

Konehuoneen sammutus- ja palonilmaisujärjestelmät

Maarit Tuomisaari
VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-4989-9

ISSN 1235-0605

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1996

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4815

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik, Stenkarlavägen 4, PB 1803, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4815

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,
Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, telefax + 358 9 456 4815

Tekninen toimitus Leena Ukoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1996

Tuomisaari, Maarit. Konehuoneen sammutus- ja palonilmaisujärjestelmät. Espoo 1996, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1794. 42 s.

UDK 621.431.74:614.841:614.843/.846

Avainsanat ships, fires, fire prevention, fire protection, fire safety, safety, engines, engine rooms, fire alarm systems, fire fighting, fire extinguishers

TIIVISTELMÄ

Tutkimus on osa laajempaa tutkimuskokonaisuutta, jossa tarkastellaan laivan konehuoneen paloturvallisuutta monista eri näkökulmista. Konehuonepalojen torjunnan päätavoitteiksi on tutkimuksessa asetettu syttymisen estäminen, aikainen ja tehokas havaitseminen ja sammutus sekä alueellinen rajoittaminen. Tässä osaprojektissa arvioidaan konehuoneisiin soveltuvia kiinteitä palonilmaisu ja sammutusjärjestelmiä.

Laivan konehuoneen palonilmaisu- ja sammutusjärjestelmien vähimmäisvaatimukset on esitetty kansainvälisessä SOLAS-sopimuksessa. Käytännössä vähimmäisvaatimusten täyttäminen ei riitä takaamaan konehuoneen paloturvallisuutta, ja turvallisuustasoa tulisi nostaa joko lisäämällä palontorjuntakalustoa tai käyttämällä teknisesti kehittyneempiä ratkaisuja.

Palonilmaisintekniikan kehitys on viime vuosina painottunut signaalinkäsittelyyn, jonka avulla palonilmaisusta on tehty entistä luotettavampaa: vaikka ilmaisin on herkkä, se ei ole altis erheellisille ilmoituksille. Ilmaisun perustuu kuitenkin edelleen lähes aina lämmön, savun tai liekin havaitsemiseen. Vaihtoehtoisena ilmaisintyyppinä markkinoille ovat tulleet erilaiset kaasuilmaisimet.

Sammutusmenetelmien tutkimus ja kehitys on tällä vuosikymmenellä ollut erittäin laaja-alaista pääasiassa siksi, että lähes kaikki halonisammutusjärjestelmät tulee lähitulevaisuudessa korvata jollakin muulla järjestelmällä. Markkinoille on tullut ja jatkuvasti tulee täysin uusia sammutusaineita ja sammutusmenetelmiä. Uusista sammutusteknisistä ratkaisuista on muodostunut merkittäviä tutkimus- ja tuotekehityskohteita.

ALKUSANAT

Tämä raportti on *Paloturvallinen konehuone* -projektin sammutus- ja palonilmaisujärjestelmiä käsittelevän osaprojektin loppuraportti. Projektin muut osaprojektit ovat: (a) riskianalyysi, (b) konehuoneen laitteet ja rakenteet, (c) konehuoneen materiaalit, (d) ihminen konehuoneessa sekä (e) konehuoneen korjattavuus. Projekti on toteutettu vuosina 1995 - 96. Projektin vastuullisena johtajana on ollut apulaisprofessori Pentti Häkkinen Teknillisen Korkeakoulun laivalaboratoriosta.

Projektin ovat rahoittaneet Teknologian kehittämiskeskus TEKES, merenkulkuhallitus, Silja Line, Kvaerner Masa-Yards ja ABB Industry. Projektin tukiryhmään ovat kuuluneet Jukka Kuuskoski (ABB Industry), Esa Rane (Kvaerner Masa-Yards), Reima Angerman (Konepäällystöliitto), Pertti Haatainen (Merenkulkuhallitus), Ralf Erik Lindström (Silja Line) sekä VTT:n ja Teknillisen korkeakoulun edustajia.

Maarit Tuomisaari

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ALKUSANAT	4
1 JOHDANTO	7
2 KONEHUONEEN PALOTURVALLISUUS	9
2.1 PALOTILASTOT	9
2.2 PALORISKIT	13
2.3 VAATIMUKSET	14
3 PALONILMAISUJÄRJESTELMÄT.....	17
3.1 LÄMPÖILMAISIMET	18
3.2 SAVUILMAISIMET	19
3.3 LIEKKI-ILMAISIMET.....	20
3.4 KAASUILMAISIMET	21
4 SAMMUTUSJÄRJESTELMÄT.....	23
4.1 KAASUT.....	23
4.1.1 Hiilidioksidi	23
4.1.2 Halonien korvikkeet.....	24
4.1.3 Muut kaasut.....	27
4.2 VESI JA LISÄAINEET.....	27
4.2.1 Perinteiset järjestelmät	27
4.2.2 Vesisumut.....	29
4.3 MUUT SAMMUTTEET JA MENETELMÄT	31
4.3.1 Jauheet.....	31
4.3.2 Aerosolit.....	32
5 KONEHUONEEN PALOSUOJAUS	34
5.1 PALON HAVAITSEMINEN	34
5.1.1 Havaittavia ilmiöitä.....	34
5.1.2 Lämpöilmaisimet	34
5.1.3 Savuilmaisimet.....	34
5.1.4 Liekki-ilmaisimet	35
5.1.5 Kaasuilmaisimet.....	35
5.2 SAMMUTUS	35
5.2.1 Tila- vai kohdesuojaus	36
5.2.2 Kaasut.....	36
5.2.3 Vesi ja lisäaineet	37
5.2.4 Jauheet ja aerosolit.....	38
5.3 SUOSITELTAVA ILMAISU JA SAMMUTUS KONEHUONEESSA....	38
KIRJALLISUUSVIITTEET	40

1 JOHDANTO

Laivojen konehuoneiden paloriskit ovat periaatteellisella tasolla hyvin tunnettuja ja aina lähes samanlaisia. Konehuoneissa on suuret määrät polttoöljyä, voiteluöljyä ja hydraulikkaöljyä sekä lukemattomia kuumia pintoja, joille joutuessaan öljyt voivat syttyä. Öljyvuodoista aiheutuvia paloriskejä voidaan pienentää asentamalla öljyputkiin vuotohälytysantureita, käyttämällä kaksinkertaista putkirakennetta korkeapaineisissa putkissa ja suojaamalla potentiaalisia kuumia kohtia eristein. Konehuoneen paloturvallisuutta voidaan parantaa myös rakenteellisesti tehokkaammalla osastoinnilla sekä järkevämällä putkien, kaapeleiden ja venttiilien sijoittelulla.

Konehuoneiden rakenne on kuitenkin vääjäämättä sokkeloinen, ja potentiaalisia syttymiskohtia on niin paljon, että kaikkia paloriskejä ei voida koskaan eliminoida. Onnettomuustilastoista ei löydy kahta identtistä palotapahtumaa. Ennaltaehkäisevien paloturvallisuustoimenpiteiden lisäksi on aina myös varauduttava siihen, että palo kuitenkin syttyy - etenkin, kun suuressa osassa konehuonepaloja inhimillinen virhe on ollut ratkaiseva syy palon alkamiseen. Palo on voitava paikantaa ja sammuttaa nopeasti. Mahdollisimman tehokkaan toiminnan turvaamiseksi palonilmaisua ja sammutusta on tarkasteltava yhtenä kokonaisuutena.

Tässä osaprojektissa konehuoneen palosuojausta tarkastellaan periaatteellisella tasolla. Yksittäisen konehuoneen palosuojauksen tulee perustua riittävän yksityiskohtaiseen riskianalyysiin. Konehuoneen riskianalyysi on "Paloturvallinen konehuone" -projektissa erillisenä osaprojektina.

Kansainvälisen SOLAS-sopimuksen /1/ mukaan konehuoneissa on oltava koko tilan kattava sammutusjärjestelmä, joksi voidaan hyväksyä CO₂-, kevytvaahdotaja/tai hajasuihkujärjestelmät. SOLAS-sopimuksen vuoden 1992 painos hyväksyy vielä halonijärjestelmät, jotka kuitenkin YK:n ympäristöohjelmaan liittyvän ns. Montrealin pöytäkirjan (1987) nojalla on jo osittain kielletty ja tullaan lähes kokonaan kieltämään siten, että esimerkiksi laivoissa halonien käyttö on kielletty vuoden 2000 alusta lähtien. Halonien käyttökielto johtuu niiden tuhoisista ympäristövaikutuksista: Montrealin pöytäkirjan säännöstelemistä aineista juuri halonit tuhoavat kaikkein tehokkaimmin ilmakehän otsonikerrosta.

Haloneita on pidetty lähes ideaalisina sammutteina, ja niiden käyttökiellon myötä sammutustekniikan tutkimus on nopeasti kasvanut. Täydellistä halonien *korviketta* ei vielä ole löydetty, vaikka useita korvikkeina mainostettuja aineita onkin jo kaupallisesti saatavilla. Halonien *vaihtoehdot* ovatkin erittäin varteenotettavia ehdokkaita monissa halonien käyttösovellutuksissa, kuten juuri konehuoneissa. Myös kansainvälinen merenkulkualan järjestö IMO (International Maritime Organization) hyväksyy nyttemmin SOLAS-sopimuksessa mainitsemattomia muita vesi- tai kaasupohjaisia sammutusjärjestelmiä, mikäli ne läpäisevät tietyt sammutuskokeet.

