

Atte Santalahti

# PAKOKAASUPESURIEN EROT SULJETUN KIERRON JA AVOIMEN KIERRON VÄLILLÄ

Opinnäytetyö  
Merenkulun koulutus (AMK)

2017



**Ammattikorkeakoulu**



# Ammattikorkeakoulu

<b>Tekijä/Tekijät</b> Atte Santalahti	<b>Tutkinto</b> Merenkulkualan insinööri (AMK)	<b>Aika</b> Toukokuu 2017
<b>Opinnäytetyön nimi</b>  Pakokaasupesurien erot suljetun kierron ja avoimen kierron välillä		37 sivua 0 liitesivua
<b>Toimeksiantaja</b>  Langh Ship Oy		
<b>Ohjaaja</b>  Ari Helle		
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Opinnäytetyön aiheena on avoimen ja suljetun kierron pakokaasupesureiden vertailu. Tavoitteena on tehdä kattava ja selkeä selvitys erilaisten rikkipesureiden eroista ja toiminnasta. Jotta vertailu olisi mahdollisimman selkeää, laitteiden toimintaperiaatteet ja rakenteet käydään seikkaperäisesti läpi. Myös pesureiden yleistymiseen vaikuttaneet IMO:n ja EU:n päätökset käsitellään.</p> <p>Lähdemateriaalina on käytetty rikkipesureiden manuaaleja, merenkulkualan julkaisuja, asiantuntijahaastatteluja sekä verkkolähteitä. Myös kirjoittajan työn ohessa hankittua tietotaitoa on hyödynnetty.</p> <p>Työssä käsitellään myös rikkipesureiden vaatimia materiaaleja, dieselmoottorin palotapahtuman ja rikkipesurin pesutapahtuman kemiallisia reaktioita, rikkipesureille asetettuja ympäristövaatimuksia, rikkipesurin jälkiasennusta ja sen kustannuksia, rikkipesurin laitteistojen käyttöä ja huoltoa operaattorin näkökulmasta, ympäristövaikutuksia sekä päästöjen valvontaa.</p>		
<b>Asiasanat</b>  Rikkipesuri, rikinoksidit, pakokaasupesuri, pakokaasupesuri, asennus, käyttö, huolto		

<b>Author (authors)</b>	<b>Degree</b>	<b>Time</b>
Atte Santalahti	Bachelor of Marine Engineering	May 2017
<b>Thesis Title</b>		
Comparisons on open and closed loop exhaust gas scrubbers on ships		37 pages 0 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>		
Langh Ship Oy		
<b>Supervisor</b>		
Ari Helle		
<b>Abstract</b>		
<p>The subject of this thesis is the comparison of closed and open loop exhaust gas treatment systems, also known as scrubbers. The objective is to achieve an exhaustive and clear report of the differences of different scrubber systems and of their operation. To help make the comparisons evident, the working principles and structural differences of different types of scrubber systems are discussed in detail. Relevant IMO decisions and classification rules are included.</p>		
<p>Sources for the thesis include scrubber manuals, maritime publications, specialist interviews and internet sources. The writer is working as a scrubber operator and repairman and has acquired first hand knowledge on the subject.</p>		
<p>The thesis also discusses the material requirements of scrubbers, the diesel engine combustion in regards of the formation and consistency of exhaust gases, the chemical reactions taking place in the scrubber, environmental demands on exhaust gas scrubbing systems, retrofitting of scrubber systems and the required financial investments, the operation and maintenance of scrubber systems from viewpoint of the operator, the environmental effects of scrubber systems and emission control.</p>		
.		
<b>Keywords</b>		
Scrubber, Sulphur oxides, removal		

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	4
1.1	Lyhenteet .....	5
2	PAKOKAASUPESURIEN YLEISTYMISEN SYYT .....	6
3	KEMIAA .....	8
4	PESUREIDEN TOIMINTAPERIAATTEET JA RAKENNE.....	11
4.1	Avoimen kierron pakokaasupesuri.....	11
4.2	Suljetun kierron pakokaasupesuri.....	14
4.2.1	Pesuveden käsittely.....	15
4.3	Hybridipakokaasupesuri.....	20
4.4	Pakokaasuanalysointilaitteet .....	21
4.5	Anturit.....	22
5	MEREEN PUMPATTAVIEN VESIEN VAATIMUKSET .....	23
6	MATERIAALEISTA .....	25
7	ASENNUS.....	25
8	LUOKITUKSET .....	29
9	KÄYTTÖ JA HUOLTO .....	29
10	YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET .....	32
11	PÄÄSTÖJEN VALVONTA.....	33
12	YHTEENVETO.....	34

## 1 JOHDANTO

Työn aihe sai alkunsa, kun kirjoittaja aloitti työt pakokaasupesureiden parissa Langh Shipillä. Langh Ship päätti itse kehittää aluksilleen pakokaasupesurit, koska ne liikennöivät SECA-alueilla, joilla tuli voimaan uudet ilmansuojelumääräykset sekä EU:n rikkidirektiivi vuoden 2015 alussa.

Alkuun työtehtäviin kuului pelkästään yhtiön rikkipesurin prototyypin käyttö M/S Lauralla. Rikkipesuri on laivan muihin laitteisiin verrattuna varsin tuore keksintö, vaikkakin niitä on ollut käytössä maapuolen voimalaitoksissa jo pitkään. Tästä syystä se oli oiva aihe opinnäytetyölle.

Juuri uutuutensa vuoksi työn tarkasteltavaksi valikoituivat pakokaasupesurin kaksi perustyyppiä, avoimen ja suljetun kierron pesurit. Näiden yhdistelmää, eli hybridipakokaasupesuria, sivutaan myös. Kirjoittajan saatavilla oli ylivoimaisesti eniten tietoa Langh Technin pakokaasupesureista, joten työssä nojataan pääasiassa niihin. Työ on kirjoitettu suurimmaksi osaksi M/S Ailalla työpäivien jälkeen, joten monet apulaitteiden, kuten antureiden, manuaalit olivat helposti käsillä.

Työssä keskitytään ainoastaan rikkipesureihin, joten termillä scrubberi ja pakokaasupesuri viitataan laitteistoon, jonka pääasiallisena tarkoituksena on vähentää rikin oksidien määrää laivan pakokaasuissa. Niin kutsutut kuivapesurit on jätetty pois työstä, koska ne ovat varsin harvinaisia.

## 1.1 Lyhenteet

FNU = Formazin nephelometric unit eli sakeuden yksikkö

GPS = Global position system

IMO = International Maritime Organisation eli Kansainvälinen merenkulkujärjestö

MCR = Maximum Continuous Rating eli maksimiteho, jolla pääkonetta voidaan käyttää jatkuvasti

MDO = Marine Diesel Oil, raskaampaa kuin MGO, myös halvempi

MGO = Marine Gas Oil, ns kevyt polttoöljy, tisleistä valmistettu diesel

NaOH, natriumhydroksidi = lipeä, tässä opinnäytetyössä 50 %:nen liuos

PAH = Polyaromaattinen hiilivety

pH = vetyionipitoisuuden negatiivinen logaritmi ja liuoksen happamuuden tai emäksisyyden mittayksikkö

PPM = Parts Per Million eli miljoonasosa

Scrubber = Pakokaasupesuri

SECA-alue = Sulphur Emission Control Area eli alue, jolla laivaliikenteen rikkipäästöjä on rajoitettu

TBN = Total Base Number eli voiteluöljyn kyky neutraloida happamia yhdisteitä

WFD = Water Framework Directive eli Euroopan Unionin vesipolitiikan puitteiden direktiivi

## 2 PAKOKAASUPESURIEN YLEISTYMISEN SYYT

Pakokaasupesurit ovat yleistyneet viime aikoina, koska kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on päätöslauselmassaan rajoittanut laivojen pakokaasujen rikkipäästöjä erikoisalueilla (SECA, Sulphur emission control areas). Näihin alueisiin lukeutuvat muun muassa Itämeri, Pohjanmeri, Yhdysvaltojen Itä- ja länsirannikko sekä Hawaji (IMO 2009, 2).

Myös Euroopan Unioni on antanut käytännössä samat määräykset rikkidirektiivin muodossa. Rajoituksilla halutaan pienentää laivaliikenteen aiheuttamaa ympäristön räsitusta. (Directive 2012/33/EU). Vuoden 2015 alusta SECA-alueilla liikennöivien alusten on käytettävä polttoainetta joka sisältää rikkiä enintään 0,1 %.

Toisena vaihtoehtona on pakokaasupesurin asentaminen mikä mahdollistaa korkeampi-rikkisen polttoaineen (esim. 3,5 %) käytön. Matalarikkinen polttoaine on tuntuvasti kalliimpaa, ja jos alus liikennöi myös SECA-alueiden ulkopuolella, on poltettavista polttoaineista pidettävä kirjaa viranomaisia varten.

