

## **WÄRTSILÄ JA AKUSTIIKKA - KATSAUS AJANKOHTAISIN HAASTEISIIN**

**Sami Oksanen, Kari Saine, Esa Nousiainen, Virpi Hankaniemi, Mikko Matalamäki,  
Peter Sundström, Pasi Kalamo**

Wärtsilä Finland Oy  
PL 252  
65101 VAASA  
etunimi.sukunimi@wartsila.com

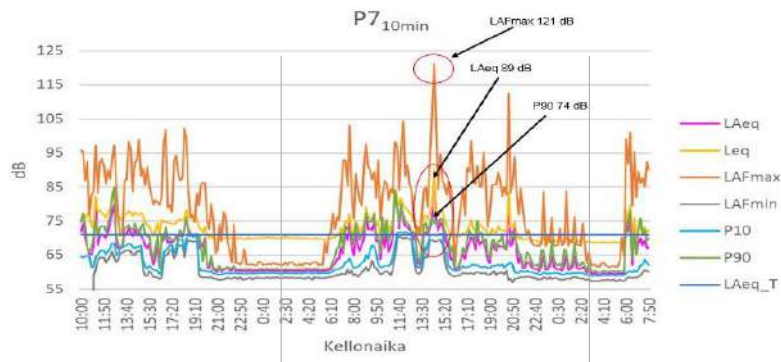
### **Tiivistelmä**

Tässä paperissa esitellään Wärtsilän viimeaikaisia aktiviteetteja akustisten haasteiden tiimoilta, tavoitteena on toimittaa katsaus eri liiketoimintoyksikköjen painopistealueilta. Laivanrakennussektorin tyypillisimmät akustiset haasteet liittyvät ensisijaisesti kansainvälisten melusäädösten täyttämiseen. Tyypillisesti nämä voidaan jakaa työterveysnäkökulmaan henkilöstön meluallistuksen hallinnan osalta, sekä työntekijän palautumisen turvaamiseen tarpeeseen soveltuvien lepotilojen osalta. Paperissa esitetään lyhyesti kuinka dieselmoottorin konehuoneeseen tuottamaa ilmamelutasoa on onnistuttu pudottamaan yli 5 dB. Toisena tavoitteena on melunhallinta matkustusmukavuuden takaamiseksi sekä ympäristölle aiheutuvaan meluallistuksen rajoittaminen hyväksyttävälle tasolle. Edellä mainittujen lisäksi asiakaslähtöisten ratkaisujen tavoitteena on tehostaa tilankäyttöä aluksilla optimoimalla laitteiston osien kokoa ja suorituskykyä. Näiden lisäksi matkustusmukavuuteen liittyvät seikat, kuten alhaiset melu- ja värinätasot, ovat tärkeitä etenkin matkustaja-alusten käyttäjille. Voimalaitospuolella haasteena ovat tyypillisesti tilan niukkuus, vastapainevaatimukset sekä melun vaimennusvaatimukset. Hajautetun energiatuotannon vallatessa alaa esim. Euroopassa sähkön ja siihen yhdistettyä lämmön tuotantoa sijoitetaan lähemmäs asutusalueita, jolloin tarvitaan kehittyneitä melunorjuntatoimia lainsäädännön vaatimusten täyttämiseen. Melunorjuntatoimista huolimatta laitoksen hyötysuhde ei saa vaarantua. Ratkaisuja edellä kuvailtuun monimuuttujaongelmaan tullaan esittelemään esimerkeillä. Ympäristömeluun liittyvät asiat ovat aina olleet painopistealueena Wärtsilässä, ja ovat myös ajankohtaisia jälkimarkkinoista vastaavan huolto liiketoiminnan osalta. Tyypilliset haasteet liittyvät esimerkiksi aluksen tuottaman korkean melupäästön aiheuttamien satamarajoitusten välttämiseen melunorjuntatoimenpiteillä. Tapausesimerkkinä esitellään pakomelunhallinta jälkiasennustapauksessa. Työympäristömeluallistuksen alentamiseksi on myös työskennelty määrätietoisesti, tästä esimerkkinä esitellään kuinka melutasoja on kyetty alentamaan moottoritehtaan työskentelytiloissa sekä tehtaan lähiympäristössä.