SOLAS-sopimuksen mukaan konehuoneessa on oltava myös palonilmaisujärjestelmä, jolle on annettu tiettyjä vähimmäisvaatimuksia. Konehuoneiden palonilmaisujärjestelmät ovat kuitenkin jääneet huomattavasti pienemmälle

huomiolle kuin sammutusjärjestelmät, vaikka niillä voitaisiin merkittävästi parantaa konehuoneen paloturvallisuustasoa.

Tässä julkaisussa tarkastellaan aluksi tilastojen valossa todellisia konehuonepaloja, niiden syitä sekä aktiivisten palontorjuntatoimenpiteiden riittävyttä. Seuraavaksi esitetään yleiskatsaus eri paloilmaintyyppeihin. Sammutusjärjestelmien tarkastelu on omana kokonaisuutenaan, ja lopuksi tehdään yhteenveto konehuoneeseen soveltuvista palosuojausratkaisuista.

Savunpoistoa ei tässä osaprojektissa käsitellä. Olipa konehuoneen kiinteä sammutusjärjestelmä mikä tahansa, kaikki ilmanvaihtoaukot on sammutteesta riippuen joko pakko tai suositeltavaa sulkea itse sammutuksen ajaksi. Savunpoiston aloitusajankohta ja tapa sammutuksen jälkeen riippuvat käytetystä sammutteesta ja muodostavat oman ongelmakenttänsä. Tuuletuksessa on otettava huomioon vähintäänkin uudelleensyttymisvaara ja savukaasujen myrkyllisyys.

2 KONEHUONEEN PALOTURVALLISUUS

2.1 PALOTILASTOT

Laivapaloista on tehty useitakin tilastoja. Niihin tulee kuitenkin suhtautua pienellä varauksella, koska ne perustuvat usein puutteelliseen ja jopa jossain määrin vääristeltyyn palotapahtumien raportointiin. Pienimmät palot saattavat jäädä kokonaan ilmoittamatta, koska tulipalo on varustamolle aina huonoa mainosta. Onnettomuudet voivat myös kasvattaa vakuutusmaksuja. Eri tilastoja tarkasteltaessa havaitaan kuitenkin tiettyjä selvästi yhteisiä tekijöitä, vaikka raportointitavat ovatkin kovin epäyhtenäiset ja usein ylimalkaiset.

Japanissa on analysoitu 73 NK-luokitettua laivan konehuonepalot vuosilta 1980 - 1992 /2/. 74 % (50/68) paloista tapahtui navigoinnin aikana, ja 52 % (26/50) näistä laivoista menetti ohjattavuutensa. 57 % (40/70) paloista aiheutui öljyvuoodoista, ja monen vuodon syynä oli inhimillinen virhe. Vuotanut öljy oli yleensä polttoöljyä (30/40) mutta muutamissa tapauksissa myös voiteluöljyä (8/40) tai jäteöljyä (2/40).

Palontorjuntaan liittyviä tietoja oli annettu 64 palosta (taulukko 1). Öljypalojen sammutukseen käytettiin yleensä kiinteää CO₂-järjestelmää tai merivettä (haja-suihkujärjestelmä tai palopostit), koska palot levisivät laajalle. Sähkölaitteiden palossa käsisammuttimet olivat useimmiten riittävät, koska palo oli paikallisesti hyvin rajoittunut. Nämä palot saatiin myös sammumaan nopeasti: niistä kahdeksasta palosta, jotka sammutettiin 15 minuutin kuluessa, seitsemän sammui käsisammuttimin.

Taulukko 1. Konehuonepalon sammutus NK-luokitetuissa laivoissa /2/.

Palon havaitseminen (64 paloa)		Sammutus (60 paloa)		Sammutusaika (47 paloa)	
Tapa	% (kpl)	Tapa	% (kpl)	Aika	% (kpl)
Miehistön havainnot	81 (52)	Käsisammuttimet	40 (24)	< 30 min	40 (19)
- savu ja liekit	(51)	(CO ₂ , vaahto, jauhe)		0,5 - 1 h	11 (5)
- ääni	(1)	CO ₂	18 (11)	1 - 2 h	17 (8)
Automaattinen ilmaisu	19 (12)	Merivesi	20 (12)	2 - 5 h	15 (7)
		Vaahto	2 (1)	Yli 5 h	17 (8)
		Ulkopuolinen apu	5 (3)		
		Itsesammuminen	15 (9)		

Halonijärjestelmiä ei tilastossa ole ollenkaan, vaikka niitä on asennettu tankkereihin ja matkustajaläivöihin jo 1970-luvulta lähtien. Jotkut maat ja/tai luokituslaitokset eivät ilmeisesti ole missään vaiheessa hyväksyneet haloneja konehuoneisiin – siitä lienee tässäkin tilastossa kysymys. Suomen merenkulkuhallitus ei osannut antaa tarkempaa tietoa asiasta.

IMOlle on tehty yhteenveto kaikista sille vuosina 1982 - 1990 raportoiduista laivapaloista /3/. Konehuonepaloja oli raportoitu 36, joista osa sisältyy myös edellä mainittuun japanilaistutkimukseen. Polttoöljy oli pääasiallinen syttymislähde 47 %:ssa (17/36) tapauksia, ja 42 %:ssa (15/36) tapauksia syttymisen aiheutti kuuma pakoputki: 28 %:ssa (10/36) palo syttyi nimenomaan polttoöljyn valuttua tai suihkuttua pakoputkelle.

Palontorjuntatoimenpiteitä ei tilastossa arvioitu konehuoneille erikseen. 53 %:ssa (49/115) kaikista palotapahtumista sammutustoimenpiteiden katsottiin olleen riittävät ja 9 %:ssa (8/115) täysin riittämättömät. Yhdessä tapauksessa hätäpalo-pumppu ei toiminut, kahdessa tapauksessa pumppuille ei saatu tehoa. Kaikkiaan neljässä kone- tai pumppuhuoneessa oli halonijärjestelmä, mutta järjestelmän käytöstä ei ole annettu erikseen tietoa.

Yksityiskohtaisin konehuonepalojen analyysi on tehty viitteessä 4. Tavoitteena oli arvioida kiinteän CO₂-järjestelmän tehokkuutta, joten kaikissa analysoiduissa tapauksissa oli joko käytetty tai mahdollisuus käyttää CO₂-järjestelmää. Viitteestä ei selviä, mistä tiedot on koottu tai mille vuosille onnettomuudet ajoittuvat. Palojen syttymissytyt jaettiin taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Syttymissytyä konehuonepaloissa.

Ensisijainen syttymissyty		Osuus (41 paloa)
polttoöljy	matalapaine	15 % (6)
	keskipaine	12 % (5)
	korkeapaine	29 % (12)
	ylivuoto	10 % (4) (Yhteensä 66 %)
voiteluöljy	keskipaine	12 % (5)
	korkeapaine	5 % (2)
	ylivuoto	2 % (1) (Yhteensä 19 %)
hydrauliikkaöljy		5 % (2)
raakaöljy		2 % (1)
sähköinen		5 % (2)
muu		2 % (1)

Sammutustiedot on koottu taulukkoon 3. Tapauksista, joissa CO₂-järjestelmä onnistuneesti laukaistiin, vain 3 % laukaistiin 10 minuutin kuluessa palon alusta ja 12 % laukaistiin vasta yli tunnin kuluttua. Loput laukaisut tapahtuivat 10 - 30 minuutin kuluessa, jos oletetaan, että myös ne tapaukset, joissa laukaisuajaksi on ilmoitettu "prompt", kuuluvat tähän ryhmään.

Taulukko 3. Tulipalojen ensisijainen sammutus konehuoneissa, joissa on CO₂-järjestelmä.

Sammutusmenetelmä	Tilanne,lopputulos	Osuus (39 paloa)
CO ₂	Palo sammui	36 % (14)
	Palo saatiin hallintaan	21 % (8)
	Jouduttiin lisäämään CO ₂ :ta	5 % (2) Onnistui 62 %
	Järjestelmä epäkunnossa	8 % (3)
	Ohjaus saavuttamattomissa	3 % (1)
	Käyttöongelma	3 % (1) Epäonnistui 13 %
Muu	Palosammui tai saatiin hallintaan	23 % (9)
	Palo levisi	3 % (1)

Tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin inhimillisen tekijän osuutta laivapalojen syttymiseen /5/, todetaan, että 70 - 80 % paloista aiheutuu inhimillisestä tekijästä, yleensä jonkinasteisesta huolimattomuudesta. Myös sammutustoimenpiteiden tehokkuus riippuu miehistöstä.

Tämän tutkimuksen yhteydessä analysoitiin 53 palotapahtumaa, joihin sisältyivät ne IMOlle luovutetut onnettomuusraportit, joista löytyi kopio Suomen merenkulkuhallituksesta. Osa analysoiduista palotapahtumista sisältynee myös edellä käsiteltyihin yhteenvetoihin.

Primääriseksi syttymissyiksi oli ilmoitettu useimmiten kuuma pakoputki tai höyrylinja (24/42). Seuraavaksi suurin yksittäinen ryhmä olivat sähköiset syyt (6/42). Polttoöljy oli pääasiallinen palava aine (16/39). Muita palavia nesteitä oli seitsemässä tapauksessa ja lopuissa ilmoitetuissa tapauksissa paloivat pääasiassa rakenteet ja sisusteet (16/39).

