

# **DIESELMOOTTORIN MELUN HALLITSEMINEN KONEAKUSTIIKAN OSAA- MISTA HYÖDYNTÄEN**

**Kari Saine<sup>1</sup>, Matias Aura<sup>1</sup>, Hannu Tienhaara<sup>1</sup>**

**Johannes Hyrynen<sup>2</sup>, Kari Saarinen<sup>2</sup>, Marko Kuivamäki<sup>2</sup>, Lasse Lamula<sup>2</sup>**

1 Wärtsilä Finland Oy, Wärtsilä Industrial Operation, Vaasa

2 VTT, Tampere

## **1 JOHDANTO**

Kansainväliset melumääräykset muuttuvat yhä vaativammiksi sekä ympäristön että työturvallisuuden kannalta. Wärtsilän asiakkaatkin ovat alkaneet kiinnittää entistä enemmän huomioita myös meluasioihin. Uudistuneita määräyksiä sovelletaan vanhoihin laitoksiin, jolloin melutason saattaminen vaaditulle tasolle ja täten laitoksen toiminnan jatkaminen vaatii jälkikäteen tehtäviä laitospäivityksiä. Laivojen konehuoneissa korkeimman sallitun melutason alittaminen on pienistä tiloista johtuen haasteellista. Moottorivalmistajien on panostettava entistä enemmän meluseikkoihin jo moottorin suunnitteluvaiheessa, jotta moottorin melutasot pysyisivät tulevaisuudessakin vaatimustasojen alapuolella. Aikaisemmin konehuoneen melusta ei oltu kovinkaan kiinnostuneita, vaikka jokaisen luokituslaitoksen ohjeissa on määritelty sallitut melutasot.

## **2 WÄRTSILÄN TARPEET**

Wärtsilä on toteuttanut yhdessä yhteistyökumppaniensa kanssa tutkimus- ja kehitysprojekteja, jotka tähtäävät suurten dieselmoottorien melupäästön vähentämiseen. Tavoitteena on alentaa moottoreiden säteilemää melua merkittävästi, vähintään 5 dB. Projektin ensimmäisessä vaiheessa tulokset ovat olleet erittäin rohkaisevia ja tavoitteet on saatu pääosin täytettyä. Työ on kohdistettu pakokaasumelun ja moottorin pintamelun hallintaan. Tuotteen osalähteiden meluntorjunta on ollut tärkeä kohde. Lisäksi projekteissa on kehitetty moottorien äänensynnyn analysoinnin mittaus- ja mallinnusmenetelmiä, jotta tulevaisuudessa on mahdollista suunnitella vähämeluisia moottoreita.

Tutkimuskonsortioon on kuulunut sekä koti- että ulkomaisia osapuolia. Wärtsilän lisäksi työhön ovat osallistuneet mm. VTT, sekä Ruotsista Ødegaard & Danneberg-Samsøe Sverige Ab, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) ja ABB Västerås. Projektien aikana on käynyt selväksi, että kotimaassa koneakustiikkaa hallitsevia tahoja on erittäin vähän ja tarve alan koulutuksen lisäämiselle on olemassa. Neljästä viimeisestä koneakustiikan diplomityöstä, vuosi per diplomityö, kolme on tehty KTH:n kautta ja näyttää vahvasti siltä, että suuntaus jatkuu. Wärtsilä on pakotettu hakemaan yhteistyökumppaneita myös maan rajojen ulkopuolelta.

## **3 LUUKKIJEN MELUNTORJUNTA**

Dieselmoottorin kampikammion ja nokka-akselin luukkujen on tiedetty jo pitkään olevan moottorin A-puolen tärkein melulähde. Luukut ovat alumiinivalua, fysikaalisesti jäykistettyjä laattoja, jotka on kiinnitetty moottorin lohkoon neljällä pultilla. Reunajäykisteiden välillä

luukkujen materiaalipaksuus vaihtelee, kampikammion luukuilla paksuus on luokkaa 6–10 mm. Moottorin B-puolella olevat, räjähdysventtiilillä varustetut luukut ovat hiljaisempia.

Luukkuihin kohdistuu kaksi erilaista äänensyntymekanismia. Moottorin eri osiin kohdistuvat herätevoimat synnyttävät rakenteisiin mekaanista värähtelyä, joka etenee luukkuihin ja säteilee ääneksi. Sama värähtely synnyttää moottorin sisään korkean äänenpainetason, joka läpäisee luukun rakenteen.

