

# Uiton käyttövoimaratkaisut

Tutkimus eri käyttövoimien soveltuvuudesta  
uitossa käytettäville apualuksille

---

Metsätehon tulostulosarja 5/2024

Roope Ketoja

Vaasan yliopisto

# Tiivistelmä

- Työn tavoitteena oli selvittää suositeltavin vähäpäästöinen käyttövoimaratkaisu uiton apualuksiin.
- Apualuksen käyttövoimaratkaisuna tutkittiin uusiutuvaa polttoöljyä, rinnakkais- ja sarjahybrididiä sekä polttokennohybrididiä.
- Uusiutuvan polttoöljyn käyttö osoittautui parhaaksi ratkaisuksi sekä päästöjen että kustannusten näkökulmasta.
- Tämä tulostalvosarja on tiivistelmä Ketojan (2024) diplomityöstä.

# Johdanto

- Uittokuljetusten merkitys on kasvanut Suomen puukuljetuksissa.
  - Ukrainan sodan seurauksena puun tuonti Venäjältä loppui kokonaan.
- Uittokuljetusten volyymin kasvattamiseksi ja päästöjen pienentämiseksi apualuksia täytyy lisätä ja uusia sekä ottaa niissä käyttöön nykyistä puhtaampia käyttövoimaratkaisuja.
- Työ toteutettiin 10/2023–4/2024.
- Tutkimuksessa olivat mukana:
  - Vaasan yliopisto (Roope Ketoja, Seppo Niemi, Katriina Sirviö)
  - Metsäteho Oy (Pirjo Venäläinen)
  - Järvi-Suomen Uittoyhdistys (Esa Korhonen)
  - Uittopojat Oy (Reino Nurmi)

# Työn sisällöstä

- Tutkimuksessa luotiin katsaus käyttövoimiin liittyvään sääntelyyn.
  - EU:n, IMO:n ja Suomen ilmastotavoitteet edistävät vaihtoehtoisten käyttövoimien saatavuutta ja käyttöönottoa alusliikenteessä (Euroopan komissio 2023, Valtioneuvosto 2023).
- Työssä käsiteltiin polttomoottori-, akku- ja polttokennoteknologiaa sekä hybridiratkaisuja, joissa em. teknologioita hyödynnetään yhdessä.
- Tapaustutkimukseen valitut uiton apualusten käyttövoimaratkaisut olivat:
  - uusiutuvan polttoöljy
  - rinnakkaishybridi (kevyt polttoöljy + sähkö)
  - sarjahybridi (kevyt polttoöljy + sähkö)
  - polttokennohybridi (vihreä vety + sähkö).
- Vaihtoehtoja arvioitiin hiilidioksidipäästöjen sekä käyttövoima- ja hankintakustannusten näkökulmasta.

# Teknologiat 1

- Dieselmoottori
  - Pääasiallinen voimantuottaja suurta tai pitkäaikaista tehoa vaativissa aluksissa.
    - Polttoaineilla suuri energiantiheys ja laaja saatavuus.
    - Parempi hyötysuhde kipinäsytytteisiin moottoreihin verrattuna (Heywood 1998).
  - Hyötysuhde parhaimmillaan suurilla kuormituksilla (DNV 2015).
  - Varjopuolena fossiilisia polttoaineita käytettäessä kasvihuone- ja lähipäästöt.
- Akkuteknologia
  - Pienen energiatihedyyden takia alusten täysi sähköistäminen vaativaa.
  - Voidaan käyttää osana hybridiratkaisua, jolloin aluksen polttoaineen kulutusta pystytään vähentämään.
  - Akkujen käyttöikä, energiatiheys, turvallinen käyttö ja latausnopeudet kehittyvät jatkuvasti (S&P Global 2024, Quantumscape 2024).
  - Hankintakustannusten odotetaan laskevan (GoldmanSachs 2023). Meriakkujen hinnat ovat tosin vielä kalliita (Sustainable Ships 2024).