Suurimmassa osassa konehuoneita oli kiinteä CO₂-järjestelmä (34/53), vain viidessä konehuoneessa oli vaahtojärjestelmä ja yhdessä halonijärjestelmä. Palo- ja päävesilinjat oli asennettuna 24 konehuoneeseen, ja 26 konehuoneessa oli lisäksi käsiammuttimia.

Ylivoimaisesti suurimmassa osassa tapauksia (31/47) konehuoneessa ei ollut automaattista palonilmaisujärjestelmää, joten miehistö havaitsi palon ennemmin tai myöhemmin. Niissä konehuoneissa, joissa oli automaattinen palonilmaisujärjestelmä (16/47), miehistö havaitsi palon ennen hälytystä 10 tapauksessa, ja kuudessa tapauksessa palosta saatiin tieto automaattisen ilmaisun välityksellä.

Palokalusto arvioitiin yleensä riittäväksi (35/50). Neljässä tapauksessa kalusto oli selvästi riittämätön, ja kuudessa tapauksessa kalustoa ei osattu käyttää tehokkaasti. Ulkopuolista apua saatiin 11 tapauksessa, ja kaksi laivaa jouduttiin evakuoimaan palon päästyä ryöstäytymään käsistä.

Vaikka kaikissa yhteenvedoissa tietyt palotyypit olivat selvästi yleisimpiä, kaikki palot olivat kuitenkin erilaisia niin syttymiskohdan, syyn, ajankohdan kuin valvonnankin suhteen. Palonilmaisujärjestelmiä oli konehuoneisiin asennettu erittäin vähän, ja käytössä olevat todennäköisesti täyttivät vain vähimmäisvaatimukset.

Sammutusjärjestelmiä ja -toimenpiteitä ei ole juurikaan analysoitu. Mistään tilastosta ei myöskään löytynyt tietoja halonilaitteistojen toiminnasta todellisissa palotilanteissa. Yksittäisiä esimerkkejä tosin löytyy sekä onnistuneista että epäonnistuneista halonisammutuksista. Epäonnistumisen syyt ovat samat kuin muillakin kaasujärjestelmillä, nimittäin liian myöhäinen laukaisu tai ilmanvaihtoaukkojen aukijääminen.

Palokaluston arvioiminen "riittäväksi" suurimmassa osassa raportoituja tapauksia herättää epäilyksiä: esimerkiksi niistä NK-luokitetuista laivoista, joissa sattui kone-huonepalo /2/, 46 % (26/57) vaati yli kuukauden korjausajan, 18 % (10/57) yli 2 kk ja 5 % (3/57) yli puoli vuotta. Onnettomuuksien yhteenvedossa sama asia esitetään positiivisemmin: "Melkein kaikki palotuhot saatiin korjatuksi 1 - 3 viikossa, oleellisesti kaikki loput 5 - 9 viikossa... Yli puolet palotuhouista saatiin korjatuksi koneistoa vaihtamatta tai vaihtamalla se nopeasti." Tulkittiinpa tilastoja millä sävyllä tahansa, voidaan kuitenkin todeta, että sammutustehokkuutta olisi ollut vielä varaa parantaa selvästi.

Viitteessä 4 luetellaan käytännön toimenpiteitä, joilla analysoiduissa konehuonepaloissa ihmishenkien menetystä olisi voitu välttää ja omaisuutta paremmin suojata. Näitä itsestään selviltä tuntuvia toimenpiteitä ovat viitteen mukaan mm. seuraavat:

- Palo-ovet on pidettävä aina kiinni.
- Konehuoneessa oltava vähintään kaksi pakoreittiä, jotka ovat selvästi toisistaan erillään.
- Hengityssuojaimia on oltava riittävästi ja helposti saatavilla.
- Ohjaushuoneesta on oltava suora näköyhteys konehuoneeseen.
- Palopumppujen on sijaittava täysin erillään suojattavasta tilasta.
- Kaapelien, ohjaustilojen ym. kriittisten laitteiden sijainti on suunniteltava huolella.
- Miehistön on oltava hyvin koulutettu.

Luetteloon ei sisällynyt mitään parannusehdotuksia tai korjaavia toimenpiteitä palonilmaisu- tai sammutusvälineistölle. Paloa ennaltaehkäisevät keinot liittyvät konehuoneen huoltamiseen ja ylläpitoon /5/:

- Konehuone tulee pitää puhtaana pilssit mukaan luettuna.
- Kuumat pinnat tulee mahdollisuuksien mukaan eristää.
- Vähäpätöisiltäkin näytävät öljyvuodot tulee välittömästi korjata.
- Sammutus- ja palonilmaisujärjestelmiä tulee ylläpitää ja huoltaa asianmukaisesti.

Kaikki edellä mainittu on periaatteessa sisäistetty, mutta käytäntö kuitenkin osoittaa, että inhimillinen huolimattomuus on yksi tärkeimmistä syistä palon syttymiseen. Siksi tulipaloon on aina varauduttava. Miehistön koulutus on tässä suhteessa ensiarvoisen tärkeää: tarvitaan toimintasuunnitelma palotilanteen varalta, ja täysimittaisia harjoituksia tulisi tehdä eri vuorokaudenaikoina. Kuitenkin käsitys, että "sammutusvälineistö voi olla vain juuri niin hyvä kuin sen käyttäjät", on nykytekniikalla jo vanhentunut, sillä automaattisella valvonnalla (palonilmaisu ja sammutusjärjestelmän automaattilaukaisu) voidaan tehokkaasti minimoida inhimillisten virheiden vaikutusta. Miehistön taidot korostuvat palon varhaisessa vaiheessa: tilastot osoittavat, että käsiammuttimen välitön ja osaava käyttö on kaikkein tehokkain tapa tietyissä palotilanteissa katkaista palon leviäminen jo alkuunsa (esim. sähkölaitteiden palot). Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kuitenkin vain konehuoneen automaattista valvontaa ja kiinteitä sammutuslaitteistoja.

2.2 PALORISKIT

Ylivoimaisesti yleisin konehuonepalon syttymissy on öljyvuoto kuumille pinnoille (ks. taulukko 2). Potentiaalisia öljyvuotokohtia on lukemattomia. Öljyt ovat olennainen vaaratekijä syttymisvaiheessa, koska ne syttyvät muita aineita herkemmin ja nopeasti palavana levittävät paloa. Palamiskaasut ovat lähes pelkästään CO₂:ta ja vesihöyryä.

Vaikka kuumien pintojen määrää on jatkuvasti yritetty minimoida erilaisin eristein ja jäähdytysmenetelmin, todellisissa konehuoneissa on matkan aikana mitattu useassa kohdassa jopa 460 °C:n lämpötiloja /6/. IMOssa tultaneen vaatimaan, että vapaiden pintojen lämpötila ei saa olla korkeampi kuin 220 °C. Käytännössä lienee kuitenkin mahdotonta tarkastaa jokaista putkea ja liitosta.

Polttoöljyt vaihtelevat korkeaviskositettisistä raskasöljyistä dieselöljyihin. Raskasöljy on yleensä lämmitettävä 130 °C:n lämpötilaan, jotta se olisi riittävän juoksevaa, ja kaasuuntumisen estämiseksi putkisto on paineistettava. Paineistetusta putkesta suihkuava kuumennettu öljy on helposti syttyvää. Öljysuihku voi syttyä, jos se iskeytyy pintaan, jonka lämpötila on 300 °C /6/, ja spraypalo voi jatkua stabiilina, jos pinnan lämpötila on yli 350 °C. Raskasöljyillä syttymislämpötilat vaihtelevat tosin suuresti ja ovat 200 - 600 °C.

Suihkuava öljyvuoto muodostaa aina palovaaran, vaikkei se suoraan iskeytyisikään kuumaan pintaan. Kaikkialle leviävä öljysumu voi ennen pitkää kuitenkin saavuttaa kuuman pinnan ja syttyä.

Huoneenlämpötilassa olevan dieselöljyn palo-ominaisuuksien on todettu vastaavan kuuman raskasöljyn palo-ominaisuuksia. Korkean leimahduslämpötilan takia raskasöljy on kuitenkin helpompi sammuttaa jäähdyttämällä kuin dieselöljy, jonka leimahduslämpötila on vain n. 60 °C.

Konehuoneen öljyjärjestelmät jaetaan viitteessä 6 karkeasti kolmeen pääluokkaan:

- polttoöljy, matalapaine (1 kg/s, 6 bar)
- polttoöljy, korkeapaine (0,1 kg/s, 400 - 600 bar, lämpötila voi olla 130 °C)
- voiteluöljy (0,2 kg/s)

Käytännössä järjestelmät ovat kuitenkin hyvin erilaisia, jolloin paineet, virtaukset ja lämpötilat voivat poiketa suuresti yllä mainituista arvoista. Esimerkiksi sylinterikohtaisessa korkeapaineputkessa paine voi olla jopa 1 500 bar. Voiteluöljyä voidaan siirtää niinkin suurella nopeudella kuin 40 kg/s, ja polttoöljyn lämpötila putkistossa voi nousta yli 150 °C:n.

Öljyjen lisäksi konehuoneissa on sähkökaapeleita ja -laitteita, putkieristeitä, pinnoitteita ja muita satunnaisia palokuormia. Lattian ja seinien pinnoitteet eivät ole helposti syttyviä eivätkä paloa levittäviä. Putkieristeinä yleisesti käytetty mineraalivilla ja villan sideaine eivät syty helposti. Kaikki muut palokuormat ovat toissijaisia.