Kartoitusmittausten tulosten perusteella on tehty useita havaintoja. Kampikammion luukun äänensäteily vahvistuu luukun ominaistajuuksien vaikutuksesta, B-puolen luukuissa räjähdysventtiilin rakenne poistaa resonanssien vahvistusvaikutuksen. Ominaisajaudet heräävät tehokkaasti moottorin kaikissa käyttömoodeissa. Melko hyvän mobiliteettisovituksen johdosta runkoääni siirtyy tehokkaasti lohkosta luukkuihin. Moottorin värähtelykenttä on mm. useista erivaiheisista herätteistä johtuen diffuusi. Tästä syystä rakenteiden äänensäteily on tehokasta myös koinsidenssitaajuuden alapuolella. Kampikammion luukun ääneneristävyys on massalain mukaista huonompi, mikä on tyypillistä jäykistetyille rakenteelle. Vaikka moottorin sisäpuoleisen heräteäänepainetason mittaaminen oli ongelmallista, arvioitiin että luukun vibroakustisen toiminnan kannalta rakenteen ääneneristävyys on riittävä.

Vaihtoehtoisten luukurakenteiden kehittämisessä on käytetty apuna useamman tasoista mallinusta, laboratorio- ja kenttämittauksia. FEM- ja BEM-malleien avulla on vertailtu laattarakenteiden äänensäteilyä, reunoilta tuettuna ja äärettömälle tasolle asetettuna sekä lohkon osaan kiinnitettyinä.[1,2] Laboratorio-olosuhteissa on mitattu prototyypiluukkujen ääneneristävyys ja määritetty luukun säteilyindeksit eri herätetapauksissa. Kenttäolosuhteissa on selvitetty luukkujen vaikutusta A-sivun säteilemään äänitehoon ja vertailtiin intensiteettimittauksin yksittäisiä protoluukkuja. Intensiteettimittaus oli osoittautunut riittämättömäksi yhden vähämeluisen luukun säteilemän äänitehotason luotettavassa määrittämisessä.

Lopullisiin mittauksiin valittiin neljä erilaista prototyypirakennetta; 2 mm teräslevy, 3 mm paksu sandwich rakenne (2 mm teräslevy + moottorin käyttölämpötilaan optimoitu vaimennusmateriaali + 1 mm teräslevy), kaupallinen MPM-levy (optimi käyttölämpötila 20 °C) ja lähikoteloitu 2 mm teräsluukku. Kahdella ensin mainitulla ratkaisulla määritettiin moottorin A-puolen äänitehotaso, jota verrattiin vakioluukuilla mitattuun. A-painotetun äänitehotason muutokset olivat 2 mm paksuilla teräsluukuilla -5.7 dB ja sandwich luukuilla -6.3 dB.

Kaikkia rakenteita vertailtiin kahden vierekkäisen luukun intensiteettimittausten tulosten perusteella. Erot ratkaisujen välillä jäivät pieniksi hyötyvaikutuksen ollessa eräällä mittauspinnalla -6.2 dB (2 mm Fe), -6.6 dB (sandwich), -6.4 dB (MPM) ja -8.4 dB (lähikoteloitu).

Yksittäisten protoluukkujen vertailussa käytettiin luukun värähtelynopeusjakauman mittaukseen pyyhkäisevää lasermittausta, jonka tuloksia hyödyntäen luukun säteilemä äänitehotaso arvioitiin BEM-laskennan avulla [3]. Tällä menetelmällä saatiin luotettavampia tuloksia kuin intensiteettimittauksilla. Vakiokampikammion luukkuun vertailtuna protorakenteiden säteilemän A-painotetun äänitehotason muutokset olivat 2 mm teräsluukulla -16.2 dB, sandwich luukulla -25.9 dB, MPM luukulla -20.4 dB ja lähikoteloidulla 2 mm teräsluukulla -26.1 dB.