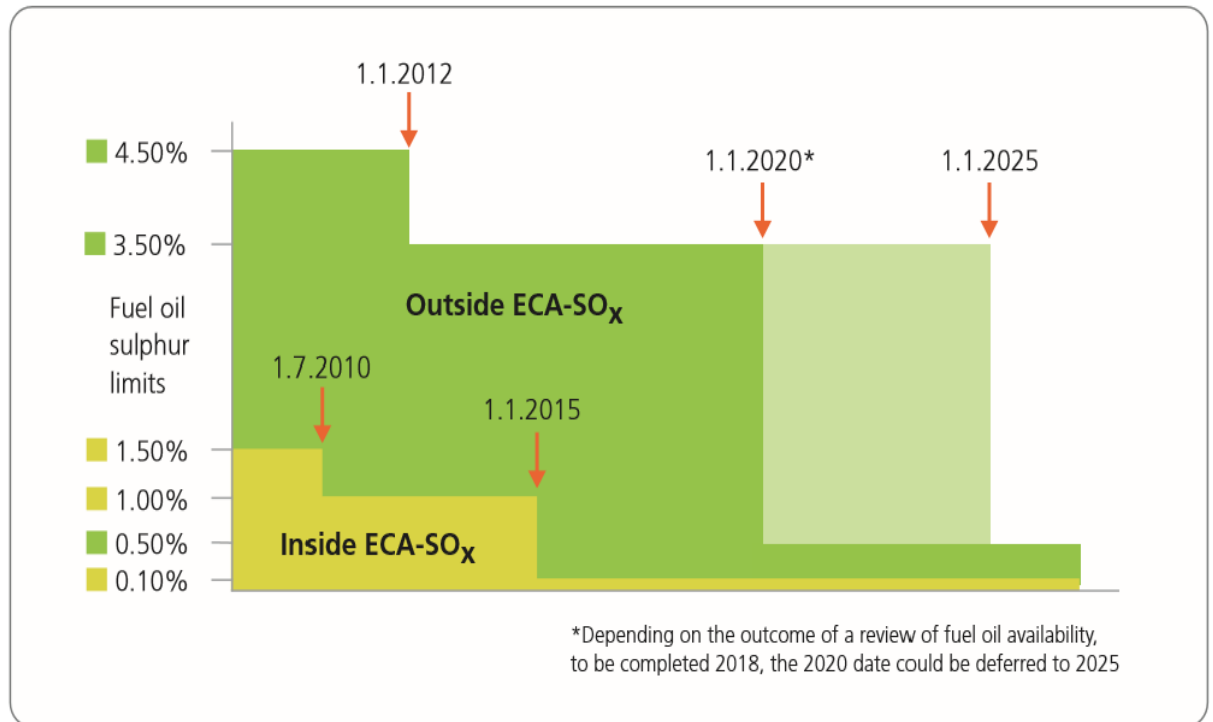
Monet varustamot ovat siirtyneet käyttämään vähempirikkisiä polttoaineita, koska polttoaineen hinta on ollut alhainen ja alkuinvestointi pienempi kuin rikkipesurin asentaminen. Käytettäessä laivakoneita MDO:lla tai MGO:lla on polttoainejärjestelmään kuitenkin asennettava jäähditys.

Kannustimena rikkipesurin asentamiselle on selkeästi pienemmät polttoainekustannukset. Joten voidaan olettaa, että polttoaineen hinnan noustessa rikkipesurin asentaminen tulee huomattavasti halvemmaksi. Esimerkiksi huhtikuussa 2017 korkearikkisen IFO380-raskaspolttoöljyn keskihinta oli 325 \$ per tonni. Dieselin hinta taas on 515 \$ per tonni ja 0,1 % rikkiä sisältävä raskaspolttoöljy 510 \$ per tonni. (Bunkerworld prices 2017). Vuodesta 2020 alkaen polttoaineen rikkipitoisuuden sallittu yläraja on 0,5 % myös SECA-alueiden ulkopuolella (Lloyds Register 2016, 7).

Taulukko 1. Taulukko polttoaineen rikki- ja hiilipitoisuuden ja päästöjen suhteesta.  
(Euroopan komissio 2012, 12)

Polttoaineen rikkipitoisuus (% m/m)	Päästöjen suhdeluku SO <sub>2</sub> (ppm)/CO <sub>2</sub> (% v/v)
4,50	195,0
3,50	151,7
1,50	65,0
1,00	43,3
0,50	21,7
0,10	4,3

Taulukossa polttoaineen rikkipitoisuus on ilmoitettu prosentteina polttoaineen massasta. Päästöjen suhdeluvulla tarkoitetaan rikkidioksidimäärän (ppm) ja hiilidioksidimäärän (% tilavuudesta) suhdetta. Hiilidioksidin määrä on suorassa suhteessa poltetun polttoaineen määrään. Taulukon päästöjen suhdeluvut ovat ennen pesuria, ja suhdeluku 4,3 on käytännössä SECA -alueilla operoivien laivojen päästörajoitus pakokaasupesurin jälkeen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää 0,10 % rikkiä sisältävää polttoainetta, eli dieseliä, maakaasua tai matalarikkistä raskasta polttoöljyä.



Kuva 1. Polttoaineen rikkipitoisuuden rajoitusten voimaantulo (Lloyds Register 2016 7).

### 3 KEMIAA

Laivakoneiden pakokaasut koostuvat suurimmaksi osaksi typestä, hapestä, hiilidioksidista ja vesihöyrystä. Myös pieniä määriä hiilimonoksidia, rikin ja typen oksideja sekä palamattomia hiilivetyjä ja pienhiukkasia sisältyy pakokaasuihin. (Woodyard 2009 61.)

Typen oksidit muodostuvat typen ja hapen palamistapahtumassa, koneen sylintereissä, korkeassa lämpötilassa. Ne aiheuttavat savusumun muodostumista kaupunkien ylle sekä haposateita. Typen oksidien epäillään myös olevan karsinogeenisia. (Woodyard 2009 61.)

Rikin oksidit (Sox) muodostuvat polttoaineen sisältämän rikin hapettuessa. Rikin oksidit tuoksuvat epämiellyttävälle, ärsyttävät limakalvoja ja aiheuttavat haposateita. Ilmakehän rikkioksidipäästöt vähentävät makeanveden vesistöjen emäksisyyttä. (Woodyard 2009 61.)

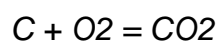


Typen oksideja voidaan vähentää palamistapahtuman tekijöitä muuttamalla. Rikin oksidien määrä on aina suorassa suhteessa poltetun polttoaineen rikkipitoisuuteen eikä sitä voida vähentää palamistapahtumaa muuttamalla. Esimerkiksi jos polttoaine sisältää 3 % rikkiä, palamisessa syntyvien rikin oksidien määrä on noin 64 kg poltettua polttoainetonna kohden. Jos polttoaine sisältää 1 % rikkiä, rikkioksideiden päästöt ovat 21 kg poltettua polttoainetonna kohden. (Woodyard 2009 64.)

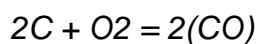
Taulukko 2. Alkuaineita ja yhdisteitä nestemäisessä polttoaineessa ja jälkituotteita palamisesta (Woodyard 2009 101).

		Kemiallinen merkki	Atomimassa		Moolimassa
Hiili	Alkuaine	C	12.00	C	12.00
Vety	Alkuaine	H	1.008	H <sub>2</sub>	2.016
Happi	Alkuaine	O	16.00	O <sub>2</sub>	32.00
Typpi	Alkuaine	N	14.01	N <sub>2</sub>	28.02
Rikki	Alkuaine	S	32.07	S <sub>2</sub>	64.14
Hiilimonoksidi	Yhdiste	-	-	CO	28.00
Hiilidioksidi	Yhdiste	-	-	CO <sub>2</sub>	44.00
Rikkidioksidi	Yhdiste	-	-	SO <sub>2</sub>	64.04
Rikkitrioksidi	Yhdiste	-	-	SO <sub>3</sub>	80.07
Rikkihapoke	Yhdiste	-	-	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	82.086
Rikkihappo	Yhdiste	-	-	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.086
Vesi	Yhdiste	-	-	H <sub>2</sub> O	18.016

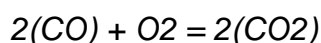
*Polttoaineen palamistapahtuman reaktioyhtälöitä:*



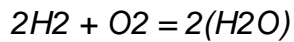
Hiili palaa hiilidioksidiksi



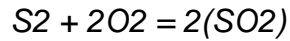
Hiili palaa hiilimonoksidiksi



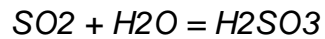
Hiilimonoksidi palaa hiilidioksidiksi



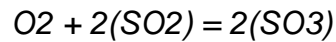
Vety hapettuu höyryksi



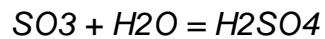
Rikki palaa rikkidioksidiksi



Rikkidioksidi palaa rikkihapokkeeksi



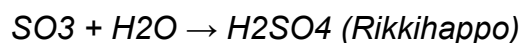
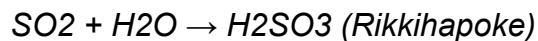
Rikkidioksidi palaa rikkitrioksidiksi



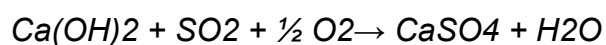
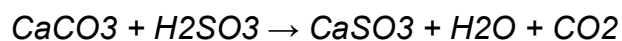
Rikkitrioksidi ja vesi muodostavat Rikkihappoa

(Woodyard 2009 102.)

Avoimen kierron pesurissa meriveden reagoidessa pakokaasun rikkioksidien kanssa muodostuu:



Suljetun kierron pesurin reaktiot:



(Plötzke 2014, 8.)