Paloturvallinen konehuone -projetin erillisessä riskianalyysiosassa tarkastellaan konehuoneen paloturvallisuuden kannalta kriittisiä kohtia ja toimintoja yksityiskohtaisemmin.

2.3 VAATIMUKSET

Konehuoneiden sammutus- ja ilmanvaihtojärjestelmiä koskevat vähimmäisvaatimukset on kirjattu kansainväliseen SOLAS-sopimukseen /7/. Vaatimukset ovat lähinnä periaatteellisia; yksityiskohtaiset komponentteja ja toimintaa koskevat vaatimukset on esitetty erilaisissa IMO:n omissa päätöslauselmissa sekä kansallisissa ja kansainvälisissä standardeissa. Lippuvaltio useimmiten päättää, mitkä vaatimukset tulee täyttää ("... shall be provided with spraying nozzles of an approved type. The number and arrangement of the nozzles shall be to the satisfaction of the Administration...").

SOLAS-sopimuksen mukaan konehuoneen tilasuojuuksena tulee olla joku seuraavista kiinteistä sammutusjärjestelmistä (sääntö II-2/7):

- kaasujärjestelmä
- kevytvaahtojärjestelmä
- hajasuihkujärjestelmä.

Kaasujärjestelmiksi vuonna 1992 täydennetyssä ja korjatussa SOLAS -sopimuksessa hyväksytään CO₂- ja halonijärjestelmät (säntö II-2/5), joista kuitenkin jälkimmäisten asennus kiellettiin 1.10.1994 lähtien. Muut kaasut hyväksytään, mikäli niillä on *vastaava sammutustehokkuus* kuin hiilidioksidilla. Hiilidioksidin tulee – tapauksesta riippuen – täyttää 30 - 40 % konehuoneen tilavuudesta siten, että ensimmäisen kahden minuutin aikana kaasun kokonaismäärästä purkautuu 85 %.

Kevytvaahtojärjestelmän on oltava sellainen, että suojattava tila täyttyy vähintään nopeudella 1 m/min (säntö II-2/9). Poikkeukset sallitaan, mikäli *suojaustaso pysyy samana*.

Hajasuihkujärjestelmä tulee mitoittaa niin, että vesivuo on vähintään 5 l/min/m² (säntö II-2/10).

Raskasvaahtojärjestelmä (säntö II-2/8) voidaan asentaa vain yllä mainittujen vaihtoehtojen lisäksi. Vaahtoa tulee muodostua 150 mm kerros ensimmäisen 5 minuutin aikana.

Ilmaisintyyppejä ja palonilmaisun periaatteita koskevat vaatimukset ovat hyvin ylimalkaisia (säntö II-2/13). Ilmaisuu saa perustua lämmön, savun, muiden palamistuotteiden tai liekin ilmaisuun. Ainoana rajoituksena on, että liekki-ilmaisimia voidaan käyttää vain täydentämässä lämpö- tai savuilmajärjestelmää. Muunkin tyyppisiä ilmaisimia voidaan käyttää, jos taataan *vastaava* herkkyys.

Yhden lämpöilmaisimen kattama maksimipinta-ala on 37 m² ja savuilmajaisimen 74 m². Savuilmajaisimen hälytysrajoille on annettu tietyt vähimmäisvaatimukset samoin kuin lämpöilmaisimen toimintalämpötiloillekin. Omat määräykset on nyttemmin sisällytetty myös näytteenottoilmaisimille (säntö II/2-13.1).

Varsinaisia testimenetelmiä yllä mainittujen sammutus- ja palonilmaisujärjestelmien testaamiseksi ei IMOlla ole, ja käytännössä niihin sovelletaankin kansallisia ja kansainvälisiä standardeja (esim. ISO, CEN, UL). Melkein kaikille järjestelmille sallitaan myös nimeltä mainitsemattomia vaihtoehtoja, mikäli niiden toiminta on *vastaava* kuin SOLAS-sopimuksessa määritellyllä järjestelmällä.

Käytännössä vastaavuuden osoittaminen on erittäin hankalaa, ja siksi IMO on kehittänyt omat palokoemenetelmänsä vaihtoehtoisten sammutusjärjestelmien testaamiseksi. Veteen perustuville uusille sammutusjärjestelmille, joita ovat erilaiset vesisumu- ja kevytvaahtojärjestelmät, on olemassa menetelmät sekä komponenttitestaukselle että sammutustehokkuuden testaukselle /8, 9/. Sammutuskokeilla etsitään *tilasuojaukseen* soveltuvaa, kaasuja korvaavaa järjestelmää, jossa kaikki suuttimet on asetettava vähintään 5 m:n korkeuteen eikä minkäänlaista kohdesuojausta sallita. Pilssipaloja ei kuitenkaan tarvitse sammuttaa kattoon asennetuilla suuttimilla, mikäli testattavaan järjestelmään aiotaan todellisuudessa liittää erillinen pilssisuojausjärjestelmä. (Konehuoneen kohdesammutusta tullaan käsittelemään IMOssa myöhemmin.)

Palokokeet ovat äärimmäisen vaativat. Ne on tehtävä joko täysin avoimessa (konehuoneluokka 3, >3 000 m³) tai osittain suljetussa (luokat 2, ≤3 000 m³, ja 1, ≤500 m³) tilassa. SOLAS-sopimuksessa hyväksytyillä kevytvaahto- ja haja-

suihkujärjestelmillä ei olisi juuri minkäänlaista vaikutusta testipaloihin. Kaasujärjestelmät eivät myöskään voi läpäistä kokeita, koska koetila ei ole suljettu. Palokokeita on yhteensä 13, ja ne sisältävät avoimia ja piilossa olevia, erillisiä ja yhdistettyjä allas- ja spraypaloja, joissa palavana nesteenä on heptaani, dieselöljy ja voiteluöljy.

IMOn testimenetelmä on vielä aivan uusi: menetelmään liittyvät palokokeet viimeisteltiin IMOn palosuojelualakomitean 40. kokouksessa vuoden 1995 heinäkuussa. Jotkut laitevalmistajat ovat jo läpäisseet testit joko erilaisin, lähinnä suojattavan tilan kokoon liittyvin rajoituksin tai – valmistajan mukaan – rajoituksitta. Kokeita tehdään jatkuvasti, joten mahdollisesti lähiaikoina myös lisää tuloksia on saatavilla.

Vaihtoehtoisia kaasujärjestelmiä varten on IMOssa kehitetty veteen perustuvien järjestelmien palokokeita vastaavat testit /10/. Testit ovat sikäli helpommat, että ne tehdään täysin suljetussa 500 m³:n tilassa. Koska kaasun leviäminen ei ole erityisen herkästi esteistä riippuvainen, tarvittavat kaasumäärät muihin tilakokoihin ekstrapoloidaan koetulosten perusteella. Palokoemenetelmiltä puuttuu enää vain IMOn muodollinen hyväksyntä.

3 PALONILMAISUJÄRJESTELMÄT

Paloilmaisimet jaetaan perinteisesti kolmeen pääryhmään niiden havaitseman fyysikaalisen suureen tai ilmiön perusteella /11/: ne voivat reagoida lämpöön, savuun tai liekin emittoimaan sähkömagneettiseen säteilyyn. Uudempi ilmaisintyyppi havaitsee palossa kehittyviä kaasuja. Palonilmaisuun liittyvä tutkimus- ja kehitystyö on viime vuosina keskittynyt signaalinkäsittelyyn ja palon analysointiin, itse ilmaisun perusteet ja ilmaisintyytit ovat pysyneet lähes samoina. Tutkimuksen tavoitteena on ollut erheellisten ilmoitusten määrän minimoiminen ilmaisuherkkyyttä heikentämättä, ja järjestelmien erottelukykä onkin parannettu jatkuvasti monisensori- ja monikriteeritekniikoiden tultua käyttöön.

Markkinoilla on jo sovellutuksia, jotka perustuvat analogisiin, osoitteellisiin palo-ilmaisimiin, joista kukin sisältää eri suureita mittaavat anturit. Antureiden mitta-arvot analysoidaan ilmoitinkeskustietokoneen paloanalyysiohjelmistolla (kesküsälyyn perustuvat järjestelmät). Eräissä sovellutuksissa paloanalyysi suoritetaan kussakin ilmaisimessa sisäisellä signaalinkäsittelytietokoneella (hajautetut järjestelmät). Paloanalyysiohjelmisto ottaa huomioon paitsi sekä signaalin absoluuttisen arvon että myös sen kehityshistorian.

Tulevaisuudessa palonilmaisujärjestelmän äly siirtynee yhä enemmän ilmoitinkeskukseen, mutta ilmaisu perustuu edelleen perinteisiin palon tunnussuureisiin. Ilmaisintyytit voidaan jaotella taulukon 4 mukaisesti, ja kutakin tyyppiä tarkastellaan jäljempänä lyhyesti.

Taulukko 4. Paloilmaisintyytit.