#### 4 SIMULOINTI

Vibroakustisella simuloinnilla tähdätään vähämeluisen tuotteen kehittämiseen. Monimutkaisissa konerakenteissa melun syntyyn liittyvien ilmiöiden vaikutusten selvittäminen saattaa olla hankalaa, ellei jopa mahdotonta pelkästään mittauksin toteutettuna. Mallinnukseen liitty-

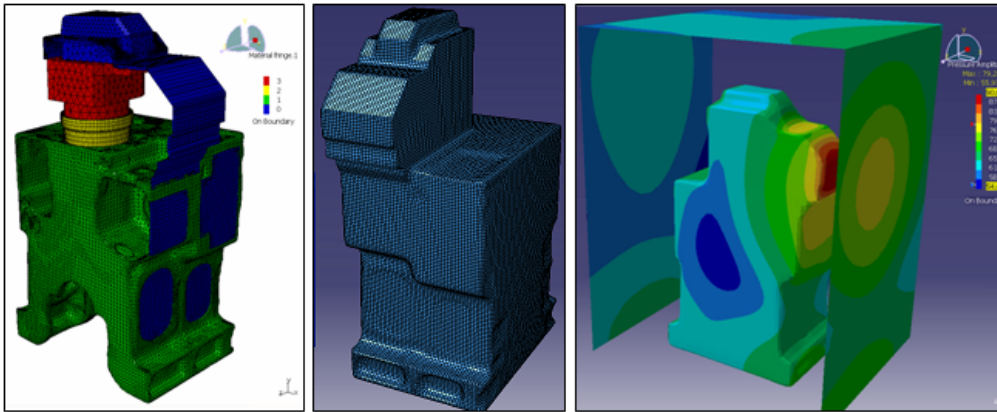
viä haasteita ovat tyypillisesti herätteet, mallinnusmenetelmien valinta ja rakenteen mallin järkevä yksinkertaistaminen.

Elementtimenetelmä (FEM) on eniten käytetty laskentamenetelmä rakenteiden ja järjestelmien dynaamisten ominaisuuksien määrittämisessä. Tyypillisesti eri rakennevaihtoehtojen paremmuus selviää vertailemalla niistä laskettuja tuloksia keskenään. Tulosten ei välttämättä tarvitse olla absoluuttisen tarkkoja, vaan suhteellisen eron kertovia. Suhteellisten erojen täytyy korreloida mittaustuloksiin. Tämän tyyppinen lähestymistapa tarkoittaa käytännössä esimerkiksi materiaalien vertailua, dimensioiden muutosten vaikutusten tutkimista jne. Herätteenä voidaan yksinkertaisissa simuloinneissa käyttää vakiovoimaa koko taajuuskaistalla. Tuloksena saadaan rakenteen dynaaminen vaste jokaisella laskijaa kiinnostavalla taajuudella. Tämän jälkeen voidaan verrata värähtelytasoja tai reunaelementtimenetelmällä (BEM) laskettuja äänitehotasoja eri rakennevariaatioiden kesken. Edellä kuvattu lähestymistapa soveltuu hyvin kohtuullisen yksinkertaisten rakenteiden ja osarakenteiden tutkimiseen.

Tehokas keino suunnitella vähämeluinen tuote on minimoida herätteet ja optimoida niiden siirtotiet. Tämä vaihe onkin laskennan kannalta huomattavasti haasteellisempi koska osa herätteistä määritetään laskemalla (esim. laakerivoimat). Pyörivien koneenosien aiheuttamien herätteiden laskenta vietyä tasolle, jolla koneen osien pyörintä on laskennassa mukana tai jolla laakereiden vaikutus saadaan realistisesti mallinnettua, ei onnistu kovin helposti perinteisellä FEM-ohjelmistolla. Heräteanalyysijä varten on olemassa erikoisohjelmistoja, joissa FEM yhdistettynä monikappalejärjestelmien dynamiikan (MBD=multibody dynamics) kanssa mahdollistaa hyvinkin tarkkojen laskelmien tekemisen. Autoteollisuudessa vastaavia analyysejä on esimerkiksi moottoreille tehty jo pitkään. Lähestymistavassa saadaan laskettua herätevoimien suuruudet, niiden kontribuutiot kokonaisuuteen sekä paljon muita tuotekehityksessä tarvittavia tuloksia, jopa laakerin voitelukalvon paksuus. Tuotetta opitaan ymmärtämään syvällisemmin, jolloin muutosten tekemiselle on paremmat perusteet.

Reunaelementtimenetelmän käyttö on seuraava vaihe kun rakenteen dynaamiset vasteet on laskettu. BE-malli perustuu hyvin pitkälti FE-mallin elementtiverkkoon ja sen pintasolmujen vastedataan. BEM:llä saatavat tulokset riippuvat siis paljolti siitä, miten hyvin dynaaminen malli vastaa todellisuutta. Tässä vaiheessa laskijalta vaaditaan ymmärrystä sekä elementtimenetelmistä, dynamiikasta että akustiikasta. Reunaelementtimenetelmä vaatii enemmän tietokonekapasiteettia kuin rakenteiden mekaniikan laskelmat, vaikka malli sisältääkin vain reunapintojen elementtiverkon. Tämä johtuu siitä, että laskettavat matriisit ovat täysiä, eivätkä diagonaalisia kuten FEM:ssä. Ohjelmien ja tietokoneiden kehittymisen myötä akustinen BEM-laskenta ja sen hyödyntäminen on alkanut yleistyä maailmalla. Rinnakkaisten tietokoneiden käytön ja lisääntyneen muistin ansiosta mallien laskenta-ajat ovat pudonneet huomattavasti ja trendi tulee jatkumaan myös tulevaisuudessa.