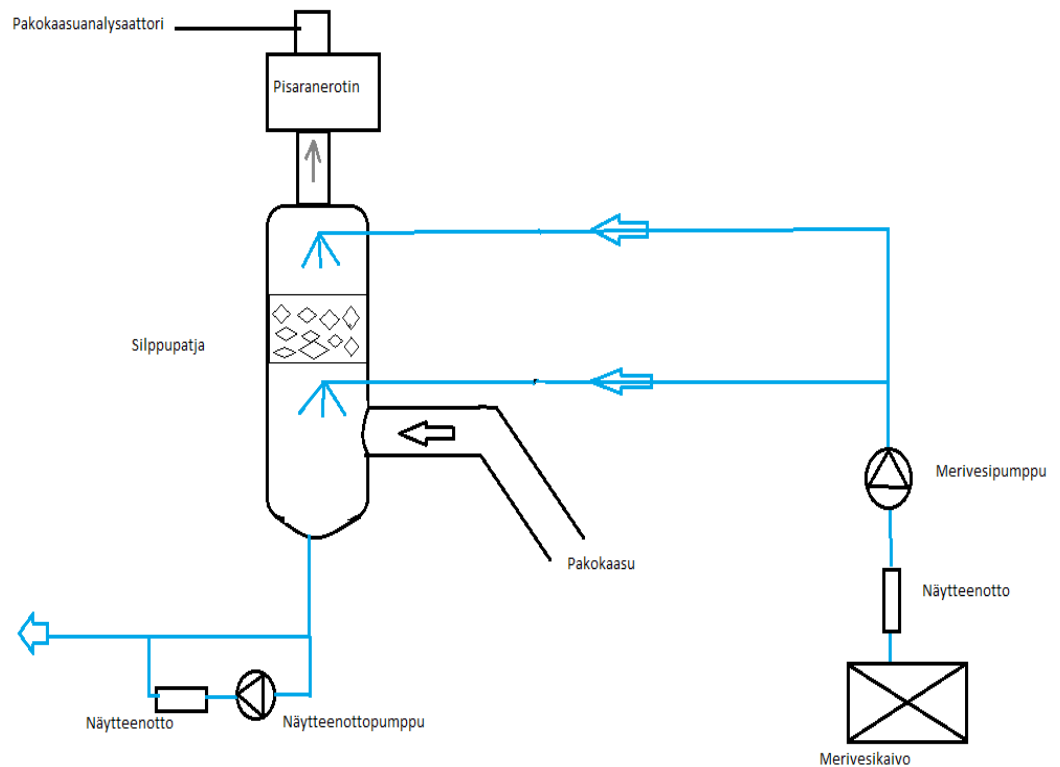
Kuten yllä olevista kaavioista käy ilmi, muodostuu lipeän ja rikin reagoidessa muodostuu paljon suoloja. Suljetun kierron pesuveden lämpötilan tulisi pysyä

riittävän lämpimänä, etteivät suolat kiteydy ja aiheuta tukoksia systeemiin. Ensimmäisenä tukkeutuvat suljetun kierron jäähdyttämiseen tarkoitetut lämmönvaihtimet. (Verosaari 2016.)

#### 4 PESUREIDEN TOIMINTAPERIAATTEET JA RAKENNE

Tässä kappaleessa käsitellään pakokaasupesureiden toimintaperiaatteita sekä rakennetta

##### 4.1 Avoimen kierron pakokaasupesuri



Kuva 2. Avoimen kierron rikkipesurin rakenne (Langh Tech 2015).

Avoimen kierron pakokaasupesurin rakenne on varsin yksinkertainen. Pesuri on sijoitettu korsteeniin aluksen pääkoneen yläpuolelle siten, että pakokaasu pääsee kulkemaan sen läpi. Jos kyseessä on jälkiasennus, tulee pesuri yleensä äänenvaimentimen tilalle. Pesuri itsessään on tynnyrimäinen pesutorni. Sen yläosassa on suuttimia, joista pesuvesi ruiskutetaan sisään. Avoimen kierron järjestelmissä pesuvesi on merivettä, ja pesutornista poistuva

käytetty pesuvesi palaa mereen. Avoimen kierron pakokaasupesurin toiminta perustuu meriveden kykyyn puhdistaa rikin oksideja pakokaasusta. Pakokaasun sisältämät rikin oksidit reagoivat veden kanssa muodostaen rikkihappoa, jonka jälkeen meriveden luonnollinen alkalisuus neutraloi hapon (Wärtsilä 2016). Merivesi pumpataan pesutorniin pumpulla, jota automatiikka ohjaa taajuusmuuttajalla pääkoneen kuorman mukaan. Pesuvesi johdetaan pesutornin pohjalta putkea pitkin mereen. Virtausmäärät ovat verrattain suuria, esimerkiksi 8 MW:n koneella virtausmäärä on noin 450 m<sup>3</sup>/h. Pesuvesi toimii samalla myös pesurin jäähdyttäjänä. Imu voidaan ottaa aluksen merivesikaivosta ja linjaan on asennettava suodatin samaan tapaan kuin alusten merivesijäähdytysjärjestelmissä. Sisään tulevasta merivedestä mitataan pH, sameus (yksikkö esimerkiksi Formazin Nephelometric Unit, FNU) ja polyaromaattiset hiilivedyt (PAH -yhdisteet). Myös pesurista mereen poistuvasta vedestä mitataan samat arvot. Merivesiputkisto pesutorniin asti voidaan rakentaa esimerkiksi CuNiFerista tai komposiittimateriaaleista.

Pakokaasu tulee sisään pesutornin alaosasta, jossa alemmista suuttimista pumpattu merivesi jäähdyttää sitä ja rikin oksidien neutralisointi alkaa. Jäähdytynyt pakokaasu virtaa haponkestävästä teräksestä valmistetusta silpusta koostuvan patjan läpi, jonka yläpuolella sijaitsevista suuttimista virtaava merivesi puhdistaa pakokaasua edelleen. (Langh Ship 2014, 3.) Pakokaasu puhdistuu rikin oksideista riippuen meriveden ominaisuuksista, kuten esimerkiksi suolapitoisuudesta ja lämpötilasta. Kylmä merivesi puhdistaa pakokaasua paremmin kuin lämmin (Lloyds Register 2016, 7,15).

Pesuvesi ja patja hidastavat pakokaasun virtausta ja pesuri aiheuttaa vastapainetta, joka on otettava huomioon suunnitteluvaiheessa. Laivakoneiden valmistajat antavat koneille raja-arvot pakokaasukanavan vastapaineelle, jotka tulee ottaa huomioon. Jos pesurin aiheuttama vastapaine ylittää valmistajan suositukset, voidaan pakokanavaan asentaa puhallin edesauttamaan pakokaasujen virtausta. Liian suuri vastapaine saattaa lisätä polttoaineen kulutusta, lyhentää huoltovälejä sekä heikentää tehoa. Vastapaineen mittauksella ennen ja jälkeen pesurin voidaan valvoa pisananerottimen mahdollista likaantumista (Lloyds Register 2016 7 ja 9-10.)



Kuva 3. Pesutornin ylemmät suuttimet sekä silppupatja.

Pakokaasun rikin liuetessa meriveteen sen pH laskee, eli vedestä tulee hapanta. Tämä asettaa vaatimuksia pesurijärjestelmän materiaaleille, koska yleiset laivoissa käytetyt putkimateriaalit eivät kestä happamia, jopa syövyttäviä, nesteitä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kaikki pesuvettä sisältävät putket ja tankit on valmistettava joko haponkestävästä tai smonteräksestä, riippuen lämpötilasta ja prosessivaiheesta.

Pesutornin jälkeen pakokaasu virtaa demisterin, eli pisaranerotin, läpi. Siinä pakokaasuvirran sisältämä kosteus tiivistyy ja valuu takaisin pesutorniin, ja sen tehtävä onkin lähinnä vähentää vedenkulutusta suljetun kierron käytössä.

Pisaranerotin jälkeen korsteenissa on pakokaasuanalysaattori, joka mittaa pakokaasuvirrasta SO<sub>2</sub>- ja CO<sub>2</sub>-pitoisuudet. SO<sub>2</sub>-pitoisuus mitataan miljoonasosina (parts per million, PPM) ja CO<sub>2</sub>-pitoisuus prosentteina massasta. Näistä arvoista voidaan laskea suhdeluku, jolla pystytään

tarkkailemaan pesurin, ja samalla koneen, rikkidioksidipäästöjä suhteessa poltetun polttoaineen määrään. Menetelmä ei vaadi tietoa koneen kierroksista, kuormasta eikä pakokaasuvirrasta. Koska päästörajoituksissa määritellään päästöt poltettua polttoainekiloa kohden, SO<sub>2</sub> /CO<sub>2</sub> suhdeluvun käyttäminen yksinkertaistaa järjestelmää, koska tarkkaa poltetun polttoaineen määrän mittaamista ei tarvita (IMO 2009 2).

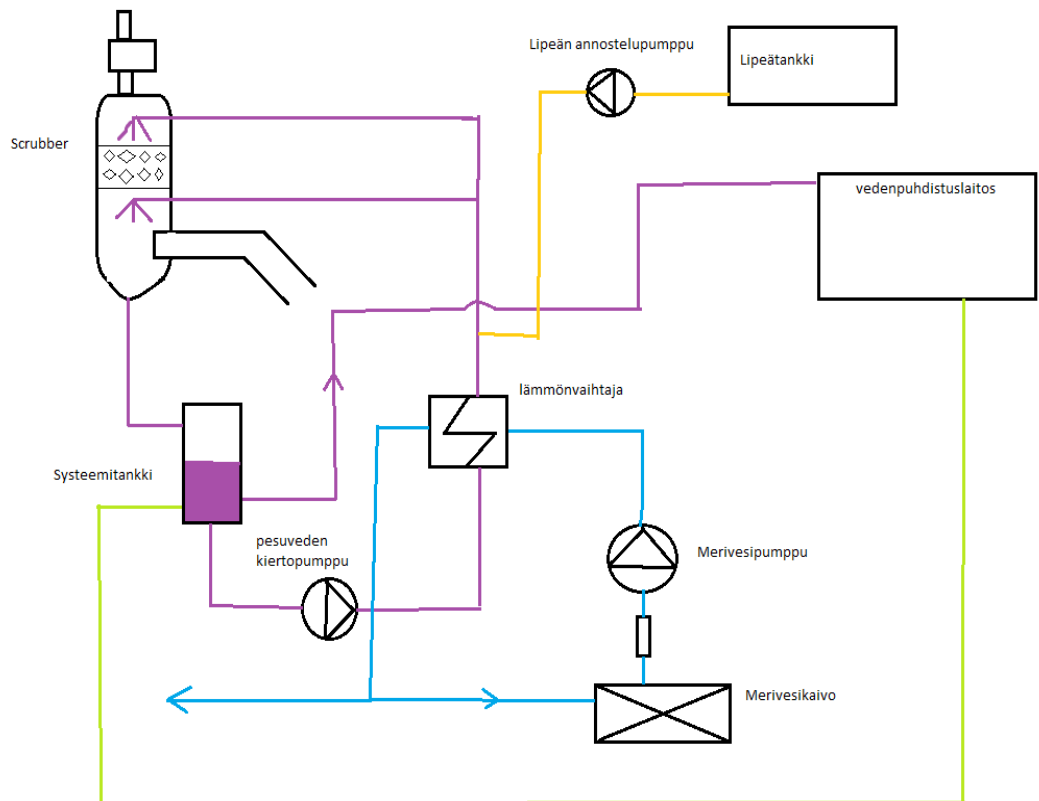


Kuva 4. Pakokaasupesurin suuttimet.