Lämpöilmaisimet /12, 13/	Pisteilmaisimet	Maksimaali-ilmaisimet Differentiaali-ilmaisimet
	Linjailmaisimet	Integroivat ilmaisimet ei-integroivat ilmaisimet
Savuilmaisimet /14/	Pisteilmaisimet	Ioni-ilmaisimet Optiset ilmaisimet
	Linjailmaisimet	Optiset ilmaisimet
	Näytteenottoilmaisimet	Ioni-ilmaisimet Optiset ilmaisimet
Liekki-ilmaisimet /15, 16/	UV-ilmaisimet	
	IR-ilmaisimet	
Kaasuilmaisimet /17/	Pisteilmaisimet	Puolijohdeilmaisimet Katalyyttiset ilmaisimet
	Näytteenottoilmaisimet	Puolijohdeilmaisimet Katalyyttiset ilmaisimet

3.1 LÄMPÖILMAISIMET

Yläraja- eli maksimaali-ilmaisimien (M-ilmaisimien) antaa ilmoituksen, kun ilmaisimen anturi on saavuttanut tietyn, ns. toimintalämpötilan. Tyypillisessä M-ilmaisimessa käytetään anturina koveraa bimetallinappia, joka tietyssä lämpötilassa käännähtää kuperaksi ja sulkee ilmoituksen laukaisevan kytkimen. Ilmaisimen perustoiminta on täysin mekaaninen.

Differentiaali-ilmaisimien (D-ilmaisimien) antaa ilmoituksen, kun lämpötilan nousunopeus on riittävän suuri. Ilmaisimien koostuu kahdesta painekammioista, joissa paine kasvaa lämpötilan noustessa. Kattoon sijoitetussa ilmaisimessa alempi kammiolämpenee ylempää nopeammin, joten niiden välille syntyy paine-ero. Jos lämpötila muuttuu riittävän hitaasti, ehtii paine-ero tasaantua pienen venttiilin kautta. Tulipalossa lämpötila nousee kuitenkin yleensä niin nopeasti, että paine-ero ei tasoitu, vaan kammioiden välisessä kalvossa oleva ilmaisukytkin sulkeutuu.

Yhdistelmäilmaisimet (DM-ilmaisimien) voivat olla ns. kompensatioilmaisimia, jotka ilmoittavat aina samassa lämpötilassa lämpötilan nousunopeudesta riippumatta. Lämpöilmaisimien voidaan rakentaa myös täysin elektroniseksi, jolloin painekammiot korvataan esimerkiksi kahdella NTC-polymeerivastuksella, joiden resistanssi pienenee voimakkaasti lämpötilan kasvaessa. Toinen vastuksista on hyvässä termisessä kontaktissa ulkoilman kanssa ja toinen suojassa ilmaisimen kuoren sisällä. Vastusten välisestä resistanssierosta saadaan lämpötilan nousunopeus eli D-toiminta ja ulkoilmassa olevan vastuksen resistanssista M-toiminta.

Pisteilmaisintyyppinen lämpöilmaisimien ilmoittaa yleensä vasta, kun palo on liekehtivää ja kehittää runsaasti lämpöä.

Integroivat linjailmaisimet ovat yleisimmin analogisia ilmaisinkaapeleita, jotka summaavat lämpötilavasteen tavalla tai toisella koko kaapelin matkalta. Samanlainen ilmaisu voidaan siten saada paikallisesta kuumasta pisteestä tai koko kaapelin tasaisesta lämpenemisestä, ja hälytyskohtaa voi olla vaikea paikantaa. Hälytysrajat ovat vapaasti säädettävissä, mutta niitä valittaessa tulee tuntee hyvin ympäristön lämpötilaolosuhteet.

Yleisin lämpöilmaisinkaapelityyppi on koaksiaalikaapeli, jossa mitataan johdinten välikerroksen vastusta. Ilmaisimien voi olla myös pitkä, ohut metalliputki, jolloin toimintaperiaate on pneumaattinen: lämpötilan muutokset havaitaan paineen muutoksina. Uusimmissa analogiailmaisimissa käytetään hyväksi kuituoptiikkaa ja valon taipumista kuiduissa lämpötilan vaikutuksesta /18/. Tällaisten kaapelien pituus voi olla kilometrejä, ja niillä voidaan havaita jo muutaman lämpöasteen nousu metrien suuruusluokkaa olevalla paikkaresoluutiolla.

Ei-integroiva linjailmaisimien on digitaalinen: se reagoi joka kohdassaan tiettyyn kynnyslämpötilaan. Ilmaisinkaapelissa on johdinten välissä polymeeri, joka sulaa ko. polymeerille ominaisessa lämpötilassa.

Lämpöilmaisinkaapeli voi ilmoittaa jo kohteen ylikuumenemis- tai kytemisvaiheessa.

3.2 SAVUILMAISIMET

Savun hiukkastiheys ja hiukkasten kokojakautuma riippuvat olennaisesti palavasta materiaalista ja palon luonteesta. Kytevässä palossa on palokaasujen joukossa nestemäisiä pyrolyysituotteita, joiden hiukkaskoko on suuri, noin 0,1 μm . Savu on vaaleaa, koska valo heijastuu hyvin suurista savuhiukkasista. Liekehtivässä, suhteellisen täydellisessä palamisessa hiukkaskoko on pienimmillään, suuruusluokkaa 0,01 μm . Savu on tummaa, lähes läpinäkymätöntä, sillä valon aallonpituutta pienemmät hiukkaset eivät voi heijastaa valoa. Eri ilmaisintyyppit ovat herkimmillään erikokoisille hiukkasille.

Ioni-ilmaisimen toiminta perustuu savuhiukkasista aiheutuvaan ionisaatiovirran muutokseen. Ilmaisimessa on yleensä kaksi ionisaatiokammiota, joista toinen on savulle avoin mittauskammio ja toinen suljetumpi vertailukammio. Kammioissa on elektrodit, joiden välissä olevan ilman molekyylejä ionisoidaan yleensä alfa-hiukkasilla. Puhtaassa ilmassa elektrodien välillä kulkee ns. lepovirta. Kun levyjen väliseen tilaan joutuu savuhiukkasia, tarttuu osa varauksenkuljettajista niihin, jolloin virta pienenee ja seuraa ilmoitus.

Optisten savuilmaisimien toiminta perustuu valon heijastumiseen ja absorptioon savussa. Mitä suurempia hiukkaset ja hiukkastiheys ovat, sitä vähemmän valoa pääsee mittausvälin läpi. Optiset ilmaisimet jaetaan kahteen pääryhmään: (i) vaimennuseriaatteella toimiviin ilmaisimiin, jotka mittaavat valon intensiteetin pienenemistä savussa, ja (ii) hajavaloilmaisimiin, jotka mittaavat savuhiukkasten sirottaman valon intensiteettiä.

Vaimennus- eli läpivaloilmaisimen mittauskammiossa on valolähde, josta johdetaan valoa suoraan valoherkkään detektoriin. Savun joutuessa ilmaisimeen pienee läpi päässeän valon intensiteetti. Kun tietty intensiteettiraja alitetaan, saadaan ilmaisu. Ilmaisimien toimii yleensä infrapuna-alueella.

Hajavaloilmaisimen mittauskammiossa on valolähde ja valon este, joka estää suoran valon pääsemisen valoherkkään detektoriin. Normaalitilassa, ilman savua, valo ei pääse detektorille. Kun kammioon tulee savua, heijastuu valoa kaikkiin suuntiin. Osa tästä heijastuneesta valosta tulee myös detektorille, joka antaa siitä ilmoituksen.

Savun havaitsemiseen käytetyt *linjailmaisimet* ovat vaimennuseriaatteella toimivia. Ilmaisimien koostuu valolähtimestä, vastaanottimesta ja mahdollisesti heijastimista, joiden välillä on oltava esteetön näkyvyys. Havaintoväli voi olla 10 - 100 m, joten muutamalla ilmaisimella on mahdollista kattaa suuriakin alueita.

Kaikki savuilmaisimet reagoivat varhaisemmassa palon vaiheessa kuin piste-ilmaisintyyppiset lämpöilmaisimet. Ioni-ilmaisimet ovat yleensä herkimmillään, kun hiukkaskoko on pieni, optiset ilmaisimet puolestaan, kun hiukkaskoko on suuri.

Erityisilmaisimena voidaan mainita ns. *valonsädeilmaisin*, jota käytetään havaitsemaan paloja, joissa ei synny ollenkaan savuhiukkasia. Tällaisia ovat puhtaan

alkoholin palot. Valolähteenä käytetään laservaloa, ja havaittavana ilmiönä on valon taipuminen kuumissa höyryissä – eli kyseessä on itse asiassa lämpöilmaisimien.

Näytteenottoilmaisimet /19, 20/ koostuvat näytteen keräävästä imurista, keräilyputkistosta sekä ilmaisinyksiköstä. Savunilmaisuuksiin perustuvat näytteenottoilmaisimet poikkeavat toisistaan lähinnä vain ilmaisinyksikön osalta. Yksi ilmaisinyksikkö näytteenkeräilyputkistoon voi vastata kymmeniä pisteilmaisimia.

Keräilyputkisto on suojattavassa tilassa, ja sen pituus voi olla jopa satoja metrejä yhtä ilmaisinyksikköä kohden. Putkisto voi olla ohutta taipuisaa muovia tai metalliputkea, jossa on tasaisin välein halkaisijaltaan 3 - 5 mm:n reikiä. Putkisto on helppo asentaa mihin tahansa tiloihin, ja se on myös helposti muunneltavissa. Itse ilmaisinyksikön ei tarvitse olla putkiston kanssa samassa tilassa.

Savunilmaisuuksiin perustuvat näytteenottoilmaisimet havaitsevat joko liekehtien tai kyttien alkavan palon jo erittäin varhaisessa vaiheessa.