Dynaamisten ja akustisten analyysien mallin koko määräytyy yleisesti käytettävän ”nyrkki-säännön” mukaan, vähintään kuusi elementtiä suurimman laskentataajuuden aallonpituutta kohti. Käytännössä tämä vaatimus johtaa dimensioiltaan isojen moottorien kohdalla laskentamalliin, jossa on paljon vapausasteita. Wärtsilän moottori W6L32 on dimensioiltaan luokkaa  $4.45 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \approx 42 \text{ m}^3$ . Näillä dimensioilla ja laskennan ylärajataajuudella 930 Hz, saadaan noin 11500 vapausasteen BE-malli. Tavallisella PC:llä (2 Gb RAM) yhden taajuuden tulosten laskenta kestää noin vuorokauden. Vastaavasti 64 bit tietokoneella (12 Gb RAM) laskenta-aika on vain 15 minuuttia. Rinnakkaisten tietokoneiden käyttö pienentää laskenta-aikaa vielä huomattavasti. Kuvassa 1 on havainnollistettu koneakustiikan simuloinnin eri vaihteita: 1) Dynaaminen FE-analyysi taajuus- tai aikatasossa. MBD-analyysi aikatasossa. 2) BE-verkon luonti FE-verkon pohjalta. 3) Akustinen BE-analyysi taajuustasossa.



Kuva 1- Numeerisen laskennan vaiheita koneakustiikan simuloinneissa.

## 5 HERÄTTEET

Nelitahtisen dieselmoottorin mekaanisia herätteitä on tutkittu paljon mm. värähtelyiden ja lujuusopin osalta. Tällöin taajuusalue on tyypillisesti 1-200 Hz. Melun kannalta mielenkiintoisen taajuusalue alkaa muutamasta sadasta Hz:stä, pakomelussa muutamasta kymmenestä Hz:stä jatkuen aina 2-4 kHz:iin asti turbon lapataajuuden ollessa joskus vielä suuremmilla taajuuksilla. Meluntorjuntaan ei ole ollut kiinnostusta, siitäkin huolimatta, että luokituslaitokset ovat määritelleet melurajat esim. konehuoneissa. Nyt tilanne on muuttumassa, minkä johdosta konevalmistajat ovat pakotettuja kiinnittämään huomioita myös tähän asiaan.

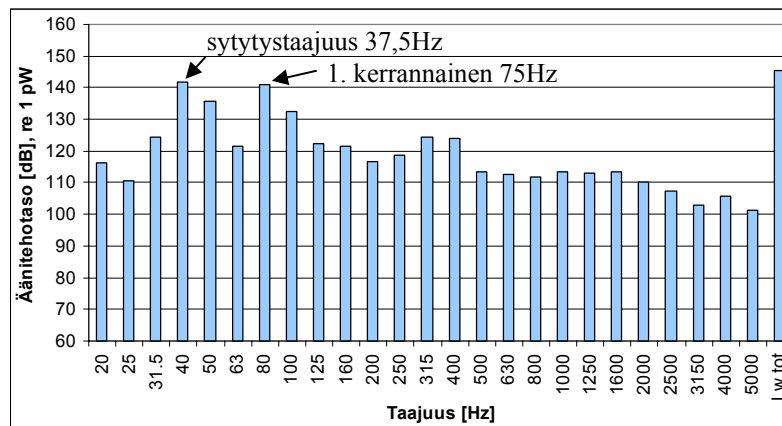
Nelitahtisen dieselmoottorin osalta tiedämme, että itse palotapahtuma aiheuttaa melua monella tavalla. Pakokaasupulssit ovat yksi merkittävä ympäristömelulähde, siitäkin huolimatta, että turbo vaimentaa niitä merkittävästi. Itse sylinteripaine, maksimissaan 200 bar aiheuttaa niin ilma- kuin runkoääntä. Paineheräte synnyttää suoraan värähtelyä palotilan pintoihin, lisäksi se tavallaan aiheuttaa männän sivuiskut sekä tukivoimina herättää kampiakselin laakereiden kautta lohkon värähtelemään. Venttiilimekanismi välyksineen aiheuttaa iskumaisia herätteitä. Nokka-akselilla oleva hammaspyörästö aiheuttaa ääneksiä ja laajakaistaista melua. Hammaspyörästön melua lisääviä herätteitä tulee mm. ruiskutuspumpuista vaihtelevien momentti-kuormien muodossa. Kaasumoottoareiden osalta tiedetään, että ne ovat 3-4 dB dieselmoottoareita hiljaisempia. Itse palotapahtuma on tasaisempi, mikä osaltaan selittää alhaisemmat melutasot. Tämän lisäksi kaasumoottorissa ei ole ruiskutuspumppuja, jolloin hammaspyörästöön kohdistuu selvästi pienempi heräte. Muuten kaasu ja dieselmoottorit ovat identtiset.