# Teknologiat 2

- Polttokennot
  - Sähköntuotantolaite, joka muuttaa polttoaineen kemiallisen energian sähköksi ja lämmöksi (O'hayre ym. 2016).
  - Voidaan käyttää useita erilaisia polttoaineita, kuten vetyä, maakaasua tai metanolia (Tronstad ym. 2017).
  - Vihreää vetyä käytettäessä polttokenno mahdollistaa aluksen päästöttömän käytön.
  - Korkea hyötysuhde (50–60 %), lämmöntalteenotolla jopa 85 % (Tronstad ym. 2017).
  - Mahdollistaa akkuja pidempiaikaisen toiminnan (O'hayre ym. 2016).
    - Energiakapasiteetti riippuu ulkoisesta polttoainetankista.
  - Polttokennot eivät vielä laajasti käytössä oleva teknologia.
    - Tuotantomäärien kasvaessa hintojen odotetaan laskevan (Aarskog ym. 2020) .

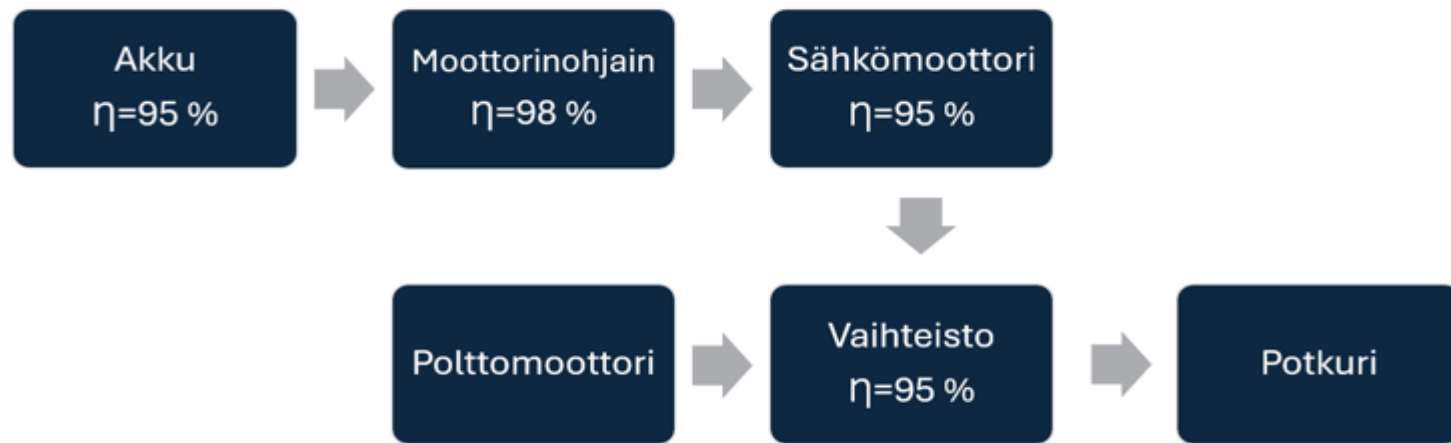
# Hybridiratkaisut

- Hybridialus hyödyntää kahta tai useampaa käyttövoimaa, esimerkiksi dieseliä ja sähköä.
- Hybrideissä on tarkoituksena optimoida polttomoottorin käyttöä energiavaraston avulla (DNV 2015).
  - Pienen kuormituksen aikana polttomoottori pystytään pysäyttämään ja tarvittava energia ottamaan energiavarastosta.
  - Korkeampi hyötysuhde, pienempi kulutus, vähemmän päästöjä.
- On olemassa useita erilaisia hybridijärjestelmiä (Geertsma ym. 2017).
  - Pääkomponentteina em. teknologiat, sähkömoottorit, tehoelektroniikan laitteet.
  - Voimansiirtojärjestelmän komponenttien hyötysuhteet vaikuttavat merkittävästi hybrideistä saatavaan hyötyyn (HybridMarine 2024, Johannesen ja Heine 2021).



# Apualukselle tutkittu rinnakkaishybridi

- Poltto- ja sähkömoottori kytketty vaihteiston kautta potkuriin.
- Aluksen koosta johtuen sähköntuottajana pelkästään akku.