Australiassa kehitetyn VESDAn (Very Early Smoke Detection Apparatus) ilmaisinyksikkö on periaatteeltaan hajavaloilmaisimien. Ilmaisintilavuus on suuri, ja valolähteenä on voimakas Xe-lamppu, joka välähtää salamavalon tavoin. Ilmaisimelle valitaan tyypillisesti kolme eri herkkyysaluetta ja sen myötä kolme eri hälytystasoa, esivaroitus, paikallishälytys ja palohälytys. Hälytystasojen lukumäärä on vapaasti valittavissa.

Britanniassa kehitetyssä STAMP-järjestelmässä ilmaisimena on erittäin herkkä ionisaatiokammio. Suurempi herkkyys on saavutettu sillä, että ionisoiva lähde ja havaintoalue ovat eri tiloissa. Kaasunäyte viipyy kauemmin kammion rekombinaatioalueella, jolloin ionivirta pienenee selvemmin.

Yhdysvalloissa kehitetyssä alkavan palon ilmaisimessa (IFD, Incipient Fire Detector /21/) on ilmaisinyksikkönä ns. Wilsonin sumukammio. Kaasunäyte imeytyy sumukammioon kostuttimen läpi, jolloin näytteen suhteellinen kosteus kohoaa lähelle 100 %:a. Kammion paine pudotetaan hetkellisesti niin alas, että vesi kondensoituu näytteessä olevien hiukkasten pinnalle. Hiukkaskoko kasvaa silloin silminnähäväksi, ja näytteen optinen tiheys voidaan määrittää tavanomaisella foto-detektorilla. Ilmaisimien on erityisen herkkä liekehtivälle palolle.

Edellä mainitut näytteenottoilmaisimet ovat vain esimerkkejä monien valmistajien eri toimintaperiaatteisiin perustuvista ilmaisimista.

3.3 LIEKKI-ILMAISIMET

Pienen liekin emittoima säteily on peräisin ionien ja atomien viritystilojen laukeamisesta. Suurissa, läpimitaltaan yli 0,3 m:n liekeissä säteily on pääasiassa nokihiukkasten emittoimaa lämpösäteilyä, mutta liekin spektrissä esiintyy kuitenkin aina myös palavalle aineelle ominaisia emissiopeikkejä, joita voidaan käyttää liekehtivän palon tunnistamiseen.

Pääasialliset liekin ilmaisuun käytettävät emissioviivat ovat infrapuna-alueella (IR) esiintyvät CO₂:n 4,3 µm ja OH:n 2,7 µm sekä ultraviolettialueella (UV) esiintyvä OH:n viiva n. 300 nm:n kohdalla. Nämä viivat esiintyvät lähes kaikissa liekkipaloissa. Liekki-ilmaisimien toimintaperiaatteena on havaita tällainen UV- tai IR-säteily sekoittamatta sitä kuitenkaan ympäristön taustasäteilyyn.

UV-ilmaisimena on usein Geiger-Müller-putki, jonka toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Tyypillisesti UV-ilmaisimella voidaan havaita esim 30 × 30 cm²:n suuruinen allaspalo 10 m:n etäisyydeltä, mutta herkkyys pienenee ratkaisevasti, mikäli savu vaimentaa liekin lähettämää säteilyä. Samoin esimerkiksi silmälle näkymätön voiteluöljykerros voi absorboida UV-säteilyä jopa 80 %, minkä takia ilmaisinta ei voida suositella esimerkiksi juuri konehuoneisiin.

IR-ilmaisimia on sekä yksi- että kaksikanavaisina versioina. Kaksikanavainen ilmaisim voi olla esimerkiksi sellainen, että se havaitsee säteilyn alueilla 4,45 µm ja 3,9 µm. Liekin emittoimassa säteilyssä ensimmäisen kanavan intensiteetti on suurempi, taustasäteilyssä toiseen kanavaan tulee enemmän säteilyä. Näin ilmaisimen virhetoimintaa voidaan vähentää. Tosin käytössä on nykyään myös luotettavia yksikanavaisia ilmaisimia, joissa tausta eliminoidaan optisesti ja sopivalla kaistanpäästösuodattimella. Liekin tunnistamisessa voidaan käyttää myös hyväksi liekin lepatustaajuutta. Itse kohdetilassa olevien liekki-ilmaisinten lisäksi voidaan käyttää optisia kuituja siten, että kuitujen välityksellä valo siirretään suojeltavan tilan ulkopuoliseen ilmaisinyksikköön.

IR-säteily on niin paljon UV-säteilyä voimakkaampaa, että IR-ilmaisimilla on mahdollista havaita 30 × 30 cm²:n allaspalo vielä n. 40 m:n etäisyydeltä. Pöly vaimentaa IR-säteilyä huomattavasti vähemmän kuin UV-säteilyä, joten IR-ilmaisimella palo voidaan havaita syvemmältä pölyn seasta, ja ilmaisim toimii likaantuneenakin.

Liekki-ilmaisimia käytetään suurissa tiloissa, joissa palo on alusta alkaen liekehtivää.

Liekki-ilmaisimet ovat ainoita mahdollisia ilmaisimia osaksi tai kokonaan avoimissa kohteissa, joissa tulipalojen synnyttämää lämpöä tai savua ei voida luotettavasti havaita. IR-säteily lisäksi heijastuu hyvin, joten IR-ilmaisimella voidaan nähdä jossain määrin myös esteiden taakse. Sisätiloihin valitaan herkkyyden vuoksi yleensä IR-ilmaisim ja ulkona käytetään UV-ilmaisinta, koska se on melko epäherkkä auringon säteilylle. Likaantuminen heikentää kuitenkin ratkaisevasti UV-ilmaisimen herkkyyttä. Nykyisin on olemassa myös ulkokäyttöön soveltuvia IR-ilmaisimia sekä yhdistettyjä UV-IR-ilmaisimia.

Ns. *kipinäilmaisimet* ovat tietynlaisia liekki-ilmaisimia, mutta ne reagoivat IR-säteilyn tehonvaihteluihin.

3.4 KAASUILMAISIMET

Kaasuilmallisimet havaitsevat palamisessa, pyrolyysin aikana tai kaasuvuodon yhteydessä syntyviä kaasuja. Nämä kaasut ovat polttoaineelle ominaisia, ja ne

voivat olla esimerkiksi CO:ta, CO₂:ta, hiilivetyjä, syanideja ja suolahappohöyryä. Hiilidioksidia on ilmassa muutenkin niin paljon, että sitä ei yleensä voida käyttää palon havaitsemiseen.

Kaasuilmaisimessa voi olla puolijohdeanturi, jonka pintavastus muuttuu joko hapettavien tai pelkistävien kaasujen joutuessa pinnan läheisyyteen. Ilmaisimessa voidaan käyttää myös katalyyttielementtiä kiihdyttämään palamatta jääneiden kaasujen hapettumista. Silloin mitattavana suureena on palamisen vuoksi kohoava lämpötila.

Hollannissa kehitetty HRD-järjestelmä on näytteenottoilmaisimien, jossa on yhdistetty HCl-ilmaisimien ja ionisaatioperiaatteella toimivien savuilmaisimien. Järjestelmä on suunniteltu erityisesti PVC:n ylikuumentumisen ja palamisen havaitsemiseen. Valmistajan mukaan ilmaisimella havaitaan jopa 1 ppm:n HCl-pitoisuudet.

Kaupallisesti aletaan jo valmistaa sellaisia kaasuanalyysiin perustuvia ilmaisimia, jotka voidaan tilakohtaisesti säätää havaitsemaan eri kaasuja siten, että ilmaisimien on herkkä tilassa todennäköisimmälle palotyypille /22/.

Laivojen konehuoneissa CO-ilmaisimien, jonka kynnysarvoksi oli asetettu 30 ppm (suurkaupunkien ilmassa pahimmillaan 5 - 10 ppm), havaittiin koeolosuhteissa paljon luotettavammaksi kuin perinteinen ilmaisintekniikka /23/. CO-ilmaisinta testattiin yli 300 kokeessa, joissa palokuormana oli dieselöljyä, tekstiilejä, muovielementtejä ja hehkuvia puulastuja. CO-anturien toiminnan vertailussa käytettiin optisia ja ionisaatioilmaisimia, differentiaalilämpöilmaisimia ja UV-ilmaisimia. CO-antureita oli koetilassa vain yksi, muita ilmaisimia kutakin 9 kpl. Ilmanvaihtoa ja palon sijaintia ilmaisimiin nähden vaihdeltiin. Dieselöljypalojen ilmaisutodennäköisyyksiksi mitattiin seuraavat arvot, kun kriteerinä pidettiin ilmaisun saantia 3 min kuluessa:

- differentiaalilämpöilmaisimien	0
- optinen savuilmaisimien	0,18
- ioni-ilmaisimien	0,35
- CO-anturien	0,5.

Palokaasujen kemialliseen tunnistamiseen perustuva palonilmaisutekniikka näyttää erittäin lupaavalta. Käyttökokemus on kuitenkin vielä vähäinen.