## 1 TEHDASHALLIN MELUKARTOITUS

Wärtsilässä on käynnissä tehdasmeluprojekti, jonka tavoitteena on kehittää työsuojelua ja uudistaa teollisuuden melumittauksia. Projektissa selvitetään tehdasympäristön melutasoja nykyistä melulainsäädäntöä tarkemmalla tasolla ja pyritään löytämään todellisia meluolosuhteita paremmin kuvaavia vaihtoehtoja vanhanaikaiseksi koetulle, yksittäiselle LAeq-suureelle. Projekti perustuu kokempohjaisiin havaintoihin [1, 2] siitä, ettei yksittäinen arvo riitä kuvaamaan moniulotteista ääniympäristöä (Kuva 1). Tavoitteena on myös tunnistaa merkittävimmät melulähteet Wärtsilän tehdasalueella sekä selvittää keinoja tehdasympäristön melutasojen pienentämiseksi ja työntekijöiden meluallistuksen vähentämiseksi. Kun äänilähteet ovat tunnistettavissa, voidaan esimerkiksi analysoida niiden esiintyvyyttä ja vaikutusta kokonaismelutasoihin sekä tarvittaessa arvioida ja priorisoida mahdollisia torjuntatoimenpiteitä oikeille kohteille.

Mittaukset suoritetaan mittaamalla yhtäaikaisesti kahdella jatkuvatoimisella Aures 2.0 Logger -mittalaitteella eri mittauspisteissä keskimäärin noin kaksi vuorokautta kerrallaan. Mittaukset haluttiin toteuttaa jatkuvatoimisilla loggereilla, koska tehdastyö ei enää nykyäänä tarkoita liukuhihnatyöskentelyä, vaan työntekijät liikkuvat usein päivän aikana työpisteeltä ja työvaiheelta toiselle. Tästä syystä annosmittareilla ei saada todenmukaista kuvaa eri työpisteiden melutasoista. Mittausaineistosta analysoidaan useita erilaisia parametreja, kuten keskiäänitasot, vähimmäis- ja enimmäisäänitasot sekä kiinnostavat prosenttipisteet (P10, P90, P95, P99) eri aikatasoilla (10 min, 1 h, työvuorot). Tuloksia tarkastellaan myös taajuusspektrien avulla, ja täydentäviä mittauksia tehdään lisäksi Brüel & Kjær Type 2250 -käsimitarilla. Mittaustulokset ovat auttaneet kartoittamaan Wärtsilän tehdashallien meluolosuhteita ja yleistä äänimaisemaa kattavasti eri vuorokaudenaikoina. Tulosten avulla on voitu tunnistaa melutasoa nostavia tekijöitä sekä suunnitella toimenpiteitä näiden melulähteiden vaikutuksen poistamiseksi tai pienentämiseksi.

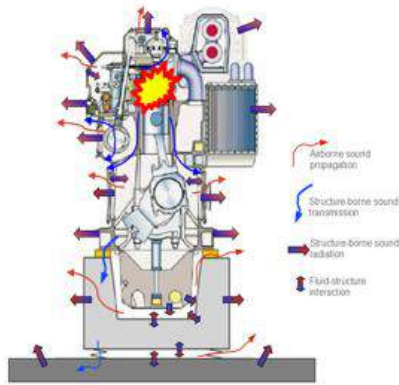


Kuva 1. Kuvaaja Wärtsilän tehdasmeluprojektin pilottimittauksista. Kuvassa on esitetty yhden mittauspisteen vajaan kahden vuorokauden mittausdata kymmenen minuutin aikatasossa.

## 2 DIESELMOOTTORIN MELUNHALLINTA

Tehokkuuden parantuessa moottorin sylinteripaineet kasvavat ja sen rakenteet tulevat kevyemmiksi. Nämä asiat johtavat moottorimelun voimistumiseen. Yhtäläilla me-

lusäädökset kiristyvät, joten moottorin tuottaman melun tutkimiseen ja rajoittamiseen on keskityttävä enenevässä määrin. Laivamoottorin melua koskevat säädökset määrittelee IMO (International Maritime Organization), joka on hiljattain päivittänyt SOLAS-vaatimukset (Safety of Life at Sea) [3]: laivan konehuoneen yksittäisen pisteen äänenpainetaso (1 m moottorista) täytyy olla alle 110 dBA. Suurimpana puutteena on, että edelleenkin puhutaan äänen painetasosta ja siihen vaikuttaa suuresti itse tila, eli jälkikäiunta-aika. Tähän tämä SOLAS ei ota kantaa. Wärtsilä aloitti reilut 10 vuotta sitten projektin, jonka tarkoituksena oli pienentää nelitahtisten moottoreiden melutasoja yhteistyössä VTT:n, KTH:n ja ODS:n kanssa.