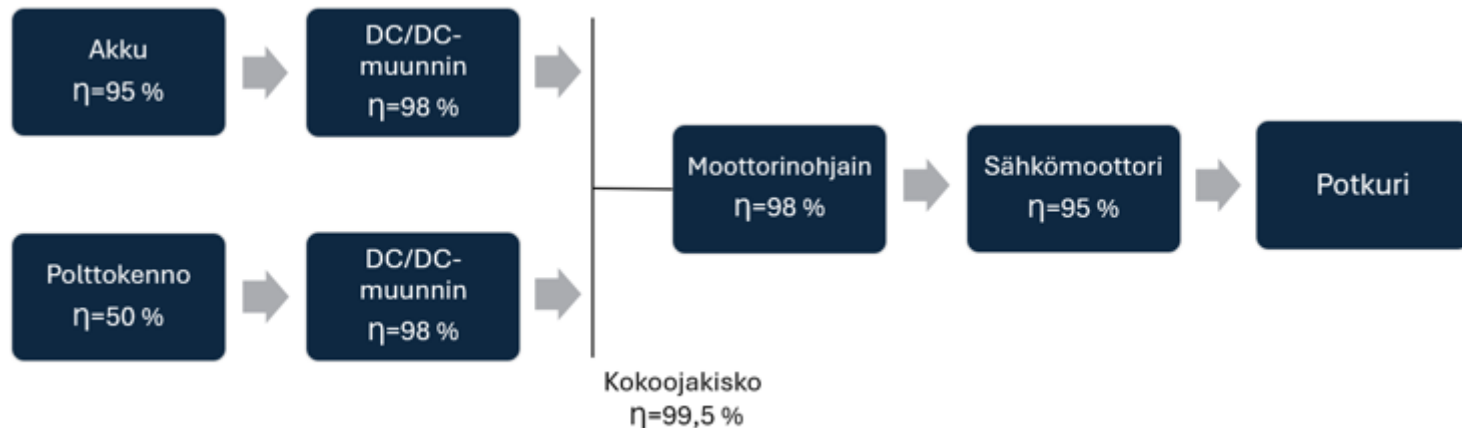
# Apualukselle tutkittu sarjahybridi

- Sarjahybridissä akku ja dieselgeneraattori toimittavat sähköä potkuria pyörittävälle sähkömoottorille.
- Sähköisen propulsiojärjestelmän konsepti.
  - Ei mekaanista vaihteistoa -> aluksen melu- ja värinätasot matalat.



# Apualukselle tutkittu polttokennohybridi

- Liikenteen sovelluksissa polttokennon rinnalla käytetään akkua.
- Polttokenno toimittaa alukselle sen keskimäärin tarvitseman tehon ja akku vastaa tehopiikkeihin esim. aluksen kiihdyttäessä.
- Polttokennon polttoaineena uusiutuvilla energianlähteillä valmistettu vety.
- Sarjahybridin tapaan käyttäjäystävällinen ratkaisu.



# Laskelmien toteutuksesta

- Referenssialukseksi valittiin 190 kW:n tehon omaava apualus.
- Valittiin reitti, joka kattaa yli 1/3 Järvi-Suomen Uittoyhdistyksen (JSUY) vuosittaisesta kuljetusvolyymistä.
- Luotiin apualuksen kuormitusprofiilit.
- Laskettiin polttoaineiden/sähkön kulutus nykytilanteelle ja vaihtoehtoisille ratkaisuille.
- Käyttövoimakustannukset sisältävät vain polttoaineesta ja sähköstä aiheutuvat kustannukset.
- Tutkimuksesta löytyy myös herkkyystarkasteluja käyttövoimien eri hinnoilla.

# Hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaali

- Vaihtoehtojen elinkaaren- ja käytönaikaisia hiilidioksidipäästöjä verrattiin nykytilanteeseen (polttoöljy, jossa jakeluvaihteen mukainen bio-osuus).

| Käyttövoima          | Elinkaaren aikaiset päästöt | Käytönaikaiset päästöt |
|----------------------|-----------------------------|------------------------|
| Uusiutuva polttoöljy | –82 %                       | –100 %                 |
| Rinnakkaishybridi    | –28 %                       | –29 %                  |
| Sarjahybridi         | –23 %                       | –24 %                  |
| Polttokennohybridi   | –96 %                       | –100 %                 |

