



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Tiia Niku

Laatujohtamisen merkitys monipolttainemoottoreiden valmistuksessa

Katsaus meriteollisuuden nykytilanteeseen

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Tuotantotalous

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Tiia Niku		
Tutkielman nimi:	Laatujohtamisen merkitys monipolttoainemoottoreiden valmistuksessa: Katsaus meriteollisuuden nykytilanteeseen		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Koulutusohjelma:	Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma		
Opintosuunta:	Tuotantotalous		
Työn ohjaaja:	Tauno Kekäle		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	42

TIIVISTELMÄ:

Monipolttoainemoottorit pyrkivät vastaamaan tulevaisuuden merenkulun vaatimuksiin ympäristöystävällisyyden ja tehokkuuden kautta. Tämä työ käsittelee laatujohtamisen merkitystä monipolttoainemoottoreiden valmistusprosessissa. Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, johon on pyritty valitsemaan relevantteja ja ajankohtaisia aineistoja hyödyntäen monipuolisia hakulauseita eri tietokannoista. Tavoitteena on löytää merkityksiä laatujohtamisen ja moottoreiden valmistusprosessin välillä, ja selvittää, mitä kaikkea tulee ottaa huomioon laatujohtamista suunniteltaessa.

Laatujohtaminen voidaan määritellä usein eri tavoin, ja se sisältää useita laadun käsitteitä, kuten jatkuvaa parantamista, riskienhallintaa ja näiden toteuttamiseen tarvittavia työkaluja. Luonteeltaan monialainen, koko organisaatiota osallistava toiminta käsittää eri filosofioita ja on muodostunut historian saatossa nykyiseen malliinsa. Tämä malli muokkaantuu organisaation tarpeisiin, ja merenkulkualalla laatujohtamiseen vaikuttaa myös ulkoiset tahot, kuten Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO, sekä luokituslaitokset ja lippuvaltioiden säädökset.

Keskityn työssäni käsittelemään monipolttoainemoottoreista DF-moottoreita, jotka hyödyntävät vaihtoehtoisia polttoaineita fossiilisille polttoaineille. Näistä polttoaineista esimerkkejä ovat korkean energiatihedden omaava vety, puhtaan polttotapahtuman tarjoava metanoli sekä päästövähennyksiä tarjoavat kaasut, kuten synteettinen kaasu. Valmistusprosessiltaan alihankintaan luottava menetelmä tarjoaa strategisen suunnittelun ja aikataulutuksen, ja prosessin viimeisenä vaiheena suoritettava koeajo varmistaa tuotteiden laatuvaatimusten täyttyvän.

Tuloksiin lukeutuu kriittisten komponenttien ja osakokoonpanojen tunnistamista sekä turvallisuuden että laadun näkökulmasta. DF-moottoreiden kriittisimpiin komponentteihin kirjoitetaan kuuluvan eteenkin polttoainejärjestelmät, ja komponentit, joiden viat vaikuttavat moottorin ohjausjärjestelmään. Kriittisten komponenttien tunnistaminen on tärkeää esimerkiksi ennakoivia huoltoja suunniteltaessa. Datapohjainen lähestymistapa mahdollistaa vianmäärittystekniikoiden kehittymisen ja datamääristä oppimisen, joka voidaan toteuttaa eri menetelmin. Komponenttien lisäksi tärkeää on tunnistaa KPI-mittarit, jotka mahdollistavat tehokkaan mutta mahdollisimman ympäristöystävällisen tuotteen.

AVAINSANAT: dieselmoottorit, laatujohtaminen, laadunhallinta, polttomoottorit, laivaliikenne, uusiutuvat energialähteet

Sisällys

1	Johdanto	5
1.1	Tutkimuksen tavoite ja toteutus	5
1.2	Tutkimuskysymykset	6
2	Laatujohtamisen teoriaa	7
2.1	Määritelmä ja rooli yrityksen toiminnassa	7
2.1.1	Pala historiaa	8
2.1.2	Rooli yrityksen toiminnassa	9
2.2	Keskeiset periaatteet ja työkalut	11
2.3	Standardit	13
3	Teoriaa monipolttoainemoottoreista	15
3.1	Tuotteen kuvaus ja eri polttoaineet	15
3.1.1	Bio- ja maakaasu	17
3.1.2	Vety	18
3.1.3	Ammoniakki	18
3.1.4	Metanoli	19
3.2	E erityiset laatuvaatimukset	20
3.2.1	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO)	20
3.2.2	Luokituslaitokset	22
3.2.3	Muut laadulliset erityispiirteet	22
3.3	Valmistusprosessin kriittiset vaiheet	24
4	Laatujohtamisen merkitys moottoreiden valmistusprosessissa	26
4.1	Vaikutus tehokkuuteen	26
4.2	Luotettavuus ja turvallisuus	29
4.3	Muut moottorityypit ja vianmääritys	31
5	Johtopäätökset	35
	Lähteet	38

Kuvat

- Kuva 1.** TQM-viitekehys, suomennettu mukailien teoksesta *Total Quality Management and Operational Excellence: Text with Cases*. (Oakland ja muut, 2020). 10
- Kuva 2.** Hiilidioksidi- ja typpioksidipäästöjen määrä vaihtoehtoista polttoainetta kohden (Sitorus & Nur, 2025, s. 3). 16
- Kuva 3.** IMO:n päästövähennysvaatimukset prosentteina ajan funktiona (Mohammadpour & Salehi, 2025, s. 2). 21

Lyhenteet

- AM – Additive Manufacturing, lisäävä valmistus
- CDF – Computational Fluid Dynamics, laskennallinen virtausdynamiikka
- COQ – Cost of Quality, laadun hinta
- CNG – Compressed Natural Gas, paineistettu maakaasu
- DF – Dual Fuel
- DFTA – Dynamic Fault Tree Analysis
- DOC – Diesel Oxidation Catalyst
- DMAIC – Define, Measure, Analyse, Improve, Control
- FMECA – Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis
- KPI – Key Performance Indicator
- LNG – Liquefied Natural Gas, nestemäinen maakaasu
- IMO – International Maritime Organization, Kansainvälinen merenkulkujärjestö
- PDCA/PDSA – Plan, Do, Check/Study, Act
- DNV – Det Norske Veritas
- MARPOL – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
- MINLP – Mixed-Integer Nonlinear Programming
- NMI-ND – Normalised Mutual Information Network Deconvolution
- SIPOC – Suppliers, Inputs, Processes, Outputs, Customers
- SOLAS – Safety of Life at Sea
- SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
- RCA – Root Cause Analysis, juurisyyanalyysi
- RPN – Risk Priority Number, riskin prioriteettinumero
- QA – Quality Assurance, laadunvarmistus
- QC – Quality Control, laadunhallinta

1 Johdanto

Merenkulkuala on merkittävässä roolissa kansainvälisessä logistiikassa. Viime vuosina merenkulkualalla on tapahtunut muutoksia lainsäädännön ja eri säännösten aiheuttamien paineiden vuoksi, jotka pakottavat alan nopeasti sopeutumaan (Zis ja muut, 2023). Alan päästömäärien kerrotaan kattavan 3,5–4 % maailmanlaajuisista hiilidioksidipäästöistä (Stoumpos ja muut, 2021). Esimerkiksi Euroopan unioni (EU) pyrkii liikennepolitiikallansa tunnistamaan vesikuljetuksen tärkeyden kestävän kasvun avaintekijänä, ja kannustaa säädöksillään yli 300 km:n mittaisten maantiekuljetusten siirtämistä rautatie- tai vesiliikenteeseen (Zis ja muut, 2023).

Fossiilisten polttoaineiden tilalle on keksittävä vaihtoehtoisia ratkaisuja, ja niiden on yleistyttävä tulevaisuudessa entistä enemmän. Erilaiset säädökset ja lait vauhdittavat tätä kehitystä, ja pakottavat moottorivalmistajat muokkaamaan teknologioitaan. Tässä tutkielmassa käsitellään laatujohtamista ja monipolttoainemoottoreiden valmistusprosessia, sekä laatujohtamisen merkitystä kyseisessä valmistusprosessissa.

1.1 Tutkimukseni tavoite ja toteutus

Toteutan tutkielmani kirjallisuuskatsauksena. Tavoitteena vastata seuraavassa alaluvussa esittämiini tutkimuskysymyksiin kattavasti, mutta rajaten olennaisimmat ja uusimmat tutkimukset ensisijalle. Tiedonhaussa olen hyödyntänyt esimerkiksi seuraavia englanninkielisiä hakusanoja: "marine engines", "quality management", "total quality management" ja "dual-fuel engines". Näistä hakusanoista olen muodostanut hakulauseita booleilaisen haun sekä erityisesti siihen kuuluvien "AND" ja "OR" - hakuoperaattoreiden avulla. Tietokannat, joista tietoa olen etsinyt, ovat esimerkiksi EBSCOhost Academic Search Elite, ABI Inform Collection ja ScienceDirect. Hakulauseiden jäsentelemisessä sekä aineistojen kääntämisessä olen hyödyntänyt tekoälypohjaisia ratkaisuja, kuten Google Geminiä.

1.2 Tutkimuskysymykset

Koska tutkielmani toteutustapa on kirjallisuuskatsaus, aineistojen rajaaminen on tärkeää. Pyrinkin rajaamaan aihealuetani tutkimuskysymysten avulla. Näihin tutkimuskysymyksiin vastataan luvussa 4, mutta sitä ennen käydään lävitse sekä laatujohtamisen että monipolttoainemoottoreiden teoriaa. Päättökysymykseni on seuraava: ”Millaista merkitystä laatujohtamisella on monipolttoainemoottoreiden valmistusprosessissa?” Tämän lisäksi tutkimustani ja tiedonhakuja ohjaavat seuraavat kysymykset:

- Miten monipolttoainemoottoreiden valmistusprosessi eroaa normaalista polttomoottorista?
- Miten laatujohtaminen vaikuttaa valmistusprosessiin? Entä valmiiseen tuotteeseen?
- Mitkä ovat kriittisimpiä laatuun vaikuttavia tekijöitä valmistusprosessin aikana?

2 Laatujohtamisen teoriaa

Laatu voidaan määritellä usein eri tavoin. Sen voidaan esimerkiksi nähdä varmistavan jonkin tietyn tuotteen tai palvelun vastaamisen sille tarkoitettuun tarpeeseen. Perinteinen ajattelutyyli sanoo laadun olevan vaatimustenmukaisuutta, kun nämä vaatimukset ovat mitattavissa (Bhat, 2009, s. 1). Eronen ja Aalto (2017) kirjoittavat, kuinka laatu voidaan määritellä myös tuotteen tai palvelun valmistuksen osapuolten yhdessä määrittelemänä kokonaisuutena, joka muuttaa tarvittaessa muotoa asiakkaan vaatimusten tai esimerkiksi markkinatilanteen mukaan. Heidän mukaansa erityisesti moottoreiden valmistuksessa mittaaminen ja tarkkuus kuuluvat laatuun vahvasti. Käytetty määritelmä laadulle riippuu tuotteen tai palvelun sidosryhmistä ja arvoketjun toiminnasta (Furterer, 2022, s. 21–22). Arvoketjun Furterer (2022, s. 17) määrittelee niiden toimintojen ketjuna, joka tuottaa arvoa ja mahdollistaa yritykselle kilpailuedun.