#### 4.2 Suljetun kierron pakokaasupesuri

Suljetun kierron pakokaasupesurin toiminta muistuttaa muuten läheisesti avoimen kierron pesuria, mutta pesutornista poistuva vesi ei valu mereen, vaan niin sanottuun systeemitankkiin, josta se pumpataan takaisin pesutorniin. Kierrossa olevan pesuveden määrä pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, jotta systeemistä ei tulisi liian raskas jolloin se vaikuttaisi laivan vakavuuteen. Koska vesimäärä on pieni, pakokaasut (n. 300 astetta) lämmittävät sen nopeasti. Sen takia pesuvettä tulee jäähdyttää. Tämä

toteutetaan yleensä levylämmönvaihtimin, joissa jäähdyttävänä aineena on merivesi. Langh Techin hybridi pakokaasupesurissa avoimen kierron merivesipumppu hoitaa jäähdytyksen suljetun kierron käytössä. Suljetun kierron pesuvetenä käytetään makeaa vettä, johon lisätään emästä, yleensä nestemäistä lipeää, neutraloimaan happamia rikkiyhdisteitä. Pesuliuoksen pH mitataan sen tullessa ulos pesutornista ja uudelleen ennen kuin se johdetaan takaisin torniin. Muutoksia pH:ssa kompensoidaan lisäämällä lipeää järjestelmään annostelupumpulla, jota ohjaa automatiikka. Myös aiemmin mainittua SO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> -suhdelukua käytetään annostelupumpun säätöön, koska se on suora indikaattori pesutuloksesta. 0.10 % rikkiä sisältävää polttoainetta poltettaessa on kyseinen suhdeluku 4.3.



Kuva 5. Suljetun kierron pakokaasupesuri (Langh Tech 2015)

#### 4.2.1 Pesuveden käsittely

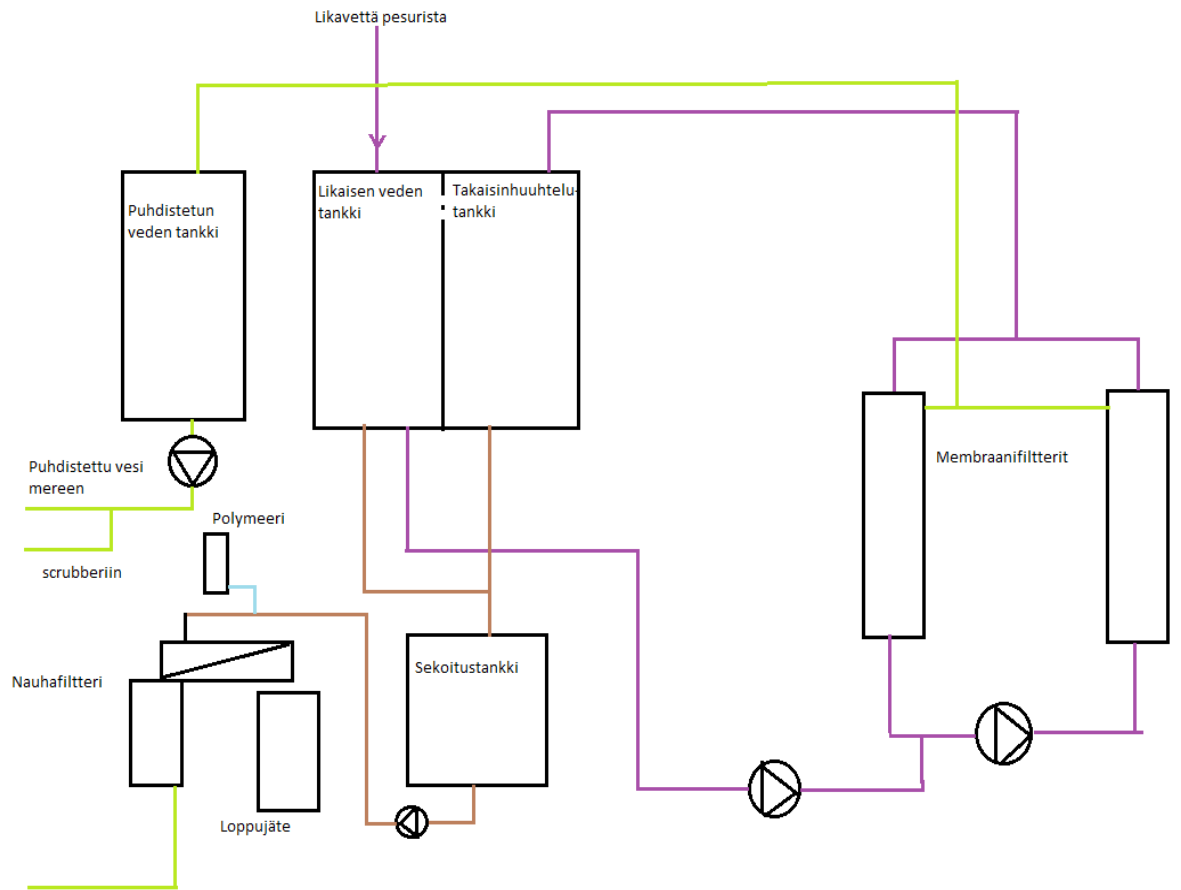
Lipeä muodostaa rikkioksidin kanssa reagoidessaan suoloja, jotka yhdessä liuennon noen ja pienhiukkasten kanssa rikastuvat pesuliuokseen ja suljetun

kierron pakokaasupesurien käytön suurimpia haasteita onkin pesuliuoksen puhdistaminen. Eri valmistajilla on erilaisia ratkaisuja pesuveden käsittelyyn.

Langtechin suljetun kierron pesurissa likaantunutta pesuvettä pumpataan vedenpuhdistuslaitokseen, jossa vettä puhdistetaan keraamisten membraanisuodattimien avulla. Likainen vesi pumpataan syöttöpumpun avulla pesulooppiin, jossa se kiertää kiertopumpun avulla. Membraanifilttereiden läpi kulkeutuva puhdistettu vesi jatkaa puhdistetun veden tankkiin, josta se pumpataan tarvittaessa takaisin pakokaasupesurin systeemitankkiin tai vesianalysaattorin kautta PH:n, sameuden ja polyaromaattisten hiilivetyjen arvojen salliessa mereen. Pesuloopista on myös jatkuva likaisen veden ylivuoto takaisinhuuhtelutankkiin. Likaisenveden- ja takaisinhuuhtelutankin pohjalle kertyy painovoimaisesti kaikkein likaisin vesi. Tätä tankkien pohjalle kertynyttä paksua likavettä pumpataan sekoitustankkiin. Sieltä likavesi pumpataan edelleen nauhafiltterille ja siihen lisätään vesiliukoista polymeeriä, joka toimii sitoen likapartikkelit yhteen. Täten nauhasuodattimen päälle jää kiinteää loppujätettä ja tästä erkaantunut vesi valuu nauhasuodattimen läpi säiliöön. Säiliöstä vesi pumpataan vesianalysaattorin kautta mereen. Kiinteä loppujäte ajetaan liikkuvan nauhasuodattimen avulla esimerkiksi tynnyriin tai muuhun vastaavaan säiliöön odottamaan jatkokäsittelyä maissa. Kiinteää loppujätettä muodostuu noin 0.5 kilogrammaa tuotettua megawattituntia kohden (Langh Tech 2016, 4-9).

Myös muun muassa Wärtsilä, Alfa Laval sekä Valmet ovat kehittäneet omia ratkaisujaan scrubberiveden puhdistamiseksi.





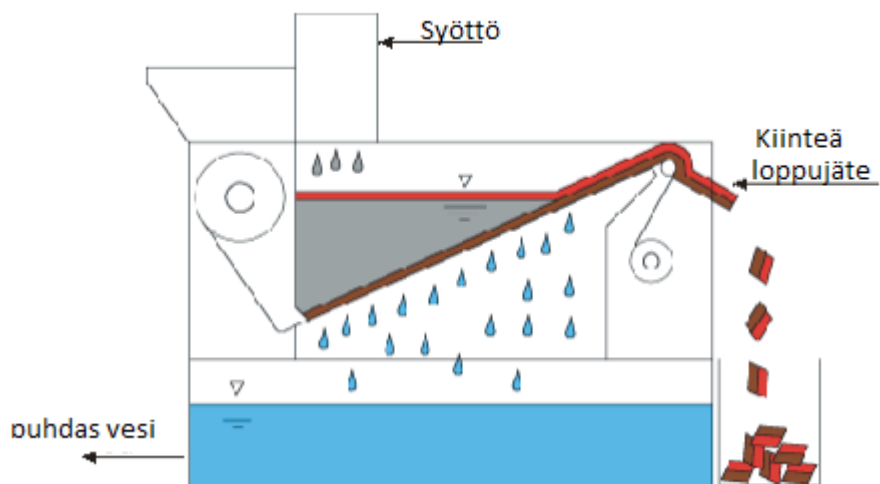
Kuva 6. Vedenpuhdistuslaitos (Lagh Tech 2015).