## 6 MOOTTORIN PAKOMELU

Hyvin suurten polttomoottorien, 500 kW-20MW, pakomelu on merkittävä ympäristömelutekijä sekä laiva- että voimalaitossovelluksissa. Melu ei ole ainoastaan viihtyvyyden kannalta tärkeä tekijä, vaan viime vuosien aikana suoranaiset ympäristömeluvaatimukset ovat kiristyneet sekä teollisuus- että satama-alueilla. Tämä asettaa suuria haasteita erityisesti pientaajuuisen pakomelun vaimennukselle. Vaimentimien fyysinen koko ja rakenteen kompleksisuus kasvavat suhteessa vaimennusvaatimuksiin.

Keskinopeiden nelitahtipolttomoottorien pakomelu on taajuusjakaumaltaan painottunut pienille taajuuksille (kts. kuva 2). Suurin heräte on yleensä moottorin sytytystaajuus ja sen alimmat kerrannaiset. Sytytystaajuus riippuu sekä moottorin pyörimisnopeudesta että sylinterien lukumäärästä ja asetelmasta. Wärtsilän nelitahtimoottoreissa pakomelun sytytystaajuus on

moottorista riippuen 16 - 85 Hz ja äänitehotaso sytytystaajuudella 130 - 160 dB. Vaimentamattoman pakomelun A-painotettu kokonaisäänitehotaso vaihtelee 120 dB ja 140 dB välillä.



Kuva 2 – Tyypillinen nelitahti dieselmoottorin pakomelun taajuusjakauma. Kyseisen moottorin sytytystaajuus on 37,5 Hz.

Melun pientaajuisuus ja tonaalisuus tuo mukanaan huomattavia haasteita. Pelkästään A-painotettuja tasoja tarkastelemalla vaimennusta suunniteltaessa, saattaa pienten taajuuksien vaimennus jäädä liian vähäiseksi. Tämä on ongelmallista erityisesti asutusalueilla, sillä tonaalinen pientaajuinen melu koetaan hyvin häiritseviksi myös pienillä voimakkuuksilla.

Pakomelun estimointi moottorin suunnitteluparametrien perusteella on toistaiseksi hyvin karkealla tasolla, tarkin tieto äänilähteestä saadaan mittaamalla. Moottorin ja putkistojen fyysinen koko sekä kaasuvirtauksen lämpötila asettavat rajoituksia mittausten suorittamiselle perinteisin menetelmin. ABB [4] on kehittänyt menetelmän, joka mahdollistaa äänipainemittaukset pakoputken sisältä normaalissa käyttötilanteessa. Menetelmää on jatkokehitetty, testattu ja parannettu Wärtsilän ja ABB:n yhteistoimin [5,6,7,8]. Kattavat käyttökokemukset laboratorio- ja kenttämittauksista ovat osoittaneet menetelmän luotettavaksi pakomelun äänitehon määrittäytäväksi [10].

## 7 TILANNE SUOMESSA JA YHTEENVETO

Projekti on osoittanut, että Suomessa koneakustiikan koulutus ja osaaminen on melkoisen vähäistä. Muutamalla yliopistolla on meluntorjuntaan liittyvä peruskurssi. TKK kouluttaa akustikkoja, jotka perinteisesti suuntautuvat muualle kuin koneakustiikkaan. AEL järjestää joka toinen vuosi ”Koneakustiikan ja teollisuusmelun perusteet” kurssin, jolle osallistuu 15–20 kuulijaa. Rahoitusmielessä merkittävin viimeaikojen panostus oli Tekesin VÄRE teknologiaohjelma, joka olisi voinut motivoida suomalaista teollisuutta ja oppilaitoksia aktivoitumaan pysyvästi koneakustiikan alueella.