Oakland ja muut (2020, s. 31–35) kirjoittavat, kuinka laatujohtamisen kannalta hyödyllisin laadun merkitys tai määritelmä johtaa juurensa nimenomaan asiakkaan tarpeiden ja odotusten tyydyttämiseen. He kertovat, kuinka nämä tarpeet aiheuttavat suuria vaikutuksia, ja voivat sisältää esimerkiksi saatavuuteen, toimitukseen, luotettavuuteen ja kustannustehokkuuteen liittyviä seikkoja. Nykyään standardit sekä erilaiset lait ja säädökset määrittävät laadulle tietynlaiset raamit, joiden mukaan sitä voidaan seurata, mitata ja toteuttaa. Näitä laatuun yleisesti vaikuttavia tekijöitä käydään läpi tässä luvussa, mutta juuri moottoreiden laatuun vaikuttavia seikkoja käsitellään luvussa 3.

2.1 Määritelmä ja rooli yrityksen toiminnassa

”Laatua on hallinnoitava, koska se ei tapahdu itsestään”, toteavat Oakland ja muut (2020, s. 35) teoksessaan. Laatujohtaminen (eng. Total Quality Management, TQM) määritellään luonteeltaan monialaisena toimintana, jolla tavoitellaan koko organisaation osallistamista (Bhat, 2009, s. 28). Toisaalta se voidaan määritellä ylimmän johdon sitoutumisena kokonaisvaltaiseen laatuun (Furterer, 2020, s. 24), tai pohjimmiltaan

asiakslähtöisenä toimintana, joka suoritetaan laadun saavuttamiseksi (Stamatis, 2012, s. 55 ja 110). Oakland ja muut (2020) taas määrittelevät TQM:n organisaation kilpailukyvyyn, tehokkuuden ja joustavuuden parantamisena suunnittelun, organisoinnin ja toiminnan ymmärtämisen keinoin. He kirjoittavat myös, kuinka laatujohtaminen muokkaantuu tai muuttaa muotoaan riippuen yksilöstä kullakin tasolla organisaatiota.

2.1.1 Pala historiaa

Ensimmäiset laatujohtamisen ammattilaiset, joita kutsutaan myös guruiksi, ovat nousseet suosioon 1980-luvulla (Oakland ja muut, 2020). Näistä ehkäpä suosituin on W. Edwards Deming, joka kehitti neljäntoista kohdan listan, eräänlaisen ohjenuoran, laatujohtamisen parantamiseen yhdysvaltalaiselle teollisuudelle. Hän kirjoittaa teoksessaan (1986) laajasti esimerkiksi johdon muutoksen periaatteista, ja *Out of the Crisis* tunnetaan maailmanlaajuisesti nimenomaan neljäntoista kohdan listasta. Lista sisältää esimerkiksi seuraavat kohdat:

1. Luo vakaa päämäärä tuotteiden ja palveluiden parantamiseksi.
3. Lopeta riippuvuus tarkastuksista laadun saavuttamiseksi.
5. Kehitä jatkuvasti ja ikuisesti jokaista suunnittelun, tuotannon ja palveluiden prosessia (Deming, 1986).

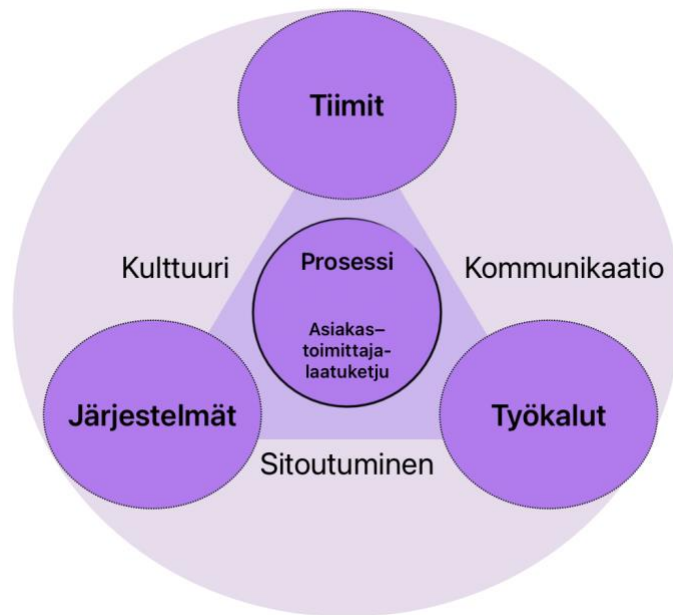
Oakland ja muut (2020) vertailevat teoksessaan kolmea laatugurua, joista Deming jo esiteltiin. Hänen lisäksi vertailuun sisältyy Philip B. Crosby ja Joseph M. Juran. Kirjoittajat kuvailevat, kuinka Deming olisi tilastollisen prosessinhallinnan kannalla ja Crosby perinteisten menetelmien puolella. Juranin taas kirjoitetaan suosittelen perinteisiä menetelmiä, mutta pelkäävän sen johtavan liian motivoituneeseen lähestymistapaan.

Historian saatossa laatujohtaminen on muuttanut muotoaan. Bhat (2009, s. 28) kirjoittaa, kuinka nykyään asiakslähtöinen, tilastollinen ja laaja-alainen kokonaisuus on muotoutunut alun perin laadullisista tarkastuksista. Bhatin mukaan perinteistä tyyliä

edustaakin nykypäivänä edelleen eri tarkastukset, ja modernissa tyyliin Pries ja Quigley (2012) yhdistävät mittausohjelman, jonka avulla organisaatiolla on tarpeelliset työkalut toteuttaa tuotteen laadun arviointiprosessi. Perinteiselle tyyliin ominaiset tarkastukset määritellään edullisena menetelmänä, jolla saadaan selville tuotteen nykyinen tai lopullinen tila tarkistuslistan avulla (Pries & Quigley, 2012). Tämä tarkistuslista on yhteisesti sovittu, jotta tuotteen tarpeet ja laatuvaatimukset tulevat sen avulla esiin tarkastushetkellä. Pries ja Quigley (2012) kirjoittavat myös, kuinka laatujohtamisen eri työkalut auttavat ymmärtämään tarkastusten tuloksia. Näitä työkaluja käydään lävitse seuraavassa toisen tason alaluvussa.

2.1.2 Rooli yrityksen toiminnassa

Laatujohtamisen tavoitteena on siis ylläpitää ja parantaa yrityksen tuotteiden tai palveluiden laatua. Oakland ja muut (2020, s.35) kirjoittavat, kuinka hyvän laatujohtamisen ytimessä on sisäisten ja ulkoisten asiakkaiden ja toimittajien konsepti. Nämä asiakkaat ja toimittajat muodostavat kirjoittajien mukaan laatuaketjun, jonka ominaisuuksiin kuuluu kertautuminen ja tiivis yhteys. Mikäli jossain vaiheessa ketjua tapahtuu laatuviikseä, on suuri riski sille, että koko ketju saa osansa seurauksista. Laatuketju on keskiössä tässä TQM-mallissa, joka koostuu tiimeistä, työkaluista ja järjestelmistä (Kuva 1), ja jonka ovat omaksuneet julkisen sektorin ylimmän johdon edustajat ympäri maailmaa (Oakland ja muut, 2020, s. 51). Oakland ja muut (2020, s. 51–52) kirjoittavat, kuinka tämä peruskehys muodostui 80-luvulla kehittyneen laatuajattelun pohjalta.



Kuva 1. TQM-viitekehys, suomennettu mukailien teoksesta *Total Quality Management and Operational Excellence: Text with Cases*. (Oakland ja muut, 2020).

Laatujohtamisen peruskehukseen (Kuva 1), kuuluu kolme eri päätekijää; tiimit, työkalut ja järjestelmät. Niiden keskiössä toimii prosessi, ja asiakkaan ja toimittajan välinen laaturketju. Tiimien ja työkalujen väliä yhdistää kommunikaatio, työkaluja ja järjestelmiä sitoutuminen ja järjestelmää sekä tiimiä kulttuuri. Tiimiin kuuluu organisaation laatupiirit, työkaluihin ongelmanratkaisu ja tilastollinen prosessinhallinta, ja järjestelmiin laatujohtamiset, kuten esimerkiksi ISO 9000. (Oakland ja muut, 2020)

Laatujohtaminen on siis tärkeässä roolissa korkean laadun ylläpitämisen takia, mutta korkealaatuinen laatujohtaminen on myös taloudellisesti kannattavaa. Laadunhallinnan kustannuksiin (eng. Cost of Quality eli COQ) kuuluu laaduttoman tuotteen hinta, eli esimerkiksi laaduttomuuden takia suoritettavat korjaustyöt ja uudelleentestaukset (Furterer, 2022, s. 33). Bhat (2009, s. 34) taas kertoo, kuinka COQ koostuu ehkäisemisen, arvioimisen sekä vikojen tai epäonnistumisen kuluista. Viat ja epäonnistumiset voivat olla joko sisäisiä tai ulkoisia, kun taas ehkäiseminen ja arvioiminen ovat aina hänen mukaansa sisäisiä kustannuksia. Oakland ja muut (2020) taas määrittävät laadun hinnaksi myös vaatimusten ja niiden täyttämiskyvyn jatkuvan arvioimisen. Moottoreiden

laatupoikkeamia ajatellessa COQ voisi koostua esimerkiksi uusintakoeajoista, asennuskustannuksista ja logistisista kuluista, mikäli laaduttomia osia tarvitsee siirtää paikasta toiseen.

2.2 Keskeiset periaatteet ja työkalut

Jatkuva parantaminen on eräs laatujohtamisen periaate, joka käsittelee työympäristön pienempiäkin parannuksia (Eronen & Aalto, 2017). Sen laajempi määritelmä sisältää kaikki toiminnot yrityksen sisällä, jotka osaltaan parantavat yksittäisten tehtävien tai prosessien tuottavuutta tai tehokkuutta samalla tarjoten lisäetua asiakkaalle tai itse organisaatiolle (Furterer, 2022, s. 410). Oakland ja muut (2020) taas määrittelevät jatkuvan parantamisen tarpeiden saavuttamisen arvioinnin seurauksena, jolloin tuottavuus ja toimituskyky kasvavat kulujen ja jätteen määrän vähentyessä. Kirjoittajien mukaan hyötyjä voidaan mitata esimerkiksi kilpailukyvyyn tai markkinaosuuden paranemisena.

Eronen ja Aalto (2017) kirjoittavat, kuinka Wärtsilän moottoritehtaalla jatkuvan parantamisen käyttöönotto vaikutti erityisesti tuotantotilojen puhtauteen. He kertovat teoksessaan myös, kuinka Demingin kehittämä ympyrä, suunnittele, tee, tarkista ja toimi (PDCA) vaikutti jatkuvan parantamisen käyttöönottoon. Furtererin (2022) mukaan idean alkuperä on peräisin Walter Shewhartilta, ja jota Deming on kehittänyt PDSA-sykliksi (Plan, Do, Study, Act) saaden samalla syklille näkyvyyttä. PDCA-syklissä ensimmäinen vaihe edustaa parannuksen tarpeen identifiointia, jonka työkaluna toimii juurisyy selvitys (Furterer, 2022). Seuraava vaihe tarkoittaa kirjoittajan mukaan kommunikaatiota ja toimeenpanoa, kolmas vaihetarkastusta. Tarkastuksessa tulee kyseenalaistaa, saatiinko toivottuja tuloksia, ja ilmenikö mahdollisesti uusia ongelmia. Viimeinen vaihe edustaa toimeenpanoa, jolloin suunnitelma voidaan ottaa käyttöön tai tarvittaessa hylätä, ja kohderyhmän kokoa muuttaa tarpeen vaatiessa. Viimeisen vaiheen tullessa päätökseen, kehä alkaa alusta ensimmäisestä vaiheesta, jatkaen kiertoaan aina uudelleen.