Kuva 7. MS Ailan vedenpuhdistuslaitos.



Kuva 8. Kuivaa loppujätettä nauhafilterin päällä (Langh Tech 2016).



Kuva 9. Nauhasuodattimen toimintaperiaate (Leiblein 2015).

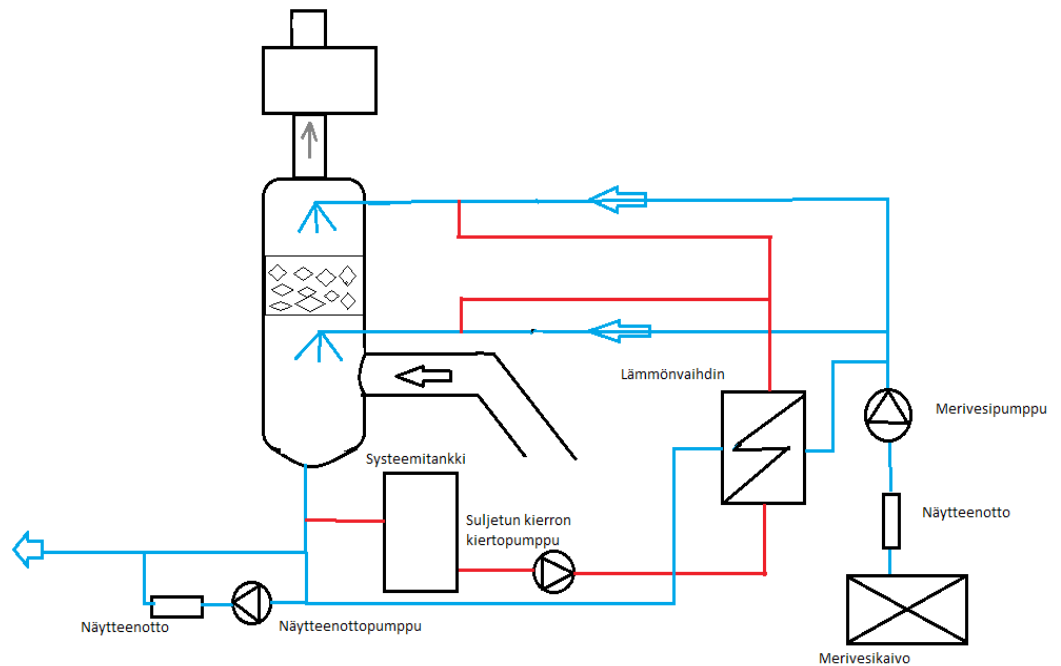
### 4.3 Hybridipakokaasupesuri

Hybridipakokaasupesurilla tarkoitetaan pakokaasupesuria, jota voidaan käyttää avoimen kierron pesurina sekä suljetun kierron pesurina. Tästä on hyötyä tilanteissa, joissa meriveden alkalisuus ei riitä tarvittavaan pesutulokseen tai alus liikennöi alueilla, joissa avoimenkierron pesurin käyttö on kiellettyä, sillä alus voi käyttää samaa korkearikkistä polttoainetta vaihtamalla suljetun kierron moodiin. Hybridipakokaasupesurissa eri pesukierrot voivat käyttää yhteneviä komponentteja.

Esimerkiksi avoimen kierron merivesipumppua voidaan käyttää suljetun kierron prosessissa jäähdyttämään pesuvettä. Pakokaasupesurin painon pitämiseksi mahdollisimman alhaisena voidaan myös käyttää samaa putkistoa.

Suljetun kierron moodissa systeemitankki voi olla erillinen tankki tai vaihtoehtoisesti pesutornin pohja voi toimia systeemitankkina.

Hybridipakokaasupesurin etuna suljetun kierron systeemiin verrattuna on se, että lipeää käytetään vain tarvittaessa sekä makeaa vettä kuluu vähemmän. Näin voidaan pienentää käyttökustannuksia. Hybridipakokaasupesurit ovat kuitenkin monimutkaisempia kuin pelkkä avoimen tai suljetun kierron pakokaasupesurit (Lloyds register 2016, 17.)



Kuva 10. Hybridipakokaasupesuri (Langh Tech 2015).

#### 4.4 Pakokaasuanalysointorit

Kaasuanalysointorin toiminta perustuu optiseen mittaukseen. Esimerkiksi Afrison valmistamat analysointorit perustuvat epädispersiiviseen infrapunatekniikkaan. Tietty kaasu havaitaan tunnistamalla sille tunnusomainen infrapuna-aallonpituuksien absorptio.

Analysointorin tarvitsema infrapunaenergia saadaan lampusta. Kun energiaa suodatetaan optisesti, säteily spektri rajoittuu mitattavan kaasun absorptiotaajuudelle. Analysointori mittaa energian sen jälkeen, kun infrapunaenergia on läpäissyt mitattavan kaasun. Tätä tietoa verrataan referenssitason energiaan ilman absorptiota. Mitattava kaasu imetään näytepumpun avulla analysointorille pakokaasuvirtauksesta (2012 How does an NDIR co2 sensor work? 2012.)

Consiliumin Opsi-järjestelmä käyttää korkeapainexenonlampua ja spektrometriä kaasun koostumuksen analysointiin. Lamppu ja vastaanotin on asennettu pakokaasuvirtauksen molemmiin puolin ja lampun valo suunnattu parabolisella peilillä vastaanotinlaatikkoon, jossa peili keskittää sen optisen kuidun päähän. Optinen kuitu johtaa valon konehuoneessa sijaitsevaan keskusyksikköön (Opsi AB 2006, 5.)

#### 4.5 Anturit

Veden sameuden mittaamisessa voidaan käyttää esim. Hachin solitax anturia, jossa sameuden mittaus perustuu infrapunavalon heijastuksiin sameuden aiheuttavista partikkeleista (Hach 2009,8).

Liuoksen pH:ta mitataan yleensä lasielektrodilla ja referenssielektrodilla. Lasielektrodi toimii muuntajana, muuttaen kemiallista energiaa (vetyionipitoisuutta) sähköenergiaksi, jota voidaan mitata millivolteissa. Reaktio tasapainottuu ja sähköpiiri sulkeutuu, kun ionit virtaavat referenssiliuoksesta mitattavaan liuokseen. PH-elektrodipari kalibroidaan niin kutsutuilla puskuriliuoksilla, joiden vetyionipitoisuudet tiedetään ja pysyvät muuttumattomina (Hach 2010, 4-5.)

Polyaromaattisten hiilivetyjen määrää voidaan seurata antureilla, jotka käyttävät mittauksessa hyväkseen UV-fluoresenssitekniikkaa.

Järjestelmässä on myös useita lämpötila- ja paineantureita sekä virtausmittareita, joilla voidaan tarkkailla pesurin toimintaa.

Lämpötila-anturit ovat laivoilla yleisiä PT100 -vastuslämpötila-antureita. Niiden toiminta perustuu metallien resistanssin muutokseen lämpötilan muuttuessa (Yakimchuk 2012, 139).

Paineantureita käytetään putkistossa tai pesutornissa vallitsevan paineen mittaamisen lisäksi tankkien pinnankorkeuden mittaamiseen. Paineen mittauksessa käytetään usein venymäliuska paineantureita, joiden toiminta perustuu vastusarvojen muutoksiin. Anturissa on nimensä mukaisesti venymäliuskoja, jotka muuttavat muotoaan paineen muutoksen seurauksena ja näin ollen myös vastusarvot ja ulostulosignaalin voimakkuus muuttuvat. (Yakimchuk 2012, 140.)

Virtausmittareilla voidaan tarkkailla pakokaasupesurin läpi menevän veden määrää, sekä havaita mahdollinen lämmönvaihdinten tukkeutuminen suljetun

kierron ajossa. Yleisimpien virtausmittareiden toiminta perustuu elektromagneettiseen mittaukseen, jossa mitattavaan putkeen muodostetaan magneettikenttä. Magneettikentän läpi virtaava neste synnyttää jännitteen jonka vahvuus riippuu tilavuusvirran määrästä. Tämä jännite mitataan elektrodeilla ja siitä saadaan mittaustulos. (Magnetic flowmeter technology.)

## 5 MEREEN PUMPATTAVIEN VESIEN VAATIMUKSET

Prosessin pesuvesien arvoista on pidettävä kirjaa yhdessä GPS - paikkatietojen kanssa. Nykypäivänä se tarkoittaa automaattista tietojenkeruuhjelmaa, josta tietoja on helppo tarkastella jälkikäteen. Seurattavia arvoja ovat: pH, PAH, sameus ja lämpötila.

Ulospumpattavan veden on täytettävä jompikumpi seuraavista pH rajoituksista: Sisään menevän ja ulostulevan veden pH arvon ero ei saa olla yli kahta pH yksikköä tai pH:n on oltava vähintään 6,5 mitattuna 4 metrin etäisyydeltä laivan ulostuloaukosta (IMO 2009, 14).

Polyaromaattisten hiilivetyjen(PAH) rajoitus määräytyy ulos pumpattavan pesueden määrän mukaan suhteessa megawattitunteihin. Katso taulukko.

Taulukko 3. PAH rajoitukset pesueden määrän mukaan (IMO 2009, 15).

Virtausmäärä (t/MWh)	Pitoisuusraja poistuvassa pesuedessä (µg/L)
0-1	2250
2,5	900
5	450
11,25	200
22,5	100
45	50

95	25
----	----

Sameus tai kiinteät partikkelit mitataan FNU (formazin nephelometric units) asteikolla. Sisään menevän ja ulostulevan pesuveden sameuden erotuksen keskiarvo ei saa ylittää 25 FNU:ta 15 minuutin periodissa (IMO 2009, 15.)