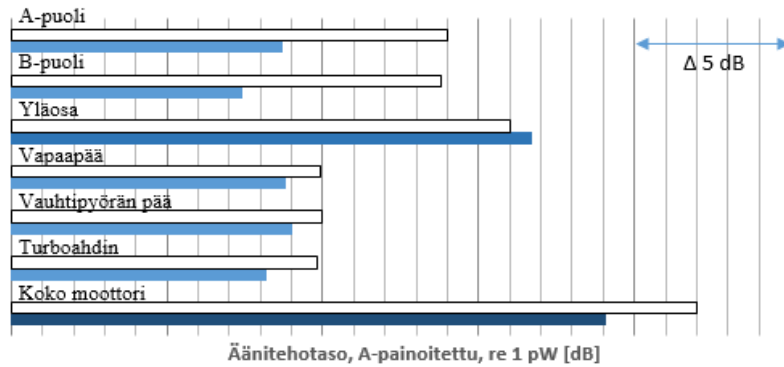


**Kuva 2 Dieselmoottorin herätteet**

tieteenalaan, kuten värähtelyyn, akustiikkaan, koneensuunnitteluun ja materiaalioppiin. Näiden avulla pystytään selvittämään syitä moottorin tuottamalle melulle.

Projektin ensimmäisessä vaiheessa luotiin mittaustandardi intensiteettimittauksille, jossa määriteltiin mittausalueet, taajuuskaistat jne. Tulokset ilmoitetaan terssikaistoina oktaavin sijasta. Seuraavassa vaiheessa kartoitettiin eri moottorityyppien todelliset melutasot. Suurimpana yllätyksenä oli melutasojen riippuvuus polttoaineiden välillä (diesel, kaasua) kokonaisvaikutus oli 3-4 dB. Seuraavaksi keskityttiin meluntorjuntatoimiin. Yhtenä ehkä kummallisista tuloksista oli, kun 6 mm alumiiniset kampi- ja nokkaluukut vaihdettiin 2 mm teräsluukkuihin, jonka seurauksena tämän alueen ääniteho laski keskimäärin 5 dB. Kesti pari vuotta ennen kuin todella ymmärrettiin, että miksi näin. Pikku hiljaa saavutettiin myös merkittäviä tuloksia melutasojen alenemisina. Viimeisessä vaiheessa keskityttiin voimakkaimpiin melulähteisiin, joista eräänä merkittävimpänä oli hammaspyörästö. Vuosien aikana Wärtsilä on saanut alennettua moottorin tuottamaa melua. Äänitehotaso moottorialueittain on esitetty kuvassa 3, jossa näkyy meluratkaisujen vaikutus, sillä äänitehot on ilmoitettu ennen (valk.) ja jälkeen (sin.) merkittävien meluratkaisujen käyttöönottoa. Wärtsilän tavoitteena on pudottaa moottoreiden melutasoja vielä 2 dB:llä, jolloin päästään äänenpaineessa tasolle 105 dBA [4]. Viisitoista vuotta sitten sidosryhmät eivät olleet kiinnostuneita tuotteiden melutasoista. Tällä hetkellä lähes jokaiseen sopimukseen sisältyy melurajat ja asiakkaat ovat myös entistä kiinnostuneempia kapeakaistaisesta meluntuotosta.

Monimutkaisen rakenteen ansiosta suurella keskinopealla dieselmoottorilla on valtava määrä erilaisia värähtelyn ja äänen lähteitä (Kuva 2). Voimakkaimmat herätteet värähtelylle ja äänelle ovat peräisin moottorin pyörivistä osista ja sylinterissä tapahtuvasta palamisreaktiosta. Eri järjestelmien tuottama ääni jaetaan useasti runkoääneen ja ilmaääneen niiden kulkeman reitin perusteella. Jäykän rakenteen ansiosta heräte kulkeutuu moottorin rakenteessa väivattomasti, joten moottori-melun tapauksessa runkoäänen merkitys on suuri. Moottorimelun tutkimisessa täytyy tutustua useaan eri



Kuva 3 Kymmenen vuoden työn tuloksena dieselmoottorin melutaso on laskenut 4 dB.