# Voimansiirtojärjestelmien hankintakustannukset

- Uusiutuvan polttoöljyn käyttö (polttomoottori) 72 000 €.
  - Kaluston hankintakustannukset pysyvät nykyisellä tasolla.
  - Polttoaineen käyttö ei edellytä muutoksia aluksen moottoriin.
- Rinnakkaishybridi 350 000 €.
  - Meriakkujen osuus 250 000 €.
  - Vesiliikenteen akkujärjestelmät huomattavasti kalliimpia kuin maantieliikenteen.
- Sarjahybridi 380 000 €.
  - Vaatii mm. rinnakkaishybridiä suuremman sähkömoottorin ja moottorinohjaimen.
- Polttokennohybridi 510 000 €.
  - Polttokennojärjestelmät ja vedyn varastointi kalliita.

# Apualuksen vuosittaisten käyttövoimakustannusten muutos nykytilanteeseen verrattuna

| Käyttövoima          | Kustannusten muutos % | Kustannusten muutos € |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Uusiutuva polttoöljy | +60 %                 | +6 500 €              |
| Rinnakkaishybridi    | −12 %                 | −1 300 €              |
| Sarjahybridi         | −7 %                  | −750 €                |
| Polttokennohybridi   | +88 %                 | +9 600 €              |

# Johtopäätökset 1

- Uusiutuva polttoöljy on suositeltavin vaihtoehto uiton apualukselle sekä taloudellisesti että päästöjen pienentämisen suhteen.
- Käyttövoimakustannukset voivat kuitenkin kasvaa merkittävästi, mikäli uusiutuva polttoöljy otetaan käyttöön kaikissa aluksissa.
- Apualuksen pienten käyttövoimakustannusten takia hybriditeknologioiden hankintakustannuksia ei pystytä kattamaan, vaikka hybridi parantaa polttoainetehokkuutta.
- Pienet käyttövoimakustannukset johtuvat uittotoiminnan kausiluonteisuudesta ja kevyen polttoöljyn edullisuudesta.

# Johtopäätökset 2

- Hybriditeknologioiden suuret hankintakustannukset alusliikenteessä johtuvat siitä, että olosuhteet vesillä ovat vaativat, sekä siitä, että vesiliikenteen sähköistäminen ei ole yhtä pitkällä kuin maantieliikenteessä.
- Hybriditeknologioiden uudelleenarviointi tulevaisuudessa edellyttää uittokuljetusmäärien moninkertaistumista ja polttoöljyn hinnan nousua.
- Rinnakkaishybridi soveltuisi sarjahybridiä paremmin apualuksen käyttövoimaratkaisuksi päästöjen ja kustannusten näkökulmasta.
- Sarjahybridi olisi puolestaan rinnakkaishybridiä käyttäjäystävällisempi vaihtoehto.
- Polttokennohybridillä aluksen päästöt voidaan pienentää lähes nollaan, minkä lisäksi se mahdollistaa pitkät toimintasäteet. Ratkaisun käyttöönotto edellyttää kuitenkin polttokennoteknologian ja vihreän vedyn kustannusten merkittävää laskua.

# Jatkotutkimustarpeet 1

- Uiton käyttövoimakysymys on seuraavaksi kohdistettava päähinaajiin.
  - Kuluttavat enemmän polttoainetta.
  - Moottoriteho ja vuotuiset käyttötunnit suuremmat.
- Sähköhybridit voivat olla tulevaisuudessa perusteltu käyttövoimaratkaisu, mikäli:
  - Hybriditeknologioiden hankintakustannukset laskevat.
  - Polttoöljyjen hinnat nousevat.
- Sähköhybridin soveltuvuuden selvittämiseksi on tutkittava päähinaajan käyttöön ja rahoitukseen liittyvät asiat.