Rikkipesuri poistaa pakokaasusta myös pieniä määriä typen oksideja, mutta päästörajoitukset eivät vaadi niiden jatkuvaa mittausta ulospumpattavasta vedestä. Rehevöitymisen vähentämiseksi nitraateille on asetettu kuitenkin asetettu raja-arvo, 12 % pakokaasuvirrassa olevista typen oksideista, joka on huomattavasti enemmän kuin mitä rikkipesurilla yleisesti saavutetaan.

Viiden vuoden luokituksen uusimisen vaatimuksina on, että rikkipesurin pesuveden nitraattipitoisuuksista on tehty laboratorioanalyysit. Niiden tulokset on oltava aluksen Exhaust Gas Cleaning Record Bookissa, jotta ne ovat saatavilla lippuvaltion tai satamaviranomaisen tekemää tarkastusta varten (Understanding Exhaust Gas Treatment Systems 2016, 46.)

EU:n jäsenvaltiot voivat aluevesillään myös asettaa omia rajoituksia mereen pumpattavien pesuvesien suhteen EU:n WFD:n puitteissa.

Esimerkiksi Belgiassa pesuvesien ulos pumppaaminen on kielletty sisävesissä ja satamissa. Tanskassa saatetaan tulevaisuudessa kieltää pesuvesien pumppaaminen mereen, jotta pysyttäisiin WFD:n tavoitteissa. Virossa, Suomessa, Ranskassa, Norjassa, Puolassa, Ruotsissa ja Isossa Britanniassa satamat saavat itse asettaa säännöt, mutta eivät ole vielä tehneet sitä. Saksassa pesuvesien ulos pumppaaminen on kielletty sisävesiväylillä, esimerkiksi joilla. Satamat saavat myös päättää omista rajoituksistaan, mutta liittovaltion vesilainsäädännön puitteissa. Latviassa kansalliset viranomaiset ovat sillä kannalla, että avoimen kierron pesuvesien mereen pumppaaminen Latvian aluevesillä ja satamissa tulisi kieltää. Liettuan satama-alueilla pakokaasupesurin vesien pumppaaminen mereen on kielletty. (European commission 2016.)



## 6 MATERIAALEISTA

Avoimen kierron pesurissa pakokaasupesuriin menevän putkiston ja pumpun on oltava meriveden kestävä materiaalia esimerkiksi CuNiFer -seosta tai komposiittia. Pakokaasupesurista ulos johtavan putkiston on kestävä happamia pesuvesiä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että putkiston on oltava haponkestävää terästä esim. smo 254 tai 316L.

Suljetun kierron pesurissa kaikkien putkien ja komponenttien, jotka ovat kosketuksissa pesuliuoksen kanssa, tulee olla haponkestävää materiaalia. (Verosaari 2016).

Molemmat edellä mainituista ovat austeniittisiä ruostumattomia teräksiä, joista smo 254 kestää huomattavasti paremmin syövyttäviä liuoksia. Se sisältää paljon kromia, molybdeeniä, nikkeliä ja typpeä ja se on hyvin yhteensopiva muiden ruostumattomien terästen kanssa.

Tämä tarkoittaa, että osa pakokaasupesuri systeemistä voidaan valmistaa smo 254:stä ja osa tavallisesta haponkestävästä teräksestä. Smo 254 ei ole niin altis jännityskorroosiolle suolaisissa olosuhteissa kuin esim. 316L.

Erityisesti suljetun kierron pakokaasupesuriin smo 254 on ihanteellisin materiaali ajatellen putkistoa ja säiliöitä, koska se kestää parhaiten vaihtelevia olosuhteita esim. happamia ja emäksisiä liuoksia, suolaliuoksia ja lämpötilan vaihteluja. (Outokumpu 2016, 2.)

Prosessin luonteen vuoksi pakokaasupesurin systeemin putkistot ja säiliöt altistuvat pistesyöpymiselle, rako- ja eroosikorroosiolle. Pistesyöpymisessä ruostumattoman teräksen pintaan syntynyt passiivikerros vioittuu, esim. rakennevirheen tai prosessiliuoksen törmäyksen johdosta ja metallin pintaan muodostuu paikallisia kuoppia. Rakokorroosiota esiintyy hitsaussaumoissa ja tiivistepinnoissa (Sorsa 2015, 42-43).

## 7 ASENNUS

Jälkiasennuksena tehtävän pakokaasupesurin asennuksen suurin haaste on löytää kaikille tarvittaville laitteille paikat alukselta.

Lähes jokainen jälkiasennus on myös erilainen, johtuen erilaisista aluksista. Molempien pakokaasupesuri-tyyppien jälkiasennukseen vaaditaan laivan kuivatelakointi, koska meriveden imu- ja paluuputket on asennettava aluksen vesirajan alapuolelle. Imu voidaan sijoittaa esimerkiksi aluksen olemassa olevaan merivesikaivoon. Imulinjaan on asennettava suodatin, jotta vedessä olevat epäpuhtaudet, roskat ja eliöt eivät joudu pumppuun.

Itse pakokaasupesurin pesutorni tulee yleensä äänenvaimentimen paikalle.

Molemmat pakokaasupesurit vaativat myös mittavia putkiasennuksia, etenkin, jos osa laitteistosta sijoitetaan konehuoneeseen, koska pesutorni ja siihen liittyvät laitteet sijaitsevat väistämättä aluksen korsteenissa.

Putkiasennukset on helpointa tehdä aluksen telakoinnin yhteydessä, joskin suurin osa niistä on mahdollista tehdä aluksen normaalin liikennöinnin yhteydessä. (Verosaari 2017.)

Hybridipakokaasupesuri vaatii myös lipeätankin, joka on joko valmistettava tai jos käytetään olemassa olevaa tankkia, se on pestävä ja lämmitysjärjestelmä rakennettava. Lipeätankkia ei tarvitse pinnoittaa, koska normaali aineteräs kestää lipeää, kunhan se ei ole yli 45 -asteista. Tankki voi olla myös siirrettävä säiliö aluksen kannella, mutta siinä on oltava lämmitys.

Putkiasennuksia huomattavasti hitaampia automaatio- ja sähköasennuksia voidaan suorittaa aluksen liikennöidessä normaalisti. Kuivatelakointiaika pakokaasupesurin asennukseen on noin kaksi viikkoa (Langh Tech 2016.)

Esimerkkinä Hybridipainepesurin asennus Langh Shipin M/S Ailalle kesällä 2014.

Alukselle tehtiin pesurin meriveden tulo- ja paluulinjat jo alkuvuodesta 2014 kuivatelakoinnin yhteydessä. Lähes kaikki muut asennukset tehtiin aluksen ollessa vedessä kahden viikon huoltoseisokin aikana. Pesutorni asennettiin kesällä 2014 äänenvaimentimen tilalle korsteeniin. Yksi suurimmista haasteista oli saada kaikki komponentit mahtumaan konehuoneeseen yhtenä kappaleena tai siirtämättä tai purkamatta konehuoneessa jo olevia laitteita.

Esimerkiksi merivesipumppu piti asentaa kolmessa osassa (peti, pumppu ja moottori), jotta se saataisiin paikoilleen. Koska tarkoitus oli saada avoimen kierron-järjestelmä toimimaan ensin, esimerkiksi suljetun kierron vaatimat

vesitankit asennettiin jälkikäteen. Vesitankit oli mitoitettu niin että ne mahtuvat konehuoneen huoltoluukusta sisään, josta ne saatiin rullien päällä työnnettyä paikoilleen. Myös suljetun kierron putkiasennuksia jatkettiin aluksen palattua liikenteeseen. Koska aluksella oli kaksi dieselin päivätankkia, diesel selkeytystankki muutettiin toiseen päivätankkiin, jotta siitä saatiin tehtyä lipeätankki. Tämän johdosta myös dieselin siirtolinjoihin ja dieselseparaattorin linjoihin piti tehdä muutoksia. Lipeätankkiin tehtiin lämmityskierto, joka saa lämpönsä HT-jäähdytysvesikierrosta. Pakokaasupesurin vedenpuhdistuslaitos sijoitettiin kokonaisuudessaan konehuoneeseen ylimmälle tasolle apukattilan viereen. Samalle tasolle sijoitettiin myös pakokaasuanalysointilaite Opsiksen ohjauskaappi (Hietaharju 2017.)

Taulukko 4. Langh Techin pesutornin mitoitukset riippuu koneen tehosta (Langh Tech 2016).

Koneen teho [MW]	Pesutornin halkaisija [mm] (1)	Pesutornin korkeus[mm] (1)	Pesutornin paino [kg]
6	2,400	8,000	6,800
8	3,000	9,000	7,600
10	3,200	10,500	8,200
12	3,500	11,500	9,000

Langhtechin avoimen kierron pesurisysteemin hinta 6 MW koneelle on 1 850 000 euroa. Tässä on huomioitu mahdollinen muutos hybridiksi. Tässä tapauksessa myöhempi muutos hybridiksi maksaisi 780 000 euroa (Verosaari 2016.)

Taulukko 5. Langhtechin suljetun kierron pesurin ja vedenpuhdistusjärjestelmän tietoja. (Langh Tech 2016).

Koneen teho [MW]	Energian kulutus [kW] 100%/85% MCR	Makean veden kulutus [l/h] 100%/85% MCR	Loppujäte [kg/h] 100%/85%	Puhdistusjärjestelmään pumpattava prosessivesi [l/h] 100%/85% MCR	Lipeän kulutus [l/h] 100%/85% MCR
6	90 / 76,5	400	2,4 / 2,0	1500 / 1275	81 / 69
8	120 / 102	600	3,2 / 2,7	2000 / 1700	108 / 92
10	150 / 127,5	800	4 / 3,4	2500 / 2125	135 / 115
12	180 / 153	1000	4,8 / 4,1	3000 / 2550	162 / 138



Kuva 11. Pakokaasupesurin pesutornin asennus M/S Ailalle 2014.

