on modern powered ships. *Cogent Engineering*, 5(1), 1543564.

Babarit, A., Clodic, G., Delvoye, S., & Gilloteaux, J. C. (2020). Exploitation of the far-offshore wind energy resource by fleets of energy ships—Part 1: Energy ship design and performance. *Wind Energy Science*, 5(3), 839-853.

Ballini, F., Ölçer, A. I., Brandt, J., & Neumann, D. (2017). Health costs and economic impact of wind assisted ship propulsion. *Ocean Engineering*, 146, 477-485.

Bordogna, G., Muggiasca, S., Giappino, S., Belloli, M., Keuning, J. A., Huijsmans, R. H. M., & van't Veer, A. P. (2019). Experiments on a Flettner rotor at critical and supercritical Reynolds numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 188, 19-29.

Böckmann, E., & Steen, S. (2011). Wind turbine propulsion of ships. *Second international symposium on marine propulsors, Hamburg, Germany*.

Carlson, O., Nilsson, P. (2015) Wind turbines on ships.

Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., ... Hoen, M. (2014). Third IMO Greenhouse gas study 2014. London: International Maritime Organization (IMO)

Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental science & technology*, 41(24), 8512-8518.

Dykstra Naval Architects. (2021). WASP (Ecoliner) [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.dykstra-na.nl/designs/wasp-ecoliner/> [viitattu 28.6.2021]

Everts, M., Ebrahim, R., Kruger, J. P., Miles, E., Sharifpur, M., & Meyer, J. P. (2014). Turbulent flow across a rotating cylinder with surface roughness. 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Orlando, USA.

Gilje, K. M. (2013). Airborne Wind Turbines for Ship Propulsion. Master's thesis, Norwegian university of Science and Technology.

Glownia, J. (2007). Lift [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://large.stanford.edu/courses/2007/ph210/glownia2/> [viitattu 28.6.2021]

Finlex. (2021). 22.12.2005/1122 Väylämaksulaki [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2005/20051122> [viitattu 23.6.2021].

International Maritime Organization. (2018). UN body adopts climate change strategy for shipping [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx> [viitattu 23.6.2021].

Ionescu, R. D., Szava, I., Vlase, S., Ivanoiu, M., & Munteanu, R. (2015). Innovative solutions for portable wind turbines, used on ships. *Procedia Technology*, 19, 722-729.

Julià, E., Tillig, F., & Ringsberg, J. W. (2020). Concept Design and Performance Evaluation of a Fossil-Free Operated Cargo Ship with Unlimited Range. *Sustainability*, 12(16), 6609.

Kim, J., & Park, C. (2010). Wind power generation with a parawing on ships, a proposal. *Energy*, 35(3), 1425-1432.

Kim, T. K., & Yaakob, O. (2016). Adaptation of Wind Power for Ship Essential Service System Onboard. *Journal of Transport System Engineering*, 1, 08-19.

Lele, A., & Rao, K. V. S. (2016). Ship propulsion strategies by using wind energy. *2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT)* (pp. 1-6). IEEE.

Luyu, C., Shunhuai, C., & Yigong, W. (2010). Analysis on sail selection and energy conservation of a panamax bulk carrier. *2010 International Conference on Advances in Energy Engineering* (pp. 182-185). IEEE.

Lloyd's Register. (2015). Wind-powered Shipping: A Review of the Commercial, Regulatory and Technical Factors Affecting Uptake of Wind-assisted Propulsion. *Lloyd's Register, London*.

Naaijen, P., & Koster, V. (2007). Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite. *2nd International Conference on Marine Research and Transportation* (pp. 45-53).

NASA. (2021). Welcome to the beginner's guide to propulsion [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/bgp.html> [viitattu 27.6.2021].

Neoline. (2021). Press release [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.neoline.eu/wp-content/uploads/2021/06/Press-Release-Neoline-signs-a-LOI-with-Neopolia-06152021-.pdf> [viitattu 23.6.2021]. 3 s.

Norsepower. (2021a). Norsepower [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.norsepower.com> [viitattu 23.6.2021].

Norsepower. (2021b). Norsepower Rotor Sails Confirmed Savings Of 8.2% Fuel And Associated Co2 In Maersk Pelican Project [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.norsepower.com/post/norsepower-rotor-sails-confirmed-savings-of-8-2-fuel-and-associated-co2-in-maersk-pelican-project/> [viitattu 23.6.2021].

Oceanbird. (2021). The wind carries a shipping revolution. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://theoceanbird.com/> [viitattu 23.6.2021].

Pearson, D. R. (2014). The use of flettner rotors in efficient ship design. *Proceedings of the Influence of EEDI on Ship Design Conference*.

Reche-Vilanova, M., Hansen, H., & Bingham, H. B. (2021). Performance Prediction Program for Wind-Assisted Cargo Ships. *Journal of Sailing Technology*, 6(01), 91-117.

Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., O’Keeffe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D. S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J. J., Hoen, M., ... Pandey, A. (2015). *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*. International Maritime Organization

Skysails, (2021a). Technology [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://skysails-marine.com/technology.html>. [viitattu 23.6.2021].

SkySails. (2021b). Skysails propulsion system for cargo vessels [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://skysails-group.com/wp-content/uploads/2021/05/SkySailsMarine_Brochure_EN_web.pdf. [viitattu 23.6.2021]. 20 s.

Tillig, F., & Ringsberg, J. W. (2020). Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships. *Ocean Engineering*, 211, 107603.

Traut, M., Gilbert, P., Walsh, C., Bows, A., Filippone, A., Stansby, P., & Wood, R. (2014). Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*, 113, 362-372.

Windship. (2021). Windship presents the True Zero Emissions Solution [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://windshiptechnology.com> [viitattu 23.6.2021].