4 SAMMUTUSJÄRJESTELMÄT

Sammutusmekanismit jaetaan neljään eri pääryhmään:

- Sammutusraivaus: Palamiskykyinen aine poistetaan palotilasta.
- Jäähdytys: Palavan aineen lämpötila lasketaan alle syttymislämpötilan tai liekin lämpötila lasketaan niin alhaiseksi, että reaktioiden lämmöntuotto ei riitä ylläpitämään palamista.
- Tukahduttaminen: Happipitoisuus pienennetään alle syttymisrajan. Palava pinta voidaan myös peittää siten, että polttoaine ja happi eivät pääse sekoittumaan.
- Inhibitio eli kemiallinen sammutus: Palamisen ketjureaktio katkaistaan.

Laivan konehuoneessa sammutusraivaus ei tule kyseeseen, vaan palo on kyettävä vähintäänkin rajaamaan tehokkaasti syttymiskohtansa lähistölle käyttämällä jotakin tai joitakin kolmesta muusta sammutusmekanismista.

Sammutusteknistä tutkimusta tehdään tällä hetkellä laajasti eri puolilla maailmaa. Halonien käyttökiellon myötä haloneille ollaan etsimässä korvikkeita tai vaihtoehtoja. Tutkimuksessa on jouduttu pureutumaan sammutukseen sen perusteista lähtien, ja markkinoille on tullut ja jatkuvasti tulee kokonaan uusia sammutusaineita ja -menetelmiä. Sammutustekniikka kehittynee myös jatkossa yhtä huimaa vauhtia, ja jotkut seuraavassa käsiteltävistä sammutetyypeistä ja -menetelmistä saattavat olla jo parin vuoden kuluttua vanhentuneita.

4.1 KAASUT

Kaasujen sammutuskyky perustuu pääasiassa tukahduttamiseen, mutta jotkut kaasut sammuttavat myös kemiallisesti. Onnistunut sammutus edellyttää tiettyä kaasupitoisuutta, joka on myös kyettävä ylläpitämään riittävän pitkä aika. Siksi kaasulla sammutettavan tilan on oltava aina tiiviisti suljettu ennen sammutteen laukaisua.

4.1.1 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on halonien ohella yleisin sammutekaasu. Oikein käytettynä hiilidioksidi on tehokas sammute eikä siitä jää myrkyllisiä hajoamistuotteita. Hiilidioksidin sammutusmekanismina on pääasiassa hapen syrjäyttäminen mutta myös vähäisessä määrin jäähdytys. Hiilidioksidia säilytetään huoneenlämmössä nesteytettyinä painesäiliöissä joskus jopa 250 barin paineessa (korkeapainejärjestelmä) tai jäähdytettyinä $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilaan noin 20 barin paineessa (matalapaine-järjestelmä). Vapautuessaan hiilidioksidi kaasuuntuu nopeasti.

Hiilidioksidi sammutukseen vaadittavina pitoisuuksina on ihmisille hengenvaarallista. Jo alle 10 %:n pitoisuudet ovat vaarallisia, mutta tilasuojauksessa sammuttamiseen tarvitaan yli 30 %:n pitoisuus. Siksi on välttämätöntä, että ennen laukaisua palotilan tulee olla miehittämätön. Purkautuva hiilidioksidi estää myös näkyvyyden ja haittaa poistumistien löytämistä.

Koska CO₂:n jäähdystysteho on heikko, korkeaa pitoisuutta on kyettävä ylläpitämään niin kauan, että palotila ehtii jäähtyä riittävästi. Heikon jäähdystystehon takia hiilidioksidi soveltuu paremmin nestepalojen kuin kiinteiden aineiden syväpalojen sammuttamiseen.

4.1.2 Halonien korvikkeet

Erinomaisina sammutteina tunnetut halonit ovat kaasumaisia hiilivetyjä, joissa yksi tai useampia vetyatomeita on korvattu halogeeniatomeilla (fluori, kloori, bromi ja jodi). Nyt tarkastellussa tilasuojauksessa on käytetty halonia 1301 (CF₃Br).

Halonien pääasiallinen sammutusmekanismi on kemiallinen: ne katkaisevat palamisen ketjureaktioita. Halonimolekyylit hajoavat lämmön vaikutuksesta, ja vapautuneet halogeenit poistavat palamisreaktioissa välituotteina olevia vetyatomeja ja hydroksidi-ioneja muodostaen niistä vettä. Halonimolekyylien lämmittäminen ja hajottaminen sitoo lämpöä, joten halonit myös jäädyttävät palotilaa – joskaan eivät läheskään niin tehokkaasti kuin vesi. Siksi, vaikka suljetussa tilassa palo voi sammua sekunneissa, uudelleensyttymisen estämiseksi vaadittavaa pitoisuutta on hiilidioksidin tavoin ylläpidettävä ainakin 10 min.

Halonien sammuttava pitoisuus palotilassa on 3 - 8 %. Tilan happipitoisuus laskee niin vähän, ettei se ole ihmiselle vaarallista. Haloneista ei myöskään jää palotilaan mitään jälkisiivousta vaativaa jätettä.

Kemiallisen reaktiivisuutensa takia halonit hajottavat tehokkaasti ilmakehän otsonikerrosta. Montrealin pöytäkirjan säännöstelemistä aineista juuri halonit ovat otsonikerrosta kaikkein tehokkaimmin tuhoavia aineita, ja siksi niiden tuotanto ja käyttö on jo lähes kokonaan kielletty.

Haloneja korvaavat aineet /24 - 27/ ovat aineita, joiden sammutusmekanismit ovat samat kuin haloneilla. Parhaassa tapauksessa olemassa oleviin halonisammutuslaitteistoihin voitaisiin vain vaihtaa sammuteaine (ns. "drop-in" -korvike).

Haloneja korvaavien aineiden tutkimus on keskittynyt toisiin halogenoituihin hiilivetyihin, ts. korvike-ehdokkaatkin ovat pääasiassa haloneja ("haloni"-nimitys tosin on vakiintunut vain nyt kielletyille yhdisteille). Tutkittuja yhdisteitä ovat olleet erilaiset FC-, HFC- ja HCFC-yhdisteet. FC-yhdisteissä on vain fluoria ja hiiltä, HFC-yhdisteissä lisäksi vetyä ja HCFC-yhdisteissä vielä vedyn lisäksi klooria. Pääasiallisena erona kiellettyihin sammuttehaloneihin verrattuna on, että yhdisteissä ei ole bromia eivätkä kaikki ole täysin halogenoituja.

Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto, EPA (Environmental Protection Agency), on alkanut koota ja ylläpitää ns. hyväksyttävien sammutusaineiden listaa (ns. SNAP-lista, Significant New Alternatives Policy). Aineiden luetteloinnissa on otettu huomioon mm. niiden myrkyllisyys, ympäristövaikutukset sekä aineiden kaupallinen saatavuus, mutta sammutustehokkuudelle ei ole asetettu ehtoja. Taulukkoon 5 on koottu EPA:n vuoden 1994 SNAP-listasta haloneja korvaavat, tilasuojaukseen soveltuvat aineet. Vuoden 1995 aikana listaan ei ole tullut uusia korvaavia aineita /28/. Mikään luetteloiduista aineista ei sovellu suoraan halonin korvikkeeksi, ts. halonilaitteistoja ei sellaisenaan voida käyttää uudella aineella

täytettyinä vaan vähintäänkin suuttimet on vaihdettava, ja varastointilavuus on suurempi.

Seuraavat ominaisuudet ovat yhteisiä kaikille taulukon 5 korvikeaineille:

- nesteytettyjä kaasuja
- puhtaita, aineet höyrystyvät välittömästi eivätkä likaa palotilaa
- sähköjohtamattomia
- haloneja enemmän hajoamistuotteita, pääasiassa fluorivetyä (HF).

Osa SNAP-listan aineista on vain väliaikaisratkaisuja: FM-100 poistettiin käytöstä jo vuoden 1996 alkuun mennessä, ja kaikille HCFC- yhdisteille ollaan asettamassa rajoituksia, koska nekin tuhoavat ilmakehän otsonikerrosta. Tavoitteena on, että HCFC-yhdisteiden käyttö lopetetaan vuoteen 2030 mennessä. EU-maissa käytön takarajaksi saattaa tulla 1.1.2003. EPA on rajoittamassa FC-3-1-10-yhdisteen käyttöä sen pitkän eliniän (2 600 vuotta) takia. Suurin ilmakehää lämmittävää vaikutus (kasvihuoneilmiö) on yhdisteellä HFC-23, joten senkin käytölle on odotettavissa rajoituksia.

Kaikki korvikeaineet tuottavat tulipalossa haloniin verrattuna 5-10 -kertaisen määrän fluorivetyä /29, 30/. Hajoamistuotteiden määrä riippuu palon koon ja palotilan välisestä suhteesta sekä laukaisuajankohdasta. Mitä varhaisemmassa palon vaiheessa sammutus aloitetaan, sitä vähemmän vaarallisia hajoamistuotteita muodostuu. On arvioitu, että 1,5 MW:n palo 1 000 m³:n tilassa aiheuttaa hengenvaarallisen HF-pitoisuuden. Näin suuri palo aiheuttaa luonnollisesti jo itsessään välittömän hengenvaarun, mutta myös sammutuksen jälkeen on suuret HF-pitoisuudet otettava huomioon. Hajoamistuotteet voivat olla haitallisia myös konehuoneen laitteistoille.

Itse sammutteisiin liittyy myös myrkytysvaara: halonipitoisuuksiin liittyvä varmuustekijä on n. 100 % (ts. ihmiselle vaarallinen halonipitoisuus on noin kaksinkertainen sammutukseen vaadittavaan pitoisuuteen verrattuna), kun se korvikeaineille on vain n. 20 %.