# Jatkotutkimustarpeet 2

- Jotta hybriditeknologioita tarjoavat yritykset pystyisivät räätälöimään päähinaajalle optimaalisen ratkaisun, päähinaajan käytöstä tulisi saada mahdollisimman täsmällistä tietoa.
- Tarkan kuormitusprofiilin muodostamiseksi päähinaajan moottorin kuormitusta suositellaan mitattavan uittokauden aikana.
- Maasähkön saatavuuteen ja kustannuksiin liittyvät seikat on selvitettävä.
- Akku- ja energianhallintajärjestelmän suunnittelua varten tulee selvittää, kuinka pitkään aluksen on pystyttävä toimimaan ennen latausta, ja kuinka kauan alusta voidaan ladata.

# Jatkotutkimustarpeet 3

- Päähinaajankin sähköhybridin hankintakustannukset saattavat olla liian suuret suhteutettuna päästöjen vähennyspotentiaaliin ja käyttövoimakustannussäästöihin.
- Alushankinnoille mahdollisesti saatavilla olevat taloudelliset kannustimia on tarpeen selvittää.
  - Esim. Pokela ym. (2022) ovat tutkineet valtion mahdollisuuksia tukea investointeja alusliikenteen päästöjen vähentämiseksi.

# Lähdeluettelo

Aarskog F, Danebergs J, Strømgren T, Ulleberg Ø (2020) Energy and cost analysis of a hydrogen driven high speed passenger ferry. IOS Press Content Library. [Energy and cost analysis of a hydrogen driven high speed passenger ferry - IOS Press](#)

DNV (2015) The future is hybrid - A guide to use of batteries in shipping. [The future is hybrid - A guide to use of batteries in shipping \(dnv.com\)](#)

Euroopan komissio (2023) Maritime transport emissions: Commission welcomes new IMO climate ambition for 2030, 2040 and 2050 and calls to set transition in motion. [Commission welcomes IMO climate ambition \(europa.eu\)](#). Viitattu 2.1.2024.

Geertsma R.D, Negenborn R.R, Visser K, Hopman J.J (2017) Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. Applied Energy, Volume 194. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917301940>

GoldmanSachs (2023) Carbonomics. Equity Research 27.11.2023. [Carbonomics Updated cost curve shows diverging trends between power and transport \(goldmansachs.com\)](#)

Heywood J (1988) Internal combustion engine fundamentals. [Internal Combustion Engine Fundamentals, Second Edition \(accessengineeringlibrary.com\)](#)

HybridMarine (2023) What is a hybrid? Viitattu 17.12.2023.



Johannesen P, Heine U (2021) Dispelling the myth of high losses in modern electrically enhanced propulsion systems. Wärtsilä 17.11.2021. [Dispelling the myth of high losses in modern electrically enhanced propulsion systems \(wartsila.com\)](https://www.wartsila.com). Viitattu 11.1.2024.

Ketoja R (2024) Uiton käyttövoimaratkaisut – Tutkimus eri käyttövoimien soveltuvuudesta uitossa käytettäville apualuksille. Diplomityö Vaasan yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2024042522094>

O'hayre R, Cha S-W, Colella W, Prinz F. B (2016) Fuel cell fundamentals. John Wiley & Sons. [Fuel Cell Fundamentals | Wiley Online Books](#)

Pokela P, Beniard M, Järvinen K, Vaahtera A (2022) Selvitys valtion mahdollisuuksista tukea alusliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä. Liikenne- ja viestintäministeriö. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164431/LVM\\_2022\\_14.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164431/LVM_2022_14.pdf)

Quantumscape (2024) Delivering on the promise of solid-state technology. [Solid State Battery Technology | QuantumScape](#). Viitattu 22.1.2024.

S&P Global (2024) The Future of Battery Technology. [The Future of Battery Technology | S&P Global \(spglobal.com\)](#). Viitattu 8.1.2024.

Sustainable Ships (2024) Cost Overview – Batteries. [Cost Overview - Batteries — Sustainable Ships \(sustainable-ships.org\)](#). Viitattu 23.1.2024.

Tronstad T, Åstrand H, Haugom G, Langfeldt L (2017) Study on the use of fuel cells in shipping. European Maritime Safety Agency. [2016 EMSA Study on the use of Fuel Cells in Shipping.pdf \(dieselduck.info\)](#)

Valtioneuvosto (2023) Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma 20.6.2023. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165042/Paaministeri-Petteri-Orpon-hallituksen-ohjelma-20062023.pdf>