### 3 RATKAISUJA VOIMALAITOSMELUN HAASTEISIIN

Voimalaitoksen meluemission täytyy olla 10...20 dB hiljaisempi kuin laitos rakennetaan asutusalueen läheisyyteen teollisuusalueen sijaan. Käytännössä laitoksen melujalanjaljen (esim. 55 dBA:n alueen) täytyy olla 90...99 % pienempi. Pinta-alavertailu kertoo, että puhutaan todella merkittävästä erosta näiden kahden vaihtoehdon välillä.

#### 3.1 Ratkaisuja

Edelleenkin ylivertaisesti paras ja tehokkain melun alennuskeino on sen vähentäminen heti sen meluntuottajalla. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi jäähdytysradiaattoreiden puhaltimien valintaa sellaiseksi, että niiden ominaisäänitehotaso on mahdollisimman pieni [5]. Viime vuosina keskisuurten puhaltimien kehitystyö on ollut kiihtyvää ja ominaisääniteholtaan hyvien puhaltimien kustannustaso on tullut kilpailukykyiseksi. Puhallinsiipien kehitys on myös mahdollistanut sen, että voidaan käyttää halkaisijaltaan suurempia puhaltimia. Halkaisijaltaan 1,2 m puhaltimien korvaaminen 1,8 m saadaan aikaan se, että puhaltimien määrä yhtä jäähdytysradiaattoria kohden voidaan vähentää neljästä kolmeen. Tällöin meluemissio pienenee hieman. Tyypillisesti suurempien puhaltimien pyörimisnopeus on alhaisempi. Koska puhaltimen melupäästön riippuvuus kierrosluvusta kasvaa suunnittelusääntönä n. 5. potenssissa, on tällä merkittävä edullinen vaikutus koko laitoksen melupäästöön.

Erilaisilla puhaltimilla on erilainen spektri. Tämä aiheutuu erilaisesta siipiprofilista, puhaltimen ilmantuotto- ja paineenkorotusvaatimuksesta sekä siipikulmasta. Tämä ero on syytä ottaa huomioon, kun tarkastellaan voimalaitoksen ympäristömeluemissioita.

#### 3.2 Pakoputkiston meluemission haasteet

Tyypillisesti mäntämoottorilaitoksen pakoputki sijoitetaan eristettynä rakennusten ulkopuolelle ja vaimentimet usean moottorin yhteiseen piippujen tukirakenteeseen. Laitoksen melupäästöä saadaan kuitenkin alennettua tehokkaasti, jos laajakaistaiset pakovaimentimet sijoitetaan kanavaan heti moottorissa olevan turbon jälkeen ja näinollen pakoputki kulkee ulkona valmiiksi vaimentuneena. Eristys kuitenkin tarvitaan joka tapauksessa



**Kuva 4.** Pakovaimennin (kuvassa ylhäällä vasemmalla) on asennettu joustavasti voimalaitosrakennuksen sisälle.

lämmön eristeeksi ja meluemission edelleen vaimentamiseksi (Kuva 4). Euroopassa ja Yhdysvalloissa on tarpeita rakentaa voimalaitoksia lähelle asutusalueita. Tällöin on tarpeen tiivistää laitosalue mahdollisimman pieneksi, jotta voidaan tehdä maankäytöllisesti energiatiheää sähkön- ja lämmöntuotantoa. Tyypillisesti tällainen maankäytön suunnitelu aiheuttaa myös paineita voimalaitoksen meluemissiolle. Tällaisissa tapauksissa on eduksi asentaa moottorin pakoputkisto, lämmön talteenottolaitteet ja savukaasun puhdistuslaitteet rakennuksen sisälle. Tyypillisesti tällöin käytetään taloa, jossa moottorit ovat katutasossa ja edellä mainitut apulaitteet rakennuksen toisessa kerroksessa. Runkoäänten eristäminen on tärkeää, kun rakennetaan lähelle asuintiloja. Läpiviennit eristetään seinäelementeistä käyttämällä esimerkiksi kumia. Pakokanaviston joustava asennus eristää kanaviston maaperästä lähes täydellisesti ja tällöin maaperän kautta etenevä värinä jää merkityksettömäksi. Voimalaitoksen vibro-akustiset vaikutukset laitoksen lähellä jäävät minimaalisiksi, kunhan ilmaääninä on ensin vähennetty merkittävästi.