Kaikki ympäristövaikutukset tulevat jatkossa vaikuttamaan aineiden hyväksyntään ja käyttöön. Yhdysvaltain rannikkovartioston mielestä konehuoneen sammutusjärjestelmän potentiaalisimmat vaihtoehdot taulukon 5 aineista ovat FM-200 ja FE-13 sekä lisäksi vesisumu, johon palataan jäljempänä. Yhdysvaltain laivasto on päättänyt ottaa käyttöön FM-200:n.

Tilasuojaukseen liittyen Yhdysvalloissa on kehitetty tiettyjä *puhtaita* sammutusaineita koskeva standardi NFPA 2001 (Standard for the Design and Installation of Clean Agent Fire Extinguishing Systems), joka antaa aineiden tekniset tiedot ja ominaisuudet muttei sisällä itse aineiden hyväksyntää. Puhtailla aineilla tarkoitetaan joko kaasumaisia tai lähes välittömästi höyrystyviä aineita, jotka eivät likaa palotilaa. Standardissa annetaan myös ohjeet järjestelmän suunnittelusta ja asennuksesta. Vuoden 1994 painos sisältää kahdeksan sammutusainetta, joista seuraavat seitsemän ovat taulukossa 5 mainittuja halonien korvikkeita: PFC/CEA-410, FM-200, NAF S-III ja FE-13 miehittyihin tiloihin ja FM-100, FE-241 ja FE-25 miehittämättömiin tiloihin.

Yhdysvalloissa on myös myönnetty ensimmäisiä ainekohtaisia hyväksyntöjä. Taulukon 5 aineista ainakin FM-200 ja CEA-410 ovat UL:n (Underwriters Laboratory) ja FM:n (Factory Mutual) hyväksymät. FE-241 on ainakin FM:n hyväksymä, ja NAF S-III:lla on ULC:n (Underwriters Laboratory of Canada) hyväksyntä. Ainekohtaisia hyväksyntöjä tulee todennäköisesti koko ajan lisää.

Tutkittavina on ollut ja jatkuvasti on lukemattomia aineita, jotka eivät ainakaan vielä sisälly taulukkoon 5. Tutkimus on kuitenkin niin laajaa ja intensiivistä, että hyvin todennäköisesti jo lähivuosina listaan sisältyy uusia ja ehkä parempia halonien korvikkeita ja niiden myötä monien listassa mainittujen aineiden valmistus loppuu. Jatkuvuutta ajatellen minkä tahansa tällä hetkellä tunnetun korvikkeen valintaan saattaa liittyä riskejä.

Taulukko 5. Haloneja korvaavia puhtaita aineita.

Tyypimerkintä	Kemiallinen kaava	Kauppanimi
<i>Tilasuojaus (miehitetyt tilat)</i>		
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃ heptafluoripropaani	FM-200
HCFC seos A	HCFC-22 (82%) HCFC-123 (4.75%) HCFC-124 (9.5%)	NAF S-III
HFC-23	CHF ₃ trifluorimetaani	Kaltron/Solkaflam 23, FE-13
FC-3-1-10	CF ₃ CF ₂ CF ₂ CF ₃ perfluoributaani	PFC/CEA-410
	CF ₃ CF ₂ CF ₃	PFC-218/CEA-308
<i>Tilasuojaus (miehittämättömät tilat)</i>		
HBFC-22B ₁	CHF ₂ Br bromidifluorimetaani	FM-100
HCFC-22	CHClF ₂ klooridifluorimetaani	
HCFC-124	CHClFCF ₃ klooritetrafluorimetaani	FE-241
HFC-125	CHF ₂ CF ₃ pentafluorimetaani	FE-25
HFC-134a		
(haloni) 13001	CF ₃ I joditrifluorimetaani	Triodide

4.1.3 Muut kaasut

Hiilidioksidin lisäksi halonien kaasumaisia vaihtoehtoja ovat jalokaasut, pääasiassa argon /24, 25/. Jalokaasut ovat täysin inerttejä, ts. ne eivät osallistu mihinkään kemiallisiin reaktioihin ja niiden sammutusvaikutus perustuu yksinomaan tukahduttamiseen. Kohteesta riippuen vaadittava sammutepitoisuus on erittäin korkea, yleensä 35 - 60 %.

Inergen on kaupallinen nimi sammutuskaasuseokselle, joka koostuu kolmesta kaasusta, typestä (52 %), argonista (40 %) ja hiilidioksidista (8 %). Kaasu varastoidaan esimerkiksi 80 l:n ja 150 barin säiliöissä, jolloin yksi säiliö riittää n. 12 m³:n tilan suojaukseen. Inergen alentaa ilman happipitoisuuden suojattavassa tilassa 21 t-%:sta alle 15 t-%:iin, mikä sinänsä on ihmiselle vaarallista. Valmistajan mukaan kaasuseoksen sisältämä hiilidioksidi kuitenkin aiheuttaa hengitysmekanismien kiihtymistä siinä määrin, että aivot saavat riittävästi happea ja ihminen voi oleskella tilassa lyhyen ajan.

Hiilidioksidin hyödyllisyydestä on kaksi koulukuntaa, joista toista edustaa Argonite, joka on Inergenin tavoin kaasuseos, mutta se ei sisällä hiilidioksidia. Argonitessa puolet on argonia, puolet typpiä.

EPAn SNAP-listalle sisältyvät Inergenin (IG 541) ja Argoniten (IG 55) lisäksi MinimAR-kaasuseos. Inergeniä käsitellään myös NFPA 2001 -standardissa, ja sillä on UL:n ja FM:n hyväksynnät.

Seuraavat ominaisuudet ovat yhteisiä kaikille halonien vaihtoehtoina esitetyille kaasuille (ei CO₂):

- Niitä säilytetään kaasumaisina, jolloin varastointitilavuudet ovat suuret.
- puhtaita, eivät likaa palotilaa
- sähköäjohtamattomia
- purkautumisaika melko pitkä, 1 - 2 min
- Aineista ei synny hajoamistuotteita.

4.2 VESI JA LISÄAINEET

4.2.1 Perinteiset järjestelmät

Ylivoimaisesti yleisimmin käytetty sammute on edelleenkin vesi. Helpon saatavuuden, ympäristöystävällisyyden ja halpuuden lisäksi vesi on myös erinomainen sammute. Sillä on kolme pääasiallista sammutusmekanismia:

- Veden tärkein ominaisuus sammutteena perustuu sen kykyyn sitoa höyrystyessään suuria määriä lämpöä, yli 2 MJ/kg. Vesijähdytyksen tehokkuus riippuu höyrystymisnopeudesta, joka on yleensä sitä suurempi mitä pienempi pisarat ovat.

- Höyrystyminen myös laimentaa palotilan happipitoisuutta, sillä veden tilavuus kasvaa yli 1 700-kertaiseksi, kun se höyrystyy. Höyryn ulosvirtaus myös estää ilmapirtauksen sisään. Happipitoisuuden pieneneminen rajoittaa palamisnopeutta ja voi tukahduttaa palon kokonaan.
- Kolmas sammutusmekanismi ei perustu höyrystymiseen, vaan pienet pisarat jo sellaisenaan vaimentavat säteilylämmönsiirtoa sirottaen ja absorboiden lämpösäteilyä liekin ja palamiskykyisten aineiden välillä. Silloin vielä palamattomien pintojen syttyminen voi estyä ja jo palavien pintojen palamisnopeus pienetä.

Kiinteät vesisammutus- eli sprinkleri- tai hajasuihkujärjestelmät eivät yleensä sammuta nestepaloja, mutta ne jäädyttävät kuitenkin palotilan rakenteita niin tehokkaasti, että palo voidaan saada rajatuksi.

Nestepalojen sammutuksessa käytetäänkin yleensä vaahtoja. Sammutusvaahto saadaan aikaan liuottamalla veteen vaahtoa muodostavaa nestettä sekä sekoittamalla liuokseen ilmaa vaahdonkehittimessä. Vaahdot jaetaan kolmeen ryhmään vaahtoluvun eli vaahdon tilavuuden ja vaahdossa olevan nesteen tilavuuden suhteen mukaan: puhutaan raskas-, keski- ja kevytvaahdoista, jolloin vaahtoluvut ovat 2 - 20, 20 - 200 ja yli 200. Vaahtoluku riippuu lähinnä sen ilman tilavuudesta, joka sekoitetaan vaahdotteeseen, eikä niinkään vaahdon kemiallisesta koostumuksesta /31/.

Raskasvaahdon sammutusvaikutus perustuu sen kykyyn peittää palava aine sekä vaahdon sisältämän suuren vesimäärän jäädytystehoon. Kevytvaahdon jäädytysvaikutus on pienempi, ja sen sammutusvaikutus perustuukin lähinnä tukahduttamiseen. Raskasvaahdot ja keskivaahdot soveltuvat palavien nesteiden sammuttamiseen, kevytvaahdot ja keskivaahdot suljetuissa tiloissa nesteiden ja kiinteiden aineiden sammutukseen.

Kevytvaahdolla pyritään yleensä täyttämään koko palotila tai ainakin peittämään kaikki palavat pinnat. Kevytvaahdotta käytettäessä tilan ei tarvitse olla yhtä tiivis kuin kaasu edellyttää, mutta vaahtoa ei kuitenkaan saa päästä liikaa karkuun. Tilan on myös hyvä olla miehittämätön