Furterer (2022, s.28–29) kertoo toisen jatkuvan parantamisen työkalun olevan palautesilmukka, jossa asiakastyytyväisyyttä mitataan valmistusprosessin joka vaiheen välissä silmukan lailla. Täten palautetta on helpompi hallita, ja mahdolliset muutosehdotukset tulevat ilmi ajoissa.

Six Sigma määritellään yhtenä laatujohtamisen filosofiana tai metodologiana, joka keskittyy poikkeavuuksien ja mittausvirheiden vähentämiseen samalla parantaen tuotteiden, prosessien ja palveluiden laatua (Furterer, 2022, s.111). Furterer (2022, s. 113) kirjoittaa, kuinka jokaisen olemassa olevan prosessin voi Six Sigman mukaan määritellä, mitata, analysoida, parantaa ja hallita. Tästä syntyy DMAIC-vaiheet, joiden sisältö voidaan muokata vaatimusten mukaan. Ensimmäiseen määrittelyvaiheeseen voidaan esimerkiksi hyödyntää SIPOC-mallia (eng. Suppliers, Inputs, Process, Outputs ja Customers) (Oakland ja muut, 2020). Oakland ja muut (2022) kirjoittavat, kuinka prosessista voidaan SIPOCin avulla luoda yhtälö, jossa oikeat toimittajat ja inputit luovat prosessissa oikeanlaiset outputit ja tyytyväiset asiakkaat. Kirjoittajien mukaan SIPOC ja oikeanlainen järjestys voi olla yksi työkalu myös siinä, kuinka havaitsemisstrategia eli laadulliset tarkastukset voidaan korvata ennaltaehkäisyllä.

Myös riskienhallinnalla pyritään vähentämään laatupoikkeamia esim. ennaltaehkäisemisen avulla. Furterer (2022, s. 460) määrittelee riskienhallinnan järjestelmällisenä ja analyttisenä prosessina, joka auttaa tunnistamaan mahdollisen vahingon tai menetyksen aiheuttajat sekä arvioimaan ja kvantifioimaan tunnistetut riskit. Siihen liittyy kirjoittajan mukaan myös tarpeen tullen asianmukaisen lähestymistavan kehittämistä ja toteuttamista, jotta ehkäistään tai käsitellään merkittävää vahinkoa tai menetystä aiheuttavat riskit. Juurisyyanalyysi (eng. Root Cause Analysis, RCA), liittyy vahvasti juuri riskien ehkäisemiseen, kun havaitut poikkeamat ja niiden juurisyy selvitetään perinpohjaisesti. Furterer (2022, s. 460) määrittelee RCA:n laadun työkaluna ja jäseneltynä lähestymistapana, jota käytetään vikojen tai ongelmien lähteen tunnistamiseen.

Jatkuvan parantamisen tavoin ennaltaehkäisevää toimintaa on laadunvarmistus (eng. Quality Assurance, QA). Se voi sisältää käytännön toimintaa, kuten suunnittelua, kehittämistä, tuotantoa, asentamista, huoltopalveluja sekä dokumentaatiota (Furterer, 2022 s. 29). Furtererin (2022) mukaan laadullisena tavoitteena pidetään laadunvarmistusta prosessin joka vaiheessa raaka-aineista aina valmiiseen tuotteeseen ja asiakkaan palautesilmukkaan. Yleisesti ottaen sillä tarkoitetaan laatuongelmien ehkäisemistä suunnitelluilla ja järjestelmällisillä toimilla, kuten esim. laatujärjestelmän luomisella sekä sen toiminnan tai riittävyyden arvioinnilla (Oakland ja muut, 2020). Oakland ja muut (2020) kirjoittavat laadunhallinnan (eng. Quality Control, QC) sen sijaan sisältävän ne toiminnot, joita käytetään lopputuotteen laadun saavuttamiseksi ja ylläpitämiseksi sisältäen tuotannon seurantaan sekä asiakkaan vaatimusten täyttämistä jatkuvasti. Laadunhallinta siis keskittyy enemmän itse lopputuotteeseen ja siihen, että samat tuotteet täyttävät samat vaatimukset.

2.3 Standardit

Suomen Standardit määrittelee standardin julkaisuna, joka auttaa arjessa lisäämällä tuotteiden ja palveluiden laatua, turvallisuutta ja yhteensopivuutta. Niiden kerrotaan edistävän yritysten kilpailukykyä ja liiketoimintaa, mutta turvaavan myös yksityisen kuluttajan (SFS, -n.-d.). Toisaalta se voidaan määritellä joko jonkin tahon määräämänä tai vapaaehtoisena joukkona sovittuja periaatteita tai vaatimuksia, joiden tarkoitus on ylläpitää yhdenmukaisuutta, turvallisuutta ja laatua tietyllä teollisuudenalalla (Harvard Library, 2025).

Martyr ja muut (2012) kirjoittavat, kuinka ISO9001-standardi vaatii yritykseltä laatuohjeita ja -käytäntöjä, jotka sisältävät asiakirjoja. Näissä asiakirjoissa määritellään organisaation järjestelmät seuraaville kuudelle alueelle:

1. Asiakirjojen hallinta
2. Tietojen hallinta, mikä sisältää esimerkiksi testitulokset ja kalibroinnit
3. Sisäiset auditoinnit sisältäen riskianalyysin ja kalibrointitodistukset

4. Vaatimustenvastaisten tuotteiden tai palveluiden hallinta sisältäen asiakassopimukset ja palautteen
5. Korjaavat toimenpiteet
6. Ennaltaehkäisevät toimenpiteet, kuten koulutus.

Näiden ohjeiden ja käytäntöjen lisäksi standardi voi vaatia laadunvarmistusryhmää, joka vastaisi sertifiointista, sisäisestä auditoinnista sekä instrumenttien kalibroitijärjestelmän hallinnasta, mikäli sovellettavissa (Martyr ja muut, 2012).

Standardeihin liittyy aina auditointeja, joilla tarkoitetaan organisaation, sen prosessien tai tuotteiden arvioimista itsenäisen ja objektiivisen auditoijan toimesta. Auditoijan kerrotaan olevan yksi henkilö tai mahdollisesti tiimi, joka suorittaa sisäisen tai ulkoisen auditoinnin. Näistä sisäinen valmistaa usein ulkoiseen auditointiin, jolloin organisaatio pyrkii valmistautumaan varsinaiseen ulkoiseen auditointiin. Ulkoiset auditoinnit tulee suorittaa viranomaisen tai yksityinen auditoijayritys lakeja ja säädöksiä noudattaen mm. talous- ja turvallisuusasioihin liittyen. (Furterer, 2022, s. 34–35)

3 Teoriaa monipolttoainemoottoreista

Polttomoottorit kehitettiin alun perin kustannustehokkaan ja yksinkertaisen voimanlähteen tarpeeseen höyrymoottorin sijaan, ja ne kasvattivat suosiotaan enemmän 70-luvulla vallinneen energiakriisin ja yleisön tietoisuuteen kiirineiden ympäristöongelmien takia (Van Basshuysen & Schäfer, 2016). Taloudelliset ja matalapäästöisemmät polttomoottorit vastasivat silloisiin tarpeisiin aivan kuten monipolttoainemoottorit tänä päivänä. Fossiilisten polttoaineiden saatavuuteen liittyvät epävarmuudet ja erilaisten päästöjen vähentämistarve pakottavat moottoriteollisuuden kehittymään jatkuvasti (Sahoo ja muut, 2009). Ratkaisu näihin ongelmiin voisi löytyä monipolttoainemoottoreiden valmistuksesta.

3.1 Tuotteen kuvaus ja eri polttoaineet

Nimensä mukaisesti monipolttoainemoottorilla tarkoitetaan moottoria, jonka polttotapahtumassa hyödynnetään useampaa kuin yhtä polttoainetta. Saatavuuteen liittyvät ongelmat ja viimeisin vallinnut energiakriisi vaikuttavat suoraan polttoaineiden hintaan, jolloin monipolttoainemoottorit ovat myös kustannustehokas vaihtoehto. Suomalainen Wärtsilä aloitti monipolttoainekehityksensä kaasukäyttöisistä voimalaitosmoottoreista, ja kysynnän kasvaessa myös laivamoottoreihin, kehitettiin Turussa kolmipolttoainekäyttö vuonna 2005 (Eronen & Aalto, 2017). Wu ja muut (2023) kertovat, kuinka valinta monen polttoaineen välillä vähentää merenkulkyritysten käyttökustannuksia merkittävästi. Koska yleisimmät meriteollisuudessa käytetyt monipolttoainemoottorit käyvät nimenomaan kahdella polttoaineella (Wu ja muut, 2023), keskityn käsittelemään erityisesti näitä DF- eli kaksipolttoainemoottoreita.

Tuotteena monipolttoainemoottorit ovat innovaatio, joka on syntynyt vastauksena edellä mainittuihin ongelmiin ja tulevaisuuden haasteisiin. DF-moottorit voisivat olla teknologisesti pätevä ja varteenotettava ratkaisu merenkulkualan ja muiden suuren luokan moottoreiden päästöjen vähentämiseen, koska kahden polttoaineen käyttö mahdollistaa sylintereiden reaktiivisuuden säätämisen ennen palamistapahtumaa

(Park ja muut, 2023). Niiden toimintaperiaatteen keskiössä on sytytys pilottipolttoaineella, jonka osuus on vain noin prosentti kokonaisenergiakulutuksesta (Eronen & Aalto, 2017). Polttomoottorit ovat laajasti käytettyjä kuljetusalalla, sillä niiden korkea energiatiheys ja vakiintunut infrastruktuuri ovat omaa luokkaansa hiilidioksidipäästöjen vähentämisen haasteellisuudesta huolimatta (Sitorus & Nur, 2025). Haasteena onkin löytää juuri oikea vaihtoehtoinen polttoaine, joka säilyttää korkean energiatiheytensä samalla vähentäen päästöjen määrää (Mohammadpour & Salehi, 2025).

Parkin ja muiden (2023) mukaan hiilidioksidipäästöjä voisi vähentää jopa viidesosan käyttämällä dieselin lisäksi maakaasua, ja jopa enemmän käyttämällä biokaasua. Dieselin lisäksi käytettävällä polttoaineella on siis suoraan vaikutusta päästöjen määrään. Kuvaajasta (Kuva 2) voidaan nähdä, kuinka vedyssä ja ammoniakissa on vähiten hiilidioksidipäästöjä, mutta typpioksidipäästöjen (eng. NOx) määrä on suurin. Kaikista vähiten hiilidioksidi- ja typpioksidipäästöjä tuottaisi synteettinen kaasu, kuvassa eng. "syngas".



Kuva 2. Hiilidioksidi- ja typpioksidipäästöjen määrä vaihtoehtoista polttoainetta kohden (Sitorus & Nur, 2025, s. 3).