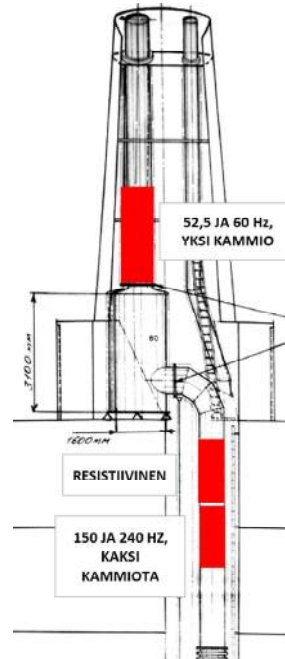
#### **4 PAKOÄÄNENVAIMENNUKSEN PÄIVITYS MOOTTORINVAIHTO-PROJEKTIN JÄLKITYÖNÄ**

Pakomelun vaimennuksessa käytetään tyypillisesti reaktiivisten (tasoaltoalue) ja resistiivisen (tasoaltoalueen yläpuolella) vaimentimien yhdistelmää, jonka suorituskyky on optimoitu herätteeseen [6, 7]. Pakomelun täsmävaimennukseen voidaan käyttää tietylle herätetaajuudelle viritettyjä neljännesaaltoresonaattoreita. Tämänlainen pakovaimennin järjestely sopii skaalautuvuutensa ansiosta myös jälkiasennettavaksi olemassa olevan järjestelmän suorituskyvyn parantamiseksi.

Arktiseen risteilijään oli vaihdettu pienemmät mutta tehokkaammat nelitahtimoottorit. Pakoputkisto vaimentimien oli kuitenkin jätetty vaihtamatta. Tämän seurauksena pakomelua havaittiin liian korkeaksi ja tekninen huolto kutsuttiin ratkomaan ongelmaa. Tilannetta lähdettiin selvittämään mittaamalla vallitseva tilanne ja suunnittelemalla uusi vaimennusratkaisu mittaustulosten pohjalta.

Mittaukset suoritettiin sekä 1/3-oktaavi- että kaapekaistamittauksin. Äänenpaine mitattiin sekä putken sisällä ennen vaimenninta että vapaassa kentässä pakoputken pään lähetyviltä. Vapaakenttämittauksissa havaittiin poikkeuksellisen suuria äänenpaineita. Vaikka A-painotuksella äänenpaine näyttäisi painottuvan taajuudelle 250 Hz ja sitä korkeammille taajuuksille, aikaisemman kokemuksen perusteella myös taajuudet 50...100 Hz katsottiin merkittäviksi.

Vanha vaimennin oli isokokoinen ja sen poistaminen hankalaa (Kuva 5). Siksi päädyttiin rakentamaan vaimennus useasta vaimenninelementistä vanhan vaimentimen lisäksi. Suurehko putkikoko mahdollisti suunnittelemaan komponentit, joiden ulkohalkaisija on sama kuin nykyisellä putkistolla. Päädyttiin toimittamaan seuraavat elementit: Yksikammioinen 1/4-aaltoresonaattori taajuuksille 52,5 Hz ja 60 Hz, kaksikammioinen 1/4-aaltoresonaattori taajuuksille 150 Hz ja 240 Hz Resistiivinen moduuli. Yksikammioinen vaimennin viritettiin 52,5 ja 60 Hz:n väliin. Resistiivinen vaimennin pultattiin yhteen kaksikammioisen vaimentimen kanssa asennettavaksi ennen vanhaa vaimenninta. Yksikammioinen vaimennin suunniteltiin asennettavaksi vanhan vaimentimen jälkeen, kuitenkin niin että resonaattorin portit ovat vaimentimen yläpäässä, jottei vanha vaimennin häiritse resonaattorin toimintaa.