## 8 LUOKITUKSET

Kuten suurin osa laivoissa käytettävistä laitteista, myös pakokaasupesurit on sertifioitava lippuvaltion toimesta eli esitettävä, että laitteisto täyttää vaaditut toimintakriteerit sekä luokitettava luokituslaitoksen toimesta, jotta varmistutaan siitä, että laitteisto ei aiheuta riskejä laivalle ja liikenteelle. Pakokaasupesurien luokitukseen kuuluu mm. tekninen manuaali, käyttöohjeet, pesuprosessin valvontajärjestelmät sekä koko järjestelmän kattava riskinarviointi. Riskeihin voi lukeutua mm. vastapaine, korroosio, haitallisten kemikaalien vuodot, tulipalo ja tulviminen (Lloyds register 2016, 12.)

Pakokaasupesurin luokittamiseen vaikuttaa olennaisesti myös sen kapasiteetti. Esimerkiksi pesurin vesipumppujen kapasiteetin ollessa alle 50 m<sup>3</sup>/h, riittää luokituksen saamiseen sertifikaatti pumpun valmistajalta, josta käy ilmi yhdenmukaisuus luokituslaitoksen sääntövaatimusten kanssa, pumppua on testattu sekä testejä on ollut valvomassa pätevä valvoja. Jos taas pumpun kapasiteetti on yli 50 m<sup>3</sup>/h, tarvitaan sertifikaattiin luokituslaitoksen valvoja valvomaan testejä. Myös lipeäpumpun kohdalla on samankaltainen jako sertifikaatin suhteen. Pumpun kapasiteetin ollessa alle 1 m<sup>3</sup>/h, riittää luokitukseen valmistajan sertifikaatti. Kaikki ohjaus- ja valvontajärjestelmät luokitetaan luokituslaitoksen toimesta (DNV GL 2014, 8.)

Pakokaasupesureista on myös oltava kaaviot muun muassa veden syötön, lipeän syötön, jäähdytyksen, sekä pesuveden käsittelyn osalta (DNV GL 2014, 9).

## 9 KÄYTTÖ JA HUOLTO

Langh Technin avoimen kierron pakokaasupesurin käyttö on varsin yksinkertaista. Merivesipumppu käynnistetään ja se alkaa pumpata merivettä pesuriin ennen pääkoneen käynnistämistä. Ajon aikana tarkkaillaan arvoja, kuten pesuveden virtausnopeutta, vesipatjan pesutorniin muodostamaa vastapainetta, pesuveden lämpötilaa, sisään tulevan ja ulosmenevän veden pH -arvoja, sameutta sekä polyaromaattisia hiilivetyjä.

Jos raja-arvot ylittyvät tai alittuvat niin automaatiojärjestelmään tulee hälytys. Jos esimerkiksi ulos menevän veden sameus tai PAH -yhdistepitoisuudet ylittävät raja-arvot tai pH alittuu, on veden virtausmäärää pesurissa mahdollisuuksien mukaan kasvatettava tai koneen kuormaa pienennettävä. (Langh Ship 2014, 15.)

Closed loopilla ajettaessa järjestelmä käynnistetään samaan tapaan. Ensin tulisi varmistua siitä, että systeemissä on tarpeeksi pesuvettä ja että se on tarpeeksi alkalista, eli lipeää tulee syöttää jo ennen koneen käynnistämistä, jotta pesuvesi kykenee neutralisoimaan rikin oksideja heti startista. Kaksi pesuvettä systeemitankista pesutorniin kierrättävää pumppua käynnistetään, samoin kuin jäähdytyksestä vastaava merivesipumppu, sekä lipeäliuoksen annostelupumppu. Tämän jälkeen käynnistetään vedenkäsittelylaitos. Käytännössä tämä tarkoittaa yhden nappulan painamista ohjausjärjestelmässä (Langh Ship 2014, 3.)

Hybridispakokaasupesurin käytössä tulee vastaan myös tilanteita, jolloin on vaihdettava suljetulta kierrolta avoimelle kierrolle tai päinvastoin. Tällöin järjestelmä pysäytetään hetkellisesti, käännetään suljetun kierron lämmönvaihtimien venttiilit haluttuun asentoon, vaihdetaan moodia ohjausjärjestelmän tietokoneelta ja käynnistetään uudelleen. Langh shipin hybridipakokaasupesuri moodin vaihto onnistuu muutamassa minuutissa. (Langh Ship 2014, 4.)

Järjestelmän huoltoa ja kunnossapitoa vaativia komponentteja ovat muun muassa: merivesipumppu, anturit, kaasuanalysaattori, pisaranerotin, merivesisuodatin, kaukokäyttöventtiilit ja automaatiojärjestelmä. Merivesipumpun ja sen sähkömoottorin laakerit sekä akselitiiviste on vaihdettava säännöllisesti. Anturit ja kaasuanalysaattori vaativat säännöllistä kalibrointia ja puhdistusta tarvittaessa. Pisaranerotin on pestävä, kun pakokaasun vastapaine kohoaa liian korkeaksi, eli pisaranerotin alkaa tukkeutuessaan vastustaa pakokaasuvirtausta. Merivesisuodatin vaatii säännöllistä puhdistamista. (Verosaari 2016.) Sähkölaitteiden kuntoa tarkkaillaan eli mitataan eristysvastuksia, lämpötiloja ja tärinää (sähkömoottoreista), liittimet ja kuluvat osat tarkastetaan (Hall 2014, 16).

Jälkiasennuksena pakokaasupesuri lisää aluksen sähkönkulutusta. Avoimen kierron pesurissa kuluttajia ovat lähinnä merivesipumppu, näytteenottopumppu ja automaatiojärjestelmä. Jos laivassa on pelkästään avoimen kierron pesuri, voidaan käyttökustannuksiin laskea myös vähärikkisen polttoaineen aiheuttamat lisäkustannukset, jos liikennöidään alueilla, joissa avoimen kierron käyttö on kielletty.

Jos alus liikennöi pelkästään SECA -alueilla ja on päätetty käyttää matalarikkistä polttoainetta, niin voidaan käyttää matalamman TBN (Total base number) luvun voiteluöljyä, joka on halvempaa. Vastaavasti pakokaasupesurin käytössä jatkuva korkeampirikkinen polttoaineen käyttö asettaa vaatimuksia voiteluöljyn kyvyille neutraloida happamia yhdisteitä, joten on todennäköisesti käytettävä korkeamman TBN luvun omaavaa voiteluöljyä. (Woodyard 2009,104).

Suljetulla kierrolla lisäkuluja aiheutuu lipeäliuoksen kulutuksesta ja loppujätteen hävittämisestä. 50 prosenttisen lipeäliuoksen kulutuksen voi laskea melko tarkasti seuraavasta kaavasta:  $S \% \times 8 \text{ kg} \times \text{Mwh}$ .

Eli polttoaineen rikkipitoisuuden jokaista prosenttia kohden 8 kg lipeää, joka kerrotaan pääkoneella tuotetuilla megawattitunneilla. Lipeäliuoksen hinta laivaan toimitettuna Suomessa on satamasta riippuen noin 200 - 300 € / tonni. 50 % lipeäliuoksen tiheys on 1,5 kg/litra (Verosaari, 2016.)

Kiinteää loppujätettä syntyy noin 2,5 kg poltettua HFO tonnia kohden. Tämän hävityskulut Suomessa ovat noin 400 € kuutiota kohden, joka painaa noin tonnin (Verosaari 2016).

Pakokaasupesurin käyttöhenkilökunnan on myös pidettävä kirjaa seuraavista tapahtumista:

Vedenkäsittely-yksikön komponenttien huolto, mukaan lukien pumput, suodattimet, venttiilit ja putket.

Anturi-järjestelmien huolto sekä kunnossapito, esimerkiksi lämpötila-, paine-, virtaus- ja pinnan korkeusanturit sekä kaasuanalysaattori.

Valvontajärjestelmän kunnossapito sekä huolto.

pH, PAH ja sameusmittaus, tiedonkeruu.

Komponenttien kalibrointi. Pääasiassa anturit sekä kaasu-analysaattori.

Järjestelmien osien korjaukset sekä vaihdot.

Kertyneen loppujätteen päivittäinen määrä, varastointipaikka, sekä alukselle varastoitu jätteen määrä.

Maihin toimitetun jätteen määrä, minne jätetty ja milloin. Myös kuitit on säilytettävä.

Prosessissa käytettyjen kemikaalien määrä, sekä käytetyn, että varastoidun lipeäliuoksen kulutus ja määrä tankissa  
(Langh Ship 2015, .2)

## **10 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET**

Molemmat pakokaasupesurityypit puhdistavat pakokaasuista lähestulkoon kaikki rikin oksidit sekä pienhiukkasia. Kuten aiemmissa luvuissa on käynyt ilmi, suurin ero avoimen kierron ja suljetun kierron pesurin välillä ympäristön kannalta on niiden toimintaperiaate.

Avoimen kierron pesurissa kaikki rikin oksidit sekä pienhiukkaset, jotka on puhdistettu pakokaasusta, päätyvät pesuveden mukana suoraan mereen, toisin kuin suljetun kierron pesurissa. Avoimen kierron pesuvedet ovat verrattain happamia ja vaikuttavat meren ekosysteemiin samaan tapaan kuin ilmakehään pääsevät rikin oksidit (Lloyds register 2016, 40.)

Hiilidioksidipäästöt ovat pääasiallinen syy merien happamoitumiseen, mutta ilmeisesti myös merten biologinen toiminta aiheuttaa happamoitumista. Merten eliöstölle happamoitumisen vaikutukset näyttävät olevan pääasiallisesti haitallisia.