3.1.1 Bio- ja maakaasu

Tässä kappaleessa käsittelen vaihtoehtoisista polttoaineista kaasumuotoisia polttoaineita, kuten bio- ja maakaasua. Lisäksi käsittelen lyhyesti synteettistä kaasua. Näistä tunnetuin moottoreiden valmistuksessa lienee maakaasu, mutta tulevaisuudessa myös biokaasun ja synteettisen kaasun osuus kasvane.

Maakaasulla on korkea oktaaniluku, ja sen ansiosta kipinäsytytyksellä toimivien moottoreiden puristussuhdetta päästään nostamaan, jolloin kokonaispolttotehokkuus kasvaa (Lejda, 2012). Nelles (2019) käsittelee artikkelissaan Volvon raskaita kuorma-autoja ja niiden polttoaineita, ja kertoo fossiilisen maakaasun olevan helposti saatavilla. Erityisesti teollisissa toiminnoissa käytetyn nestemäisen maakaasun (LNG) avulla mahdollistetaan hiilidioksidipäästöjen väheneminen jopa viidesosalla verraten dieselkäyttöiseen moottoriin (Nelles, 2019). Hiilidioksidipäästöjen lisäksi typpi- ja rikkioksidien sekä hiukkaspäästöjen määrät ovat huomattavasti pienemmät dieselin päästöihin verrattuna (Mohammadpour & Salehi, 2025). LNG:n lisäksi maakaasua käytetään myös paineistettuna. Paineistettu maakaasu (CNG) eli metaani on maakaasua, joka on paineistettu 200 barin suuruiseen paineeseen, ja tällöin kaasutankin energiatiheys on matala (Van Basshuysen & Schäfer, 2016).

Nelles (2019) kirjoittaa, kuinka biokaasua hyödyntämällä kuorma-autojen moottoreiden hiilidioksidipäästöt voisivat vähentyä jopa sadalla prosenttiyksiköllä, mutta dieselin rooli tulee olemaan silti suuri edelleen. Biopolttoaineiden vahvuuksiin kuuluu myös korkea energiatiheys ja hyvä soveltuvuus olemassa olevaan polttoaineenjakoinfrastruktuuriin merenkulkualalla (Mohammadpour & Salehi, 2025).

Synteettisen kaasun käytön suurimpana etuna tavanomaisiin polttoaineisiin nähden on moottorin lisääntynyt lämpötehokkuus. Synteettinen kaasu muodostuu, kun hiilipitoista polttoainetta muunnetaan termokemiallisesti korkeissa lämpötiloissa, jolloin polttoaine osittain hapettuu. Tämän seurauksena syntyy synteettistä kaasua, joka koostuu pääosin

hiilimonoksidista, vedystä, hiilidioksidista sekä metaanista, vedestä ja vedystä. (Lejda, 2012, s. 63–64)

3.1.2 Vety

Vedyn suora käyttö kuljetusalan polttoaineena aiheuttaa useita turvallisuuteen ja varastointiin liittyviä haasteita fysikaaliskemiallisten ominaisuuksiensa takia, joista esimerkkinä aineen kiehumispiste, $-252,87\text{ °C}$ (Kurien & Mittal, 2022). Mohammadpour ja Salehi (2025) kirjoittavat, kuinka kaasumuotoinen vety erottuu edukseen korkeimmalla gravimetrisellä energiatiheydellään, eli painoonsa nähden sen energiarikkaus on suurin. Toimintaperiaatteen he kirjoittavat koostuvan sähkökemiallisesta reaktiosta, jossa polttoainekennot muuttavat kemiallisen energian sähköenergiaksi. Tämän ansiosta saavutetaan korkea tehokkuus ja vältetään suorien päästöjen syntyminen. Juuri tämä reaktion puhtaus saa vedyn näyttämään erittäin houkuttavalta meriteollisuuden voimansiirrossa (Mohammadpour & Salehi, 2025).

Hosseini ja muut (2023) kirjoittavat, kuinka vety on potentiaalinen vaihtoehtoinen polttoaine, koska se voidaan tuottaa uusiutuvista energianlähteistä, ja vaatii vain vähäisiä muokkauksia dieselmoottorin rakenteeseen, jotta sitä voidaan hyödyntää dieselin rinnalla. He kertovat myös, kuinka nykyään vain 4 % tuotetaan tästä huolimatta uusiutuvilla energianlähteillä, ja 96 % fossiilisten polttoaineiden avulla.

3.1.3 Ammoniakki

Ammoniakin hyötysuhde ylittää 42 % vetyyn sekoitettuna, ja tällöin polttoaine hyötty vedyn syttymisnopeudesta vaatien kuitenkin huolellista ilman ja polttoaineen säätöä epävakauden ja typpioksidipäästöjen rajoittamiseksi (Sitorus & Nur, 2025). Myös Kurien ja Mittal (2022) kertovat ammoniakkin olevan tehokas vedyn kantaja, ja siksi kylmässäkin hyvin toimiva polttoaine. Korkean oktaaniluvun ja kevyen olomuodon omaava aine on sopiva erityisesti moottoreille, joissa on korkea puristussuhde (Kurien & Mittal, 2022).

Sitorus ja Nur (2025) esittävät SWOT-analyysissaan ammoniakkin vahvuuksiksi esimerkiksi hyvän käsittelykokemuksen, matalan syttyvyyden ja hyödyntämisen joustavuuden. Mahdollisuuksien joukkoon kirjoittajat listaavat vihreän ammoniakkin tuottamisen uusiutuvien energialähteiden avulla, sekä helpon saatavuuden maailman useista satamista. Heikkouksiin kirjoittajat ovat listanneet pilottipolttoaineen tarpeen, eli puhtaasti vain ammoniakilla kulkevaa laivamoottoria ei ole vielä kehitetty. Typpioksidipäästöt ovat myös melko korkeat verrattuna muihin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin (Kuva 2). Kurien ja Mittal (2022) kirjoittavat aineen haittoihin kuuluvan esim. matalan syttymisnopeuden sekä korkean sytytysenergian. Uhkana Sitorus ja Nur (2025) näkevät aineen myrkyllisyyden sekä mereen päätyvät päästöt aineesta.

3.1.4 Metanoli

Metanolin käyttö vaihtoehtoisena polttoaineena on vauhdittunut, ja sen kehittäminen kerännyt runsaasti tutkimuksellista kiinnostusta, koska metanolin avulla kasvihuonekaasupäästöt saadaan vähentymään ja nestemäinen olomuoto huoneenlämmössä helpottaa sen käyttöönottoa (Rao ja muut, 2025). Sitorus ja Nur (2025) kirjoittavat, kuinka alkoholipohjaiset polttoaineet tarjoavat kohtuullisen tehokkuuden ja puhtaamman polttotapahtuman, mutta vaativat toisaalta pilottipolttoainetta tai kaksipolttoainekäyttöä matalan oktaanilukunsa takia. He kirjoittavat SWOT-analyysissään metanolin vahvuuksiin saatavuuden varmuuden sekä kemiallisen vakauden, ja mahdollisuuksiin kilpailukykyisen hinnan sekä monipuoliset tuotantomahdollisuudet. Heikkouksiin kirjoittajat listaavat matalan viskositeetin ja aineen myrkyllisyyden, kun taas uhkiin yleisön huolen sekä muiden alojen kiinnostuvuuden aineesta. Metanolin käytöllä on ympäristön lisäksi vaikutuksia moottorin mahdollisiin vikoihin, ja käyttö vaikuttaa moottorin voiteluun, korroosioon sekä kulumiseen (Rao ja muut, 2025).

3.2 Erityiset laatuvaatimukset

Erityisesti laivamoottoreita tarkastellessa, monipolttoainemoottoreiden laadullisiin ominaisuuksiin niin valmistusprosessin kuin valmiin tuotteenkin osalta liittyy vahvasti useampia tahoja valmistajan lisäksi. Valmistajan laatujärjestelmien rinnalla vaikuttavia tahoja ovat esimerkiksi kansainvälinen merenkulkujärjestö (eng. International Maritime Organization, IMO), luokituslaitokset sekä erityisesti sen valtion viranomaiset, jonka lipun alla kyseinen laiva seilaa (Kirolivanos & Jeong, 2022). Valmistajan laatujärjestelmän toiminta on jokseenkin yksilöllistä yrityksestä riippuen, ja tässä alaluvussa keskitynkin käsittelemään enemmän näitä ulkoisia tahoja, jotka osaltaan vaikuttavat tehtaan laatujärjestelmään ja sen sisältöön. Valtioiden viranomaisten toiminnassa voi ilmentyä kansainvälisesti melko suuriakin eroja, joten ne päätän jättää käsittelemättä tässä luvussa.

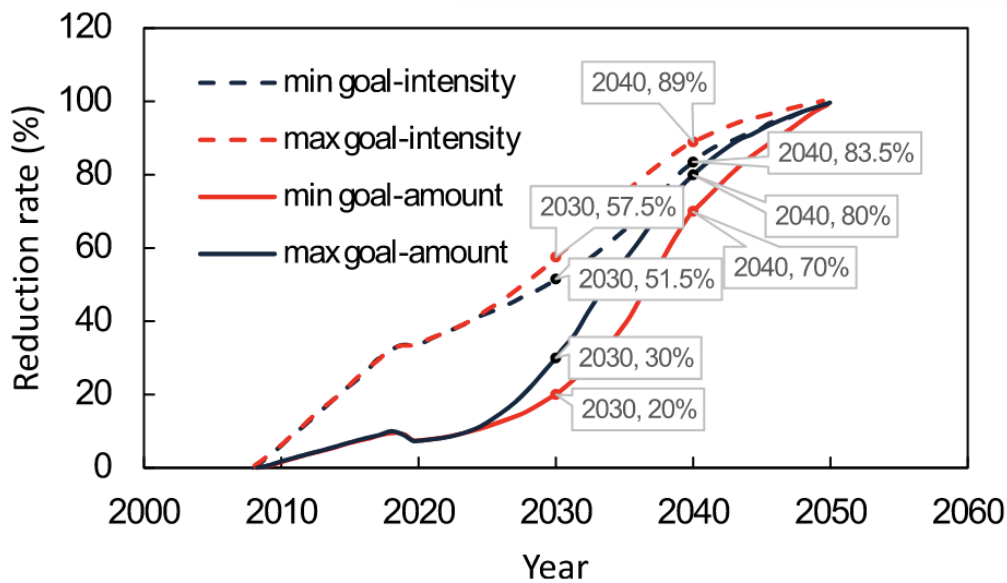
3.2.1 Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO)

IMO on Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) erityisjärjestö, jonka vastuualueeseen kuuluu merenkulun turvallisuus ja laivojen aiheuttamien saasteiden ehkäisy tukien YK:n kestävä kehityksen tavoitteita (IMO, n.d.-a). Kirolivanoksen ja Jeongin (2022) mukaan IMO:n auktoriteetti on tahoista korkein erityisesti moottoreiden päästömääriin liittyen. Kuitenkin järjestö vaikuttaa ympäristöasioiden lisäksi esimerkiksi alusten turvallisuuteen turvallisuuden säätelyyn tarkoitetulla yleissopimuksella nimeltään *Safety of Life at Sea* (SOLAS), joka säädettiin vuonna 1974 ja astui voimaan vuonna 1980 (IMO, n.d.-b). Järjestö on siis vaikuttanut merenkulkuun jo monien vuosikymmenten ajan.