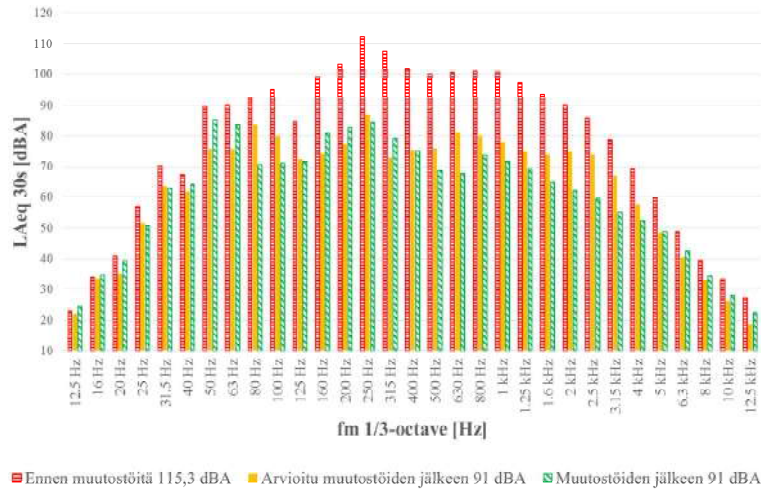
Kuva 5 Jälkiasennetut lisävaimentimet

Ennustettu äänenpaine uudella vaimennuksella laskettiin ja mittaukset toistettiin vaimentimien asennusten jälkeen. Äänenpaine laski 115 dBA:sta 91 dBA:een (kuva 6). Vaikka ennustettu äänenpaine oli juuri tuo 91 dBA, selviä eroja mitatun ja ennustetun äänenpaineen spektreissä kuitenkin havaittiin. Korkeampien taajuuksien parempi vaimennus on selitettävissä siten, että suunnittelutyökalu näyttäisi myös aikaisempien kokemusten mukaan aliarvioivan resistiivisen vaimennuksen tehokkuutta. Lisäksi suunnittelutyökalu olettaa että reaktiivinen vaimennus toimii vain taso-aaltoalueella. Mittausten perusteella reaktiivinen vaimennus toimii myös taso-aaltoalueen yläpuolella, tässä tapauksessa 500...800 Hz:llä. Matalien taajuuksien laskettua heikompi äänenvaimennus näyttäisi olevan johtua siitä, että 60 Hz resonaattori olisi asennut ylösalaisin. Tällöin resonaattorin portit olisivat lähempänä vanhaa vaimenninta. Tämä mallinnettiin ja tulokseksi saatiin:

- |  |                        |
|--|------------------------|
| a. Vaimennin oikein päin: 50 Hz -12 dB vaimennus | 63 Hz -16 dB vaimennus |
| b. Vaimennin väärin päin: 50 Hz -4 dB vaimennus  | 63 Hz -7 dB vaimennus  |

Ennusteen ja mittaustuloksen ero näillä kaistoilla on n. 8 dB, mikä täsmää melko hyvin mallinnuksen tulosten eroon.

Moottoreiden vaihtoprojekteissa pakoäänenvaimennus jää valitettavan usein huomiotta. Tilanteen parantaminen jälkikäteen on usein haastavaa, koska ratkaisuille ei ole tilaa eikä aikaa, eikä niitä ole budjetoitu. Usein vanhan vaimentimen poistaminen ja korvaaminen



Kuva 6 Äänenpaine pakoputken päässä ennen muutostöitä ja niiden jälkeen

uudella isolla vaimentimella on kallista ja aikaa vievää. Haasteena ratkaisussa ovat vanhan vaimentimen mallintaminen ja asiakkaan vastuulle jäävä asennustyö. Tässäkin tapauksessa vaimentimet asennettiin ennen ja jälkeen vanhan vaimentimen, vastoin ohjeistusta. Lisäksi yksi elementti lieee putkistossa väärin päin.

## 5 YHTEENVETO

Tässä paperissa esiteltiin viimeaikaisten tutkimus-, kehitys- ja asiakastoimitusprojektien sisältöä. Meluntorjunta on ollut ja pysyy tärkeänä painopistealueena Wärtsilän tutkimus- ja kehitystoiminnassa. Tavoitteena on laskea moottorin ilmamelut 105 dBA tasolle, taata että tehdasympäristö on Vaasan kaupungin hiljaisin paikka, sekä työympäristön melunhallinta työntekijöiden kuormituksen alentamiseksi ja työturvallisuuden lisäämiseksi.

### VIITTEET

- [1] Saine K., et al., “Noise control at workplaces”, *Internoise*, (2014).
- [2] Pääkkönen R., et al., “Discussion on noise control at workplaces”, *BNAM*, (2014).
- [3] Gao Z., et al., “SOLAS new noise regulation impact on engine noise reduction and engine room”, *CIMAC*, (2016).
- [4] Saine K. ja Gao Z., “Five dB reduction for large medium speed diesel engine”, *AAC* (2016).
- [5] Nousiainen E., et al., ”Mäntämoottorivoimalaitoksen meluntorjunnan paras käytettävissä oleva tekniikka”, *Akustiikkapäivät*, (2011).
- [6] Oksanen, S. ja Holmberg J., “Towards More Optimized Exhaust Silencer Realizations on board Ships – Status Update on the Compact Silencer System (CSS)”, *BNAM*, (2014).
- [7] Oksanen S., et al., “Optimized performance, design and manufacturing of compact silencer system for engine exhaust noise”, *CIMAC*, (2016).