Ensimmäisenä happamoitumisen vaikutukset näkyvät kalkkikuorisissa eliöissä kuten koralleissa, simpukoissa ja eräissä kasviplanktonlajeissa, koska meriveden happamoituminen hankaloittaa kalkkikuorien muodostumista. Itämeren lajeihin happamoituminen vaikuttaa tuoreiden tutkimusten mukaan melko vähän (A. Jokimäki 2010.)

Avoimen kierron pesurien vesiä on tutkittu ja näyttää siltä, että ne sisältävät enemmän polyaromaattisia hiilivetyjä ja raskasmetalleja (kuten vanadiumia, sinkkiä, kadmiumia, lyijyä ja nikkeliä) kuin aiemmin on luultu.

Tutkimukset jatkuvat ja jotkin maat kuten Belgia ja Saksa ovat jo kieltäneet avoimen kierron pesurien käytön satamissaan ja esimerkiksi jokialueillaan. Myös Euroopan Unionin vesipolitiikan puitedirektiivi (Water framework directive WFD) asettaa vaatimuksia jäsenvaltioille ja samalla avoimen kierron pakokaasupesureille. WFD:n tavoitteena on suojella sisävesiä, jokivesiä ja rannikkovesiä pilaantumiselta. (Water framework directive 2016, 2.)

## 11 PÄÄSTÖJEN VALVONTA

Suomessa laivojen päästöjen valvonnasta vastaa Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, poliisi sekä rajavartiolaitos. EU:n satamavaltioissa valvonta suoritetaan meriturvallisuusvalvonnan yhteydessä. Valvonta edellyttää yhteistyötä eri valtioiden viranomaisten välillä (Liikenne- ja viestintäministeriö 2014.)

Euroopan unioni on käynnistänyt itämeren alueella CompMon (Compliance Monitoring) nimisen projektin, jonka tarkoitus on helpottaa IMO Marpol Annex VI:n eli rikkidirektiivin valvomista. (CompMon 2017.)

Keinoina ovat muun muassa ilmasta käsin tehtävä pakokaasujen rikkipitoisuuksien mittaaminen, kiinteisiin rakenteisiin kiinnitetyt anturit sekä laivoilla tapahtuvat tarkastukset. Ilmasta käsin tehtävät tarkastukset tehdään käytännössä lentokoneilla, helikoptereilla tai vaihtoehtoisesti asentamalla

eräänlaisia ”haistelijoita” esimerkiksi satamiin, siltoihin tai majakoihin. Laivan päällä suoritettava valvonta onnistuu esimerkiksi kannettavan polttoaineen rikkipitoisuudenmittauslaitteen avulla (Compton 2017.)

EU:n mukaan rikkisäännösten rikkomisesta tulee rangaista tarpeeksi isolla sakolla, jotta saadaan estettyä syyllisiä hyötymästä esim. korkea- ja matalarikkisen polttoaineen hintaerosta (Liikenne- ja viestintäministeriö 2014).

## 12 YHTEENVETO

Rikkipesureiden kiinnostavuutta varustamojen näkökulmasta on vähentänyt melko alhaiset polttoaineen hinnat, etenkin kun vähärikkisemmillä polttoaineilla ajaminen ei vaadi merkittäviä alkuinvestointeja.

Myös kaasu on yleistynyt uudisrakennusten polttoaineena. Nämä alukset ovat lähes poikkeuksetta kykeneviä polttamaan myös MGO:ta tarvittaessa. Kun öljynhinta lähtee nousemaan, myös pakokaasupesurit yleistynevät.

Tulevaisuudessa avoimen kierron rikkipesureiden käyttö saatetaan kieltää, koska ne siirtävät kaiken pakokaasuista puhdistetun jätteen suoraan meriveteen. Tämä edistää vesistöjen happamoitumista ja rehevöitymistä. Tällöin vaihtoehdoksi jää ainoastaan suljetun kierron rikkipesuri tai vähärikkinen polttoaine.

Tällä hetkellä on ehdottomasti kannattavinta ajaa hybridipakokaasupesurin avoimella kierrolla siellä missä se on sallittua, koska lipeäliuosta ei tarvitse syöttää prosessiin, eikä loppujätteen käsittelystä maksaa mitään.

Hybridispakokaasupesurin etuna on, että sillä voidaan vaihtaa suljetun kierron operointiin saavuttaessa vesialueelle, jossa avoimen kierron käyttö on jo kielletty. Myös suljetun kierron jätevesien pumppaamista mereen on rajoitettu esimerkiksi Saksassa, jossa paikallista vesistöjen suojelulakia sovelletaan koskemaan myös rikkipesureita.

## Lähteet

About Compmon. 2017. CompMon. WWW-dokumentti. Saatavissa: [http://compmon.eu/about\\_compmon](http://compmon.eu/about_compmon) [viitattu 2.5.2017].

Directive 2012/33/EU of the European Parliament and of the Council of 21 November 2012. 2012. Euroopan komissio. PDF-dokumentti [Viitattu 12.10.2016].

European commission. 2016. Commission's views on the discharge of scrubber wash water and the updated table summarising the position of Member States on the acceptability of discharges of scrubber wash water - Agenda item 6.C ESSF of 26/1/2016. PDF-dokumentti. [Viitattu: 8.8.2016]

Exhaust Gas Cleaning (EGC) -System Record Book "Scheme" B. 2014. Ohjekirja.

Hach-lange 2009 solitax sc User manual. Ohjekirja.

Hach-lange 2010 polymetron Model 9135 pH/redox measurement user manual. Ohjekirja.

Hall, Dennis T. 2014 Practical marine electrical knowledge. Witherby seamanship.

Hietaharju, T. 2017. Konemestari. Haastattelu 17.5.2017. Langh Ship Oy.

How does an NDIR co2 sensor work?. s.a. CO2Meter.com. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.co2meter.com/blogs/news/6010192-how-does-an-ndir-co2-sensor-work> [Viitattu 12.8.2016].

IMO. 2009. Annex 9 resolution mepc.184(59) 2009 guidelines for exhaust gas cleaning systems. PDF-dokumentti. Saatavissa:

[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.184\(59\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.184(59).pdf) [Viitattu 20.3.2016].

Inclined filter. 2015. Leiblein. WWW-dokumentti. saatavissa: <http://www.leiblein.com/filtration/inclined-filter.html> [Viitattu 28.4.2017].

Jokimäki. A. 2016. Meren happamoitumisen syyt ja Itämeri happamoitumislaboratoriona. WWW-dokumentti. Saatavissa: [http://www.co2-raportti.fi/?page=ilmastouutisia&news\\_id=2810](http://www.co2-raportti.fi/?page=ilmastouutisia&news_id=2810) [Viitattu 17.9.2016].

Langh Ship. 2014. Hybrid Exhaust Gas Cleaning (EGC) – System Technical Manual, "Scheme" B, m/s Aila. Ohjekirja.

Langh Tech. 2014. Material safety data sheet, Byproduct from exhaust gas cleaning. Käyttöturvatieote.

Lang Tech. 2015. Scrubber Installation System Diagram Aila/Linda. PDF-dokumentti. [Viitattu 9.6.2016].

Langh Tech. 2016. Saatavissa: <http://www.langhtech.com/products/> [viitattu 21.6.2016].

Magnetic flowmeter technology. s.a. UFM. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.flowmeters.com/magnetic-technology> [Viitattu 29.4.2017].

Opsis AB, 2006, DOAS CEM System installation & user's guide. Ohjekirja.

Type 254 SMO. 2016. Outokumpu. PDF-dokumentti. [Viitattu 9.12.2016].

Plötzke, M. 2014. "SECA-Compliance" für existierende Schiffe – Brennstoffumstellung oder Scrubber-Einbau ?. PDF-dokumentti. [Viitattu 15.5.2016].

Prices. 2017. Bunkerworld. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.bunkerworld.com/prices>

[Viitattu 1.5.2017].

Scrubber Installation System Diagram Aila/Linda. 2015. Langh Tech. PDF-dokumentti. [viitattu 6.6.2016].

Simple and efficient exhaust gas cleaning. 2016. Langh Tech. WWW-dokumentti. saatavissa: <http://www.langhtech.com/products/#1454055798681-9ce6b728-426d> [Viitattu 17.05.2016].

Sorsa, J. 2015. Materiaalitekniikka. Sanoma pro.

Thoresen, H.B. 2014. DNV GL EGC system approval and experience. PDF-dokumentti. [Viitattu 12.5.2016].

Understanding Exhaust Gas Treatment Systems. 2016. Lloyds Register. PDF-dokumentti [Viitattu 12.9.2016].

Unique Hybrid Scrubbers. 2016. Langh Tech. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://www.langhtech.fi/wp-content/uploads/sites/5/2016/09/Langh\\_Tech\\_unique\\_hybrid\\_scrubbers.pdf](http://www.langhtech.fi/wp-content/uploads/sites/5/2016/09/Langh_Tech_unique_hybrid_scrubbers.pdf) [Viitattu 9.3.2017].

Verosaari, R. 2016. vanhempi tekninen neuvonantaja. Puhelin- ja sähköpostihaastattelut 15.5.2016 ja 10.5.2017. Langh Tech.

Water framework directive. 2016. Euroopan komissio. PDF-dokumentti [Viitattu 1.7.2016].

Woodyard, D. 2009. Pounders marine diesel engines and gas turbines. Elsevier Ltd.

Wärtsilä open loop scrubber system. 2016. Wärtsilä. WWW-dokumentti. saatavissa: <http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/exhaust-gas-cleaning/sox-abatement/wartsila-open-loop-scrubber-system> [Viitattu 15.11.2016].

Yakimchuk, A. 2012. Ship Automation For Marine Engineers & ETOs.  
Witberby seamanship.