SOLAS-sopimuksen lisäksi IMO on säätänyt kansainvälisen yleissopimuksen alusten aiheuttaman meren pilaantumisen ehkäisemiseksi (eng. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) (IMO, n.d.-c). MARPOL-sopimuksella ja sen säätämällä on ollut eniten vaikutusta moottorivalmistukseen (Latarche, 2021, s. 24–25). Sopimus koostuu kuudesta osasta, josta juuri viimeinen kuudes liite on Latarchen (2021, s.24–25) mukaan tärkein, koska kyseinen liite säätelee päästöjen

määrän vapautumista ilmaan ja suurin osa moottoreita koskevista säännöksistä perustuu juuri tähän liitteeseen.

IMO:n kasvihuonekaasuihin liittyvä strategia, joka säädettiin vuonna 2018, asettaa laivayhtiöt vastuuseen hiili-intensiteetin määrän vähentämisestä 40 % vuoteen 2030 mennessä ja vielä eteenpäin hiilineutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä (Tan ym., 2022). Kuvassa 3 on esitetty neljä eri kehityssuuntaa päästövähennyksille, joissa kaikissa korostetaan varhaisen ja jatkuvan toiminnan merkitystä (Mohammadpour & Salehi, 2025). Kaikki neljä kehityssuuntaa tähtäävät kuitenkin samaan tavoitteeseen, eli sadan prosentin päästövähennyksiin vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaisi käytännössä sitä, että merenkulku olisi viimeistään vuonna 2050 hiilineutraalia.



Kuva 3. IMO:n päästövähennysvaatimukset prosentteina ajan funktiona (Mohammadpour & Salehi, 2025, s. 2).

Päästöjen ja turvallisuuden lisäksi kyseinen auktoriteetti on vastuussa esimerkiksi laivojen yleisistä nopeusrajoituksista, joista on ollut keskustelua viime vuosina. Nopeuksien rajoittaminen vaikuttaisi suoraan päästöjen määrään, mutta toisaalta aiheuttaisi kuluja ja aikatauluhaasteita logistiikkaan maailmanlaajuisesti (Tan ja muut,

2022). Tällä hetkellä yleisrajoituksia ei ole laisinkaan, ja nopeuden säätely vaikuttaisi osaltansa moottorivalmistukseen, mikäli nopeusrajoitukset muuttaisivat nykytilannetta. Nopeuden lisäksi eräs vuonna 2014 voimaan tullut säädös rajoittaa äänipäästöjä (Latarche, 2021, s. 52–53).

3.2.2 Luokituslaitokset

Luokituslaitos järjestää jo tuotantovaiheessa omia testejä ja tarkastuksia laivamoottoreille ja niiden komponenteille. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom on tehnyt identtiset sopimukset suomalaisten alusten tarkastamisesta useampien luokituslaitosyriyten kanssa, joista esimerkkejä ovat American Bureau of Shipping, Bureau Veritas ja Det Norske Veritas (DNV) (Traficom, 2022). Sopimuksissa määritellään, minkä eri merenkulkualan sopimusten mukaiset katsastukset luokituslaitos voi aluksille ja niiden moottoreille suorittaa.

Merenkulkualan yksi suurimmista luokituslaitoksista on DNV, jonka nettisivut määrittelevät luokituslaitoksen yhdeksi tärkeimmistä tehtävistä ihmishenkien, omaisuuden ja ympäristön suojelemisen (DNV, n.d.). Myös he noudattavat ja seuraavat IMO:n säätelemiä ja laillisesti sitovia rajoituksia, ja tekevät omaa työtänsä niiden ohjaamina. Yrityksen visioon kuuluu toimia luotettavana tahona vastaten maailmanlaajuisiin muutoksiin (DNV, n.d.). Eronen ja Aalto (2017) kirjoittavat, kuinka luokituslaitokset voivat myös myöntää sopimuksia, jolloin valmistaja voi itse tarkistaa ja hyväksyä osat tai osakokoonpanot tarvittavien vaatimusten mukaan. Tällöin kokoonpanon aikataulutuksen voisi kuvitella pystyvän suunnittelemaan helpommin, kun esimerkiksi tarkastukset hoitaa yrityksen sisäinen toimija eikä ulkoinen.

3.2.3 Muut laadulliset erityispiirteet

Kahden tai useamman polttoaineen moottorin käyttöperiaate on suhteellisen sama kuin perinteisen yhdellä polttoaineella käyvän moottorin. Kuitenkin esimerkiksi CNG:tä käytettäessä dieselin rinnalla, moottorin sylinterikansiin ja mänttiin on tehtävä muutoksia

(Van Basshuysen & Schäfer, 2016). Tämä tarkoittaa kirjoittajien mukaan esimerkiksi sytytystulpan lisäämistä sylinterikanteen tai jonkin osan vaihtamista kokonaan toisenlaiseen osaan.

Metanolin tai etanolin taas kerrotaan aiheuttavan huomattavia ja kalliitakin muutoksia moottorin toimintaan (Van Basshuysen & Schäfer, 2016). Näiden muutosten kerrotaan olevan esimerkiksi kokonaan toinen ruiskutusjärjestelmä, tai vaihtoehtoisesti uudenlaisia sytytystulppia sekä suuriakin määriä liuottaja-ainetta. On siis selvää, että laadullisiin erityispiirteisiin kuuluu yllä mainittujen lisäksi usean polttoaineen käytöstä johtuvat osamuutokset, ja näiden uusien teknologioiden käyttöönotto. Uusien komponenttien käyttöönotto tarkoittaa riskejä myös toimittajien ja alihankinnan suuntaan.

Yksi mahdollinen tapa valmistaa uusia komponentteja on lisäävä valmistus (eng. additive manufacturing, AM), jolla tarkoitetaan käytännössä 3D-tulostamista. Hajimirzaee ja muut (2021) kirjoittavat, kuinka he pystyivät luomaan 3D-tulostamisen avulla dieselpolttoaineen hapettumiskatalysaattorin (eng. Diesel Oxidation Catalyst, DOC). Uudella osalla päästiin päästövähennystavoitteisiin, kun osaa verrattiin DF-moottorin perinteiseen, alkuperäiseen, osaan. Kirjoittajat kertovat myös, kuinka 3D-tulostus osoittautuu käyttökelpoiseksi menetelmäksi katalysaattorirakenteiden suunnitteluun ja valmistamiseen ylittäen samalla kaupallisesti saatavilla olevien rakenteiden ominaisuudet (Hajimirzaee ja muut, 2021). Yang ja muut (2021) taas kirjoittavat lisäävän valmistuksen laatujohtamisesta, erityisesti Six Sigman ja DMAIC-mallin hyödyntämisestä. Heidän mukaansa valmistusmallin laajamittaisen soveltamisen tiellä on esimerkiksi laadunhallintaan liittyvät tekniset haasteet, ja niiden ylipääsyn jälkeen valmistustapa voi tarjota huomattavasti lyhentyneitä toimitusaikoja ja ennennäkemätöntä suunnittelun joustavuutta (Yang ja muut, 2021).

3.3 Valmistusprosessin kriittiset vaiheet

Monipolttoainemoottoreiden valmistusprosessi koostuu projektiluontoisesta tuotannonohjauksesta, jossa alihankinnalla on suuri rooli. Valmistusprosessi myötäilee tavallisen moottorin valmistusprosessia, mutta soluissa tapahtuvat työvaiheet osaltansa eroavat. Useimmiten moottoritehdas ei itse valmista läheskään kaikkia osia tehtaan sisäisesti, vaan ulkoiset toimijat toimittavat moottoriin osia, ehkä jopa kokonaisia osakokoonpanoja. Eronen ja Aalto (2017) kirjoittavat, kuinka Wärtsilän entisellä Turun dieselmoottoritehtaalla tuotannonohjauksen uudistuksen mukana syntyi virtausmalliin perustuva tuotantolinja, jossa yksittäisen työkappaleen jalostus jatkuu läpi työvaiheiden ja jonka keskiössä oli alihankinta. Osakokoonaisuudet saatiin kokoonpanoon imuohjausperiaatteella, keskittyen raskaaseen koneistukseen ja valmistaen ainoastaan strategisesti tärkeimmät osat itse tehtaalla (Eronen & Aalto, 2017).

Valmistusprosessin loppupuolella ennen jälkitöitä suoritetaan moottorin koeajo, eli koekäyttö. Koekäytön suorittaminen tehtaalla varmistaa tuotteen virheettömyyden, kun tuote testataan useammalla eri tehotasolla kuormituksen säätölaitetta hyödyntäen (Eronen & Aalto, 2017). Koeajo suoritetaan valmistusprosessin tavoin sisätiloissa. Koeajotilat määritellään soveltuvaan sisätilaan kuuluvana kokonaisuutena, johon kuuluu tarvittava koneisto, instrumentit ja tukipalvelut (Martyr & Plint, 2012). Martyr ja Plint (2012) kirjoittavat, kuinka tilat vaativat selkeän ja yksiselitteisen erittelyn, jotta monimutkaiset projektit voidaan saada päätökseen koeajotilojen avulla. Tämän erittelyn he kirjoittavat koostuvan kolmesta eri tasosta: toiminnallisesta, funktionaalisesta sekä yksityiskohtaisesta funktionaalisesta erittelystä. Toiminnallinen osa kuvaa, mitä varten koeajo järjestetään, ja se luodaan valmiiksi ennen tarjouspyynnön hyväksymistä osapuolten kesken. Funktionaalinen osa kuvaa taas sitä, mistä kaikista osista koeajo koostuu. Yksityiskohtainen osa on suunnitteluauktoriteetin luoma, ja siinä taas selviää, miten esimerkiksi eri järjestelmät ja itse koeajo toimii.

Koeajoon kuuluu lisäksi sen tekninen hallinto, jonka päävastuuseen kuuluu varmistaa testilaitteiden oikeaoppinen käyttö, huoltaminen ja valinta (Martyr & Plint, 2012). Täten

saadaan tuotettua laadukasta tietoa määriteltyjen tehtävien suorittamisesta, eikä synny mittavirheitä tai muita poikkeamia, jotka johtuisivat epäsopivasta laitteistosta. Martyr ja Plint (2012) kirjoittavat lisäksi myös, kuinka suurin osa keskikokoisista ja suurista koeajtiloista noudattavat ISO9001-standardin mukaista laatujohtamisjärjestelmää. Heidän mukaansa tällä sertifikaatilla on suuri vaikutus kokoamismenetelmiin sekä toiminnallisen ja funktionaalisen erittelyiden sisältöön. Kyseinen standardi esiteltiin lyhyesti luvussa 2.3.

4 Laatujohtamisen merkitys moottoreiden valmistusprosessissa

Tässä luvussa käydään läpi tärkeimmät löydökset kirjallisuuskatsauksestani, ja pyrin vastaamaan luvussa 1 esittämiini tutkimuskysymyksiin. Tutkimusartikkelit on rajattu ajallisesti vastaamaan mahdollisimman ajankohtaisesti tutkimuskysymyksiin, mutta samalla tarpeeksi luotettavasti. Aiheen suhteellinen tuoreus vaikuttaa myös osaltaan aineistojen julkaisuajankohtaan.