Koneakustiikan osaajia Suomessa löytyy VTT:ltä ja muutamia henkilöitä isohkoista yrityksistä. Meluntorjunnan ja ympäristöakustiikan osaajia on työterveyslaitoksella ja muutamissa insinööritoimistoissa.

Wärtsilässä melu on nostettu korkealle prioriteetille. Tällä hetkellä Wärtsilässä on kaksi kokopäiväistä koneakustikkoja ja kaksi henkilöä, jotka tekevät meluun liittyvää työtä osapäiväisesti. Siis melkoista panostusta. Tämän lisäksi viimeisin koneakustiikan diplomityön tekijä tulee Ruotsista, KTH:lta, jo kolmas peräkkäinen [10]. Suurimpana syynä tähän on ennen kaikkea suomalaisten opiskelijoiden alan koulutuksen puute. Voi olla, että KTH:lla yhdellä

vuosikursseilla on enemmän koneakustiikan opiskelijoita, kuin Suomessa on koneakustikkoja yhteensä! Jos verrataan värähtelytekniikkaan, niin asiantuntijoita löytyy korkeakouluista, yrityksistä ja VTT:ltä huomattavasti enemmän. Myös koulutuksen taso ja laajuus on merkittävästi parempi, osaamista on kehitetty ainakin 1980 luvun alusta alkaen.

Tavallisella tuotekehitysinsinöörillä voi olla vaikeuksia vastata kysymykseen mitä eroa on äänenpainetasolla ja äänitehotasolla. Wärtsilässä on ruvettu suunnittelemaan ja pitämään omia peruskoulutuspaketteja meluun liittyvistä aiheista. Näyttää siltä, että tämä materiaali joudutaan aina räätälöimään, koska hyviä ja yksinkertaisia meluoppaita ei ole saatavilla. Vuonna 2008 ilmestyy ”Koneakustiikan käsikirja”, joka toivottavasti osaltaan edistää alan kehittymistä Suomessa. Kirjan tekemiseen on osallistunut VTT:n johdolla runsaat parikymmentä henkilöä ja kirjan kustantaa Teknologiainfo Teknova Oy.

Wärtsilän meluprojekti etenee. Tulevaisuuden visiot liittyvät virtuaalisen mallinnuksen ja vibroakustisten mittausten hyödyntämiseen hiljaisempien moottorien tuotekehityksessä. Työ on vielä alussa, mutta tavoitteena on lähivuosina integroida vähämeluisen tuotteen suunnittelurutiinit osaksi tuotekehitystä.

## LÄHTEET

1. RAJALA A., SAARINEN K., LAMULA L, KUIVAMÄKI M., SAINÉ K., W32-tyyppisen dieselmoottorin luukkujen meluntorjunta, Akustiikkapäivät 2005, Kuopio
2. SAARINEN K., LAMULA L, KUIVAMÄKI M., Voimaherätteen tasolaatan äänensäätely, Akustiikkapäivät 2005, Kuopio
3. AURA M., LAMULA L., SAARINEN K. & SAINÉ K. Ranking of partial noise sources and noise control measures. ICSV14, Cairns, Australia, 2007.
4. LARSSON Gustav, M.Sc thesis: Reducing engine noise with an enclosure using Micro Perforated Plates. KTH Stockholm 2006.
5. AURA M., M.Ss thesis: Combustion Engine Exhaust Noise. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Vaasa 2006.
6. JOHANSSON C. G., SAINÉ K., JOHANSSON P., ÅBOM M., Exhaust noise – a new novel in-situ measurement technology in duct, ICSV 12, Lisbon, Portugal, 2005
7. AURA M, JOHANSSON C. G., SAINÉ K., JOHANSSON P., Experience of the in-duct exhaust noise measurement system. Internoise 2006, Hawaii, USA, 2006
8. JOHANSSON C. G., VIITALA T., SAINÉ K., JOHANSSON P., Silencer measurements in the manufactory hall, Akustiikkapäivät 2005, Kuopio
9. SAINÉ K., PÄÄKKÖNEN R., LAHTI T., Low frequency noise-a need for guidelines? Internoise 2006, Hawaii, USA, 2006
10. ANDERSSON Philip, M.Sc thesis: Reducing gear pump noise: Theory and practise. KTH Stockholm 2007.