4.1 Vaikutus tehokkuuteen

Useamman polttoaineen käytön ehkäpä tärkein aspekti on moottorin tehon säilyminen, jotta moottori säilyttää suorituskykynsä, eikä tehohäviöt ole suorituskykyyn verraten suuria. Suurimpana haasteena on löytää optimaalisin tasapaino käyttöasetusten optimoimisella moottorin suorituskyvyn sekä päästömäärän välillä (Xiang ja muut, 2023). Xiang ja muut (2023) suorittavat tutkimuksen, jonka tavoitteena on tutkia parametrisesti moottorin asetusten optimointia, jotta moottorien typpioksidipäästöt ja ominaispolttoaineenkulutus vähenisivät. Samanaikaisesti tutkimuksessa pyritään välttämään moottoreiden nakutusta, joka liittyy palamattoman polttoaine-ilma-seoksen itsesyttymiseen tietyssä syttymisen vaiheessa. Sen kerrotaan olevan yleinen epävakaus kyseisissä moottoreissa, aiheuttaen mahdollisesti vakaviakin vahinkoja polttokammion rakenteeseen. Kirjoittajat osoittavat, että CFD-simuloinnin (eng. Computational Fluid Dynamics) avulla voidaan vähentää fyysisten testien tarvetta samalla saavuttaen ympäristöystävällisempi ja taloudellisempi toiminta moottorille välttäen nakutuksen aiheuttamat vauriot.

Sitorus ja Nur (2025) kirjoittavat moottoreiden suorituskykyyn vaikuttavan kolme suorituskykymittaria (eng. Key Performance Indicator, KPI): jarruttamisen lämpötehokkuus, siihen liittyvän polttoainekulutus sekä moottorin nettoteho. Kirjoittajat kertovat suorittaneensa tutkimuksensa vertaillen vaihtoehtoisia polttoaineita

suhteessa vastaaviin lukuihin, jotka on kerätty dieselmootoreista. He yhdistävät teoksessaan DF-strategiat sekä nanolisäaineet, ja esittävät Xiangin ja muiden (2023) tavoin vähenevät päästömäärät. Sitorus ja Nur (2025) kirjoittavat aiempien teosten keskittyneen yksittäisiin vaihtoehtoihin polttoaineisiin, ja heidän teoksensa eroaa näistä juuri yhdistämällä aiemmin mainitut alueet. Nanolisäaineet he yhdistävät biodieselin kanssa, jolloin palamistapahtuman vakaus lisääntyi päästömäärien vähentyessä. KPI-mittareista jarrujen lämpötehokkuuden arvo kasvaa kirjoittajien mukaan, mutta jarrujen polttoainekulutus vähenee päästömäärän kanssa. Suorituskyvyn ja päästöjen välisen suhteen tai kompromissin näkökulmasta tämä sekoitus on kirjoittajien mukaan yksi tasapainoisimmista ja käytännöllisimmistä vaihtoehdoista.

Zis ja muut (2023) tutkivat myös KPI-viitekehysten suunnittelua ja soveltamista, mutta keskittyen erityisesti autonomiseen merenkulkuun Euroopassa. Autonomisella merenkululla tarkoitetaan laivoja, jotka ovat täysin miehittämättömiä, ja siksi usein parempia vaihtoehtoja aikataulun ja rahdin lisämäärän takia (Zis ja muut, 2023). Kirjoittajat jakavat KPI:t kolmeen ryhmään: taloudellisiin, ympäristöllisiin ja sosiaalisiin. Taloudellisiin he listaavat esimerkiksi huoltojen hinnat, odotusajan ja energiankulutuksen. Ympäristöllisiin taas kuuluu päästöt, kuten hiilidioksidi-, typpi- sekä rikkioksidit, ja hiukkaspäästöt. Sosiaalisiin kirjoittajat listaavat esimerkiksi onnettomuuksien määrän, työolot, tulot sekä liikenteen.

Zis ja muut (2023) siis tarkastelevat KPI-viitekehystä koko laivan tai aluksen tasolla, kun taas Sitorus ja Nur (2025) keskittyvät pelkästään itse moottoreihin. He kirjoittavat tavoitteidensa olevan ensin esittää olennaisimmat KPI:t tulevien autonomisten ratkaisujen arvioinnissa ja helpottaen vertailua perinteisiin liikennemuotoihin. Heidän mukaansa autonomiset laivat olisivat tulevaisuudessa kaikista ympäristöystävällisin ratkaisu nykyisten miehitettyjen rahtilaivojen tilalla. Näiden autonomisten laivojen energiantuotannon vaihtoehtoja yhdistetään myös samaan tutkimukseen.

Zis ja muut (2023) valitsevat kolme eri reittiä tai käyttöpaikkaa indikaattoreiden laskemiseen. Niiden yhdistelmästä kirjoittajat pyrkivät saamaan tietoa sekä sisämaan reiteistä että lyhyen matkan merireiteistä sekä valittavan aluksen tyypistä. Tietojen syötöstä aluksilta saatiin vain noin 40 % pyydetystä datan määrästä, joten puuttuvan datan kirjoittajat ovat muodostaneet tiettyjen oletusten perusteella. Tämä on otettu huomioon tuloksia tarkastellessa. Ensimmäiselle, Rotterdam–Norja reitille, kirjoittajat vertailevat sähköaluksen ja kaksipolttoainemoottorilla varustetun aluksen eroja. Metanolilla ja dieselillä kulkevan laivan kustannusten Zis ja muut (2023) kirjoittavat olevan verrattavissa nykyisiin ratkaisuihin. Kuitenkin kirjoittajat ilmaisevat tiedon määrän kunkin ratkaisun kuormittavuudesta olevan liian pieni autonomisen ja tavallisen palveluratkaisun vertailemiseen keskenään.

Wu ja muut (2024) kirjoittavat suorittaneensa tapauskohtaisen tutkimuksen alukselle, joka seilaa Tukholma–Maarianhamina välillä, ja voi kuljettaa yhteensä 1800 matkustajaa. Heidän tarkoituksenaan on selvittää, pitäisikö aluksen moottorin olla diesel- vai kaksipolttoainemoottori. Tässä he hyödyntävät rakentamaansa kapasiteetin allokoimisen ja toiminnan optimoinnin mallia, joka on luotu hyödyntäen MINLP-metodia (eng. Mixed-Integer Nonlinear Programming). Tavoitteenaan mallin rakentamisessa kirjoittajilla on laivojen energiajärjestelmiin liittyvien päätöksenteon helpottaminen ottaen huomioon energiatehokkuus, päästöt, kulut, integraation sekä riskit. Metodien kerrotaan lisäksi kannustavan älykkäitä, digitaalisia ja puhtaita vähähiilisiä ratkaisuja. Diesel ainoana polttoaineena tarkoittaa aluksen energiantuotannon rakenteen yksinkertaisuutta, mutta ympäristövaatimukseen dieselmoottori ei enää vastaa täysin, kuten aiemmin on käsitelty. Tutkimusaukokseen kirjoittajat esittävät koko aluksen tasolla tapahtuvan suunnittelun, päätöksenteon ja arvioinnin, jonka he pyrkivät työssään kattamaan holistisella optimoinnilla ja arviointimenetelmällä.

Tutkimuksen tulokset perustuvat esimerkiksi seuraaviin oletuksiin: dieselkäyttöisen generaattorin ja kahden polttoaineen generaattorin eri kulutustasoihin, öljyn kulutustasoon ja ikätasoon. Tarkasteltavina ovat aluksen energiankulutus, johon kuuluu

niin mekaaninen kuin sähköinen energia lämpöenergian lisäksi. Tuloksenaan kirjoittajat esittävät taloudellisesti järkevimmäksi ratkaisuksi kaksipolttoainemoottorin, jolla on korkeampi alkupääoman tarve, mutta jonka polttoainekulutus on kirjoittajien mukaan lähes viidesosan (19 %) dieselmoottoria vähäisempää. Kaksipolttoainemoottoreiden kirjoitetaan olevan korkealaatuinen energiantuotantoteknologia, joka tarjoaa risteilyalukselle tasapainoa taloudellisuuden ja ympäristönsuojelun välillä. (Wu ja muut, 2024)

4.2 Luotettavuus ja turvallisuus

Kirolivanos ja Jeong (2025) tutkivat kaksipolttoainemoottoreiden luotettavuutta, sillä ennakoivia huoltoja tarvitsee heidän mukaansa tulevaisuudessa suunnitella yhä enemmän. He analysoivat ja vertailevat teoksessaan yksityiskohtaisesti dieselmoottoria ja kahta eri kaksipolttoainemoottoria dynaamisen vikatilanneanalyysin, DFTA-menetelmän (eng. Dynamic Fault Tree Analysis), avulla. DFTA-menetelmää kirjoittajat kuvaavat yhdeksi luotetuimmista kvantitatiivisista turvallisuuden analysointimenetelmistä, ja menetelmän kuvataan antavan suuren paikkansapitävyyden omaavia tuloksia. Kirolivanos ja Jeong (2025) vertailevat kolmen eri moottorin luotettavuutta tavoitteenaan antaa neuvoja ennakoivan kunnossapidon tai huollon toteutukseen.

Kirolivanos ja Jeong (2025) pyrkivät antamaan tuloksensa maksimoiden moottoreiden luotettavuutta, mutta minimoiden kriittisyyden tasoa. Tuloksiin johtaa kolme eri simulaatiota, joiden pohjalla on DFTA-analyysit. Kaikissa kolmessa simulaatiossa eniten kriittisiä toimintahäiriöitä esiintyi moottoreiden mekaanisissa komponenteissa ja erityisesti polttoöljyn syöttöjärjestelmissä. Kirjoittajien mukaan tämä oli odotettavissa. He esittelevät tuloksiaan myös keskiarvoisen luotettavuuden avulla, ja tällöin simulaatioista dieselmoottoria paremmin onnistuivat molemmat kaksipolttoainemoottorit. Kriittisten komponenttien osalta Kirolivanos ja Jeong (2025) suosittelevat varaosien saatavuuden parantamista, mutta koko moottorin luotettavuuden kannalta tiheämmät huoltovälit olisivat suositeltavia. Tällöin he kertovat

luotettavuuden paranevan ja tiettyjen osien kriittisyyden pienenevän. Tulevassa suunnittelussa ja kaikessa toiminnassa moottoreihin liittyen tulisi nämä pitää mielessä, koska turvallisuus ja moottorien toiminnan ylläpito on kirjoittajien mukaan kaksi tärkeintä aspektia.

Stoumpos ja muut (2021) keskittyvät teoksessaan turvallisuuteen, jonka he määrittelevät olevan tila, jossa systeemi toimii aiheuttamatta haittaa ihmisille, ympäristölle tai varoille. Tutkimuksensa tarkoituksena on tunnistaa nelitahtisten DF-moottoreiden turvallisuusriskit, jotka johtuvat moottorin ohjausjärjestelmän vioista tai toimintahäiriöistä sekä vakaassa että vaihtelevassa tilassa. Tavoitteena tutkimuksella on tarjota suosituksia turvallisuusmittareiden ja moottorin turvallisuustason parantamiseksi yhdistämällä eri analyysijä simulointityökaluihin ja täten arvioimalla moottorin turvallisuustasoa. Kirjoittajien luoma menetelmä yhdistää riskianalyysia ja tietokonesimulaatiota, jolloin tutkimus on edullisempi toteuttaa kuin oikealla moottorilla. Riskianalyysi toteutetaan FMECA-menetelmää hyödyntäen, jonka kirjoittajat määrittelevät vikatyypin tunnistamiseen ja niiden vaikutusten arviointiin tarkoitettuna menetelmänä. FMECA on Stoumpoksen ja muiden (2021) mukaan sovellettavissa erilaisiin järjestelmäabstraktioihin ja niiden tasoihin. Riskianalyysissa he hyödyntävät RPN-käsitettä (Risk Priority Number), joka asettaa riskit luokiteltaviksi vakavuutensa perusteella. RPN määrittellään kirjoittajien mukaan luokittelemalla riskien esiintyvyys, vakavuus ja havaittavuus.

Tuloksissaan Stoumpos ja muut (2021) kirjoittavat onnistuneesti tunnistaneensa vaaralliset tilanteet moottorin käytössä simulaation avulla. Tuloksissaan kirjoittajat luokittelevat kriittisimpiin vaaratilanteisiin kuuluviksi nopeus- sekä ahtopaineantureihin sekä polttoaineputkiin liittyvät viat. Ne luokitellaan kriittisimmiksi, koska niiden viat vaikuttavat olennaisesti moottorin ohjaukseen. FMECA-menetelmän tulokset korostavat näiden kriittisimpien vikojen merkitystä erityisesti polttoaineen siirtymävaiheessa. Moottorisimulaation kirjoitetaan tukevan menetelmän tulosten todentamista. Tulevaisuuden näkymistä kirjoittajat kertovat, kuinka turvallisuuden parantamiseen

voidaan hyödyntää materiaalien, kehittyneiden suunnittelualgoritmien ja tekoälyn sekä koneoppimisen viimeisimpiä kehityssuuntia. Vikojen vakavuutta on myös mahdollista kirjoittajien mukaan vähentää hidastamalla moottoria tai käyttämällä redundantteja komponentteja, jotka vähentävät mahdollisia vaikutuksia. (Stoumpos ja muut, 2021)

4.3 Muut moottorityypit ja vianmääritys

Youssef ja muut (2024) kirjoittavat suorittaneensa tutkimuksen dieselmootoreiden datapohjaisista vianmääritystekniikoista nimenomaan merenkulkualalla. Artikkelissaan kirjoittajat tarkastelevat vianmäärityksen merkitystä painostaen eri järjestelmiä ja yleisimpiä vikoja ottaen huomioon viimeaikaiset edistysaskeleet datapohjaisissa lähestymistavoissa tehokkaassa laivamoottoreiden huollossa. Yhdeksi tavoitteekseen he kertovat toimintahäiriöiden ennustamisen säästöt, kun moottoreiden viat päästään ehkäisemään ennen niiden sattumista. He siis käsittelevät Kiroliivanoksen ja Jeongin (2025) tavoin ennakoituja huoltoja. Suunnitellusta aikaan tai ajokilometreihin sitoutuneesta väliaikaishuollosta siirryttäisiinkin ehkäisevän huoltamisen malliin diagnoosimenetelmien avulla. Nämä diagnoosimenetelmät Youssef ja muut (2024) jakavat kolmeen eri osa-alueeseen: mallinnuspohjaisiin, laadullisiin empiirisiin tietoihin perustuviin sekä dataan perustuviin menetelmiin. Datan kouluttamista varten hyödynnettäisiin moottorin koeajotilannetta, jossa malli rakennettaisiin. Kouluttamisen jälkeen mallia päästäisiin kokeilemaan ja todentamaan sen valmius oikeanlaisen diagnoosin antamiseen.

Youssef ja muut (2024) kirjoittavat artikkelinsa alkupuolella diagnostiikkatekniikoiden evoluutiosta dieselillä käyvien laivamoottoreiden käytössä. Ensimmäisessä vaiheessa suoritettiin käytännön kokeiluja kentällä, joissa hankitut signaalit vaativat lisäprosessointia relevanttien vikojen ominaisuuksien erottamiseksi. Se sijoittuu kirjoittajien mukaan vuosilukujen 1960–1990 väliin. Seuraava vaihe, joka sijoittuu luvuille 1990–2010, esitteli verkossa tapahtuvan kunnonvalvonnan ja etänä tapahtuvan vianmäärityksen, jotka sallivat reaaliaikaisen vikojen havaitsemisen. Kaikista uusimman

vaiheen kirjoittajat kertovan olevan älykäs vianmääritys, johon kuuluu edistynyt automaatio, tekoäly, ja massadata-analytiikka.

Tuloksissaan kirjoittavat kertovat kaikista kriittisimmän moottorin komponentin olevan sen ruiskutusjärjestelmä (Youssef ja muut, 2024). Pieninkin vika järjestelmässä vaikuttaa kirjoittajien mukaan heti moottorin tehokkuuteen suurentaen samanaikaisesti päästö määrää sekä melusaastetta. Näille molemmille on määritelty sallitut maksimiarvot, kuten aiemmin luvussa 3 on kerrottu. Youssef ja muut (2024) kirjoittavatkin, kuinka juuri melun ja päästöjen määrää ajatellen vikojen tarkkailu on erityisen tärkeässä roolissa. Polttoainejärjestelmän lisäksi tärkeiksi järjestelmiksi kirjoittajat esittävät imu- sekä pakojärjestelmän sekä voitelu- ja jäähdytysjärjestelmät.

Qin ja muut (2020) kirjoittavat artikkelissaan myös dieselmootoreista, tarkalleen niiden tuotantovaiheen data-analytiikasta. Data-analytiikka on mahdollista useiden laajasti käytettyjen tiedonhankintalaitteiden, kuten antureiden, avulla. Kirjoittajien tavoitteena on toteuttaa tutkimus, jossa valmistusprosessin aikana kerätystä datasta voidaan kerätä kriittiset muuttujat, jotka vaikuttavat lopputuotteen laatuun. He kirjoittavat laadun poikkeamien siirtymisen ja kytkeytymisen johtavan lopullisen laadun vaihteluun. Tutkimuksessa tarkasteltava valmistusprosessi koostuu asennuslinjasta, jossa on yli sata eri pistettä. Näillä työpisteillä mitataan tai tutkitaan 172 eri laatuominaisuutta, joista esimerkkinä kirjoittajat antavat vääntömomentit, aksiaalivälkyt ja momentit.

Qinin ja muiden (2020) luoma NMI-ND -menetelmä koostuu kahdesta osasta tai vaiheesta, keskinäisestä informaatiosta ja verkon dekonvoluutiosta. Normalisoidulla keskinäisellä informaatiolla (eng. Normalised Mutual Information, NMI) mitataan muuttujien välistä riippuvuutta. NMI pystyy tunnistamaan monimutkaisia ja epälineaarisiakin yhteyksiä perinteistä korrelaatioanalyysia paremmin. Verkon dekonvoluutio (eng. Network Deconvolution, ND) taas edustaa menetelmän älykästä osaa, jonka avulla järjestelmästä voidaan poistaa epäsuorat vaikutukset, eli kohina.

Tällöin jäljelle jäävä osa sisältää ainoastaan todellisia syy-seuraussuhteita valittujen muuttujien välillä.

Dieselmoottorin tehon vakauden tehokas hallinta on yksi tärkeimmistä laatuindikaattoreista, ja siksi sillä on kirjoittajien mukaan ratkaiseva merkitys tuotteiden kilpailukyvyyn parantamisessa. Valtavan datamäärän kerrotaan auttavan valmistusprosessin eri muuttujien arvioinnissa ja mahdollistaen nykyisen datapohjaisen laadunhallinnan, mutta samalla aiheuttavan kohinaa. Kohinalla kirjoittajat tarkoittavat epäolennaista dataa, jota aiempien vastaavien menetelmien on ollut hankala suodattaa. Tuloksekseen kirjoittajat kertovat onnistuneen juurisyyapaikannuksen, joka on tehokas tapa vähentää laatuongelmia tuotannossa. Vertailu NMI-ND:n ja muiden edustavien ominaisuusvalinta-algoritmien välillä osoittaa, että NMI-ND toimii paremmin sekä tehokkuuden että tuloksellisuuden kannalta. (Qin ja muut, 2020)

Aiemmin käsiteltyjen mäntämootoreiden tavoin usean polttoaineen käyttö aiheuttaa tiettyjä erityispiirteitä tai jopa hankaluuksia myös turbiinimootoreissa, joita käytetään esimerkiksi ilmailussa. Dopieralski ja muut (2025) kirjoittavat, kuinka monen polttoaineen käyttö turbiinimootoreissa tarjoaa operationaalista joustavuutta ja päästöjen vähenemistä, aivan kuten aiemmin on kirjoitettu. Kuitenkin turbiinimootoreiden toimintaperiaate eroaa, ja siksi myös toiminnalliset ja laatuun vaikuttavat haasteet ovat erilaiset verrattuna aiemmin käsiteltyihin mäntämootoreihin. Vaihtoehtoisten polttoaineiden käytön mahdollistaminen vaatii kirjoittajien mukaan teknologista muokkaamista ja palamisprosessien optimointia, mutta tarpeet eivät ole este.

Kirjoittajat käsittelevät laajasti eri polttoainevaihtoehtoja, kuten vetyä, biodieseliä sekä maakaasua. Tuloksenaan he esittelevät useamman polttoaineen käytön tarjoavan energiatehokkuuden ja yhteensopivuuden eri rajoitusten kanssa. Artikkelin loppuun on listattu viisi varsinaista johtopäätöstä, joista esimerkkeinä lyhennetty tutkimusaika mallinnusten avulla, vedyn potentiaali ilmailualalla erityisesti nestemäisessä muodossa,

sekä laboratoriotutkimusten tärkeys korvaamatta aidoissa olosuhteissa suoritettuja testejä. (Dopieralski ja muut, 2025)

5 Johtopäätökset

Laatujohtamisen merkitys monipolttoainemoottoreiden valmistuksessa on ilmeisen suuri tasalaatuisten ja ominaisuuksiltaan samankaltaisten tuotteiden valmistuksen kannalta. Uudet teknologiat vaikuttavat vahvasti moottoreiden valmistusprosessiin ja kehittävät sitä. Jatkuvasti kehittyvät vianmääritysmenetelmät helpottavat mutta muokkaavat laadun henkilöstön työtä. Aikaa voidaan säästää esimerkiksi simulointityökaluilla ja sitä kautta oppia moottoreiden toiminnasta aiempaa nopeammin ja tehokkaammin. Kuitenkin simulointityökaluja käytettäessä tulee huomioida aitojen olosuhteiden ero simulaatioon, ja varmistua sen paikkansapitävyydestä testaamalla järjestelmää myös aidonkaltaisissa olosuhteissa, joissa voidaan ottaa huomioon esimerkiksi melu- ja värinäätasot.

Toteutin kirjallisuuskatsaukseni hyödyntäen DF-moottoreihin ja laatujohtamiseen liittyviä käsitteitä englanniksi. Laajuudeltaan olen hakutuloksiini tyytyväinen, ja ne ovat mahdollisimman tuoreita, mutta tarpeeksi vanhoja onnistuneen vertaisarvioinnin suoritukseen. Olisin toivonut enemmän tuloksia nimenomaan monipolttoainemoottoreista, mutta koska nykyään eniten käytetyt ovat juuri kahdella polttoaineella käyviä, päätin rajata tutkimusalueen näihin. Käsittelin lopuksi aiheitani myös pelkästään dieselillä toimivien moottoreiden sekä turbiinimoottoreiden näkökulmasta, jotta saisin laajemmin hahmotettua kokonaiskuvan. Näkökulmaa pyrin laajentamaan myös valitsemalla niin moottori-, kuin laivatasolla toteutettuja tutkimuksia.

Uudet teknologiat ja komponentit aiheuttavat mahdollisesti laadullisia haasteita, koska niistä ei ole saatavilla paljoa aiempaa dataa. Näitä laadullisia haasteita voidaan juuri laatujohtamisella ehkäistä esimerkiksi kartoittamalla mahdolliset riskit laajasti ja kattavasti. Kun uudet komponentit ovat päätyneet tuotantoon, niistä saatava data on erityisen tärkeää tulevia projekteja ja niiden laatujohtamista ajatellen. Kriittisimmiksi todetut komponentit, kuten polttoaineruiskutusjärjestelmän osat, tulisi asettaa laatujohtamisjärjestelmää suunniteltaessa etusijalle, jotta kaikista kriittisimmät viat ja poikkeamat voidaan käsitellä tärkeysjärjestyksessä ensimmäisenä. Täten suuret vahingot

vältetään ja tulevat voidaan ennaltaehkäistä, mikäli poikkeamista seuraavat laatutoimenpiteet on dokumentoitu tarkasti. Tässä voidaan hyödyntää esimerkiksi aiemmin esiteltyä RPN-menetelmää (Stoumpos ja muut, 2021).

Koska valmistusprosessissa luotetaan alihankintaan ja komponenttien toimittajiin, kriittisten komponenttien laatuvaatimuksia tulisi tarkastella. Mikäli kyseisten komponenttien laatuvaatimuksia kiristettäisiin, voitaisiin kriittisyyden vaikutuksia saada pienennettyä, ja sitä kautta laatujärjestelmän keskittymistä kohdennettua muualle, kuin yksittäisiin kriittisimpiin osiin tai osakokoonpanoihin. Valmistusprosessin ulkopuolella, kun moottori on toimitettu asiakkaalle, voidaan kriittisten komponenttien tai osakokoonpanojen kriittisyyttä madaltaa esimerkiksi ennakoivan huollon avulla. Tieto näistä kaikista tärkeimmistä tai riskialttiista komponenteista on siis elintärkeää, ja siksi laatujohtamisen toteutuksessa tulisi hyödyntää datapohjaista lähestymistapaa. Toki erilaisten tarkastuksien ja muiden perinteisten menetelmien tärkeys on yhä suuri, mutta lisääntyvä datapainotteisuus ei ole mielestäni huono asia. Dataa seuraamalla ja analysoimalla säästetään aikaa ja tiedetään paljon enemmän moottorin toiminnasta, kun pelkkien fyysisten tarkastusten avulla. Datapohjaista lähestymistapaa hyödyntäen laatujärjestelmässä olisi mahdollista myös hyödyntää nykyaikaisia teknologioita, kuten tekoälyä, robotiikkaa tai koneoppimista.

Esitellyt KPI-mittarit, kuten moottorin nettoteho ja jarrujen lämpötehokkuus täytyy ottaa huomioon ensinnäkin moottorin suunnitteluprosessissa, ja sen jälkeen valmistusprosessissa. Myös laatujärjestelmää suunniteltaessa mittarit tulisi olla tiedossa, jotta järjestelmät ja toiminnot varmistavat tuotteiden vastaavan asiakkaan tarpeita tehokkaasti. On tärkeää pyrkiä löytämään tasapaino päästöjen vähentämisen ja moottorin suorituskyvyn säilymisen välillä, jotta merenkulkuala pystyy jatkamaan toimintaansa nykyiseen tapaan.

Jatkuva parantaminen tulee varmasti jatkossa keskittymään vielä enemmän päästöjen vähentämiseen. Kiristyvät ympäristövaatimukset pakottavat niin moottorivalmistajat

kuin laivayhtiötkin muokkaamaan nykyisiä järjestelmiään vaatimusten mukaisiksi. Koko yritykseltä vaaditaan nopeaa toimintaa ja järjestelmien tulee olla helposti päivitettävissä, ehkä jopa muokattavissa uuteen. Vaikka empiirisiä tutkimuksia aiheesta on saatavilla rajoitetusti käyttämälläni hakulauseilla, tämä kirjallisuuskatsaus pyrki kokoamaan olennaisia aiheita laatujohtamisen toteuttamiseen monopolitoainemoottoreiden valmistusprosessiin. Tulevaisuudessa tutkimusta voisi jatkaa empiirisyyttä korostaen, ja tietyn tuotantolinjan laatujohtamista tarkastellen. Täten empiirisyydestä muodostuisi vahvat perusteet ja työkalut konkreettisille parannusehdotuksille laatujohtamisen parantamiseksi juuri kyseisellä tuotantolinjalla.

Lähteet

Bhat, K. S. (2009). *Total Quality Management*. Himalaya Publishing House.

Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis: Quality, productivity and competitive position*. Cambridge University Press.

DNV. (-n.-d.). *Tietoa DNV:stä*. Noudettu 7.12.2025 osoitteesta <https://www.dnv.fi/about/>

Dopieralski, M., Dziubak, T., & Polak, F. (2025). Description of multi-fuel solutions for alternative fuel systems in turbine engines. *Combustion Engines*. <https://doi.org/10.19206/CE-203885>

Eronen, R., & Aalto, T. (2017). Energiaa: Kaksi vuosisataa voimakonevalmistusta Auran rannoilla. Forum Marinum.

Furterer, S. L. (2022). *The ASQ certified quality process analyst handbook* (Third edition). ASQ Quality Press.

Hajimirzaee, S., Shaw, D., Howard, P., & Doyle, A. M. (2021). Industrial scale 3D printed catalytic converter for emissions control in a dual-fuel heavy-duty engine. *Chemical Engineering Science*, 231, 116287-. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116287>

Harvard Library. (26.11.2025). *Guide to Technical Standards*. Noudettu 15.1.2026 osoitteesta <https://guides.library.harvard.edu/standards/why>

Hosseini, S. H., Tsolakis, A., Alagumalai, A., Mahian, O., Lam, S. S., Pan, J., Peng, W., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2023). Use of hydrogen in dual-fuel diesel engines. *Progress in energy and combustion science*, 98, 101100. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101100>

International Maritime Organization. (-n.-d.-a). [IMO – the International Maritime Organization]. Noudettu 15.12.2025 osoitteesta <https://www.imo.org/>

International Maritime Organization. (-n.-d.-b). *International Convention for the Safety of Life at Sea*. Noudettu 17.12.2025 osoitteesta [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx)

International Maritime Organization. (-n.-d.-c) *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. Noudettu 17.15.2025 osoitteesta [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx)

Kirolivanos, G. L., & Jeong, B. (2022). Comparative reliability analysis and enhancement of marine dual-fuel engines. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 6(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/25725084.2021.1968663>

Kurien, C. & Mittal, M. (2022). Review on the production and utilization of green ammonia as an alternate fuel in dual-fuel compression ignition engines. *Energy Conversion and Management*, 251, 114990. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114990>

Latarche, M. (2021). *Pounder's marine diesel engines and gas turbines* (Tenth edition). Butterworth-Heinemann.

Lejda, K. (2012). *Internal Combustion Engines*. InTech. <https://doi.org/10.5772/2806>

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (17.11.2022) *Luokitulaitokset*. Noudettu 15.12.2025 osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/luokitulaitokset>

- Martyr, A., & Plint, M. A. (2012). *Engine testing: The design, building, modification and use of powertrain test facilities* (4th ed). Butterworth-Heinemann.
- Mohammadpour, J., & Salehi, F. (2025). A review of alternative liquid fuels in marine engines. *Applications in Energy and Combustion Science*, *24*, 100394.
<https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2025.100394>
- Nelles, M. (2019). New Engines at Volvo Trucks. *ATZheavy Duty Worldwide*, *12*(3), 12–17.
<https://doi.org/10.1007/s41321-019-0033-7>
- Oakland, J. S., Oakland, R. J., & Turner, M. A. (2020). *Total Quality Management and Operational Excellence: Text with Cases*. Routledge.
- Park, H., Shim, E., Lee, J., Oh, S., Kim, C., Lee, Y., & Kang, K. (2023). Comparative evaluation of conventional dual fuel, early pilot, and reactivity-controlled compression ignition modes in a natural gas-diesel dual-fuel engine. *Energy*, *268*, 126769. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126769>
- Pries, K. H., & Quigley, J. M. (2012). *Total Quality Management for Project Management*. Auerbach Publishers, Incorporated.
- Qin, W., Zha, D., & Zhang, J. (2020). An effective approach for causal variables analysis in diesel engine production by using mutual information and network deconvolution. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *31*(7), 1661–1671.
<https://doi.org/10.1007/s10845-018-1397-8>
- Rao, X., Yuan, C., Guo, Z., Xu, Y., & Sheng, C. (2025). Methanol as an alternative fuel for marine engines: A comprehensive review of current state, opportunities, and challenges. *Renewable Energy*, *252*, 123562.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123562>

- Sahoo, B. B., Sahoo, N., & Saha, U. K. (2009). Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(6), 1151–1184.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.003>
- Sitorus, T. B., & Nur, T. B. (2025). An integrative review of dual-fuel strategies, Nano-additives, and emission control in compression ignition engines fueled by renewable energy sources. *Applied Energy*, *400*, 126614.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126614>
- Stamatis, D. H. (2012). 10 essentials for high performance quality in the 21st century. CRC Press.
- Stoumpos, S., Bolbot, V., Theotokatos, G., & Boulougouris, E. (2021). Safety performance assessment of a marine dual-fuel engine by integrating failure mode, effects, and criticality analysis with simulation tools. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment*. <https://doi.org/10.1177/14750902211043423>
- Suomen Standardit ry. (-n.-d.) *Standardeista*. Noudettu 15.1.2026 osoitteesta <https://sfs.fi/standardeista/>
- Tan, R., Psaraftis, H. N., & Wang, D. Z. W. (2022). The speed limit debate: Optimal speed concepts revisited under a multi-fuel regime. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *111*, 103445.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103445>
- Van Basshuysen, R., & Schäfer, F. (2016). Internal combustion engine handbook: Basics, components, system, and perspectives (2nd edition). SAE International.

- Wu, N., Zhang, Fang, Zhang, Fuzheng, Jiang, C., Lin, J., Xie, S., Jing, R., & Zhao, Y. (2024). An integrated multi-objective optimization, evaluation, and decision-making method for ship energy system. *Applied Energy*, 373, 123917. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123917>
- Wu, Y. (2023). Optimal Selection of Multi-Fuel Engines for Ships Considering Fuel Price Uncertainty. *Mathematics (Basel)*, 11(17), 3621-. <https://doi.org/10.3390/math11173621>
- Xiang, L., Theotokatos, G., & Ding, Y. (2023). Parametric investigation on the performance-emissions trade-off and knocking occurrence of dual fuel engines using CFD. *Fuel*, 340, 127535. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127535>
- Yang, H., Rao, P., Simpson, T., Lu, Y., Witherell, P., Nassar, A. R., Reutzel, E., & Kumara, S. (2021). Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing. *Proceedings of the IEEE*, 109(4), 347–376. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034519>
- Youssef, A., Noura, H., El Amrani, A., El Adel, E., & Ouladsine, M. (2024). A Survey on Data-Driven Fault Diagnostic Techniques for Marine Diesel Engines. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.193>
- Zis, T. P. V., Psaraftis, H. N., & Reche-Vilanova, M. (2023). Design and application of a key performance indicator (KPI) framework for autonomous shipping in Europe. *Maritime Transport Research*, 5, 100095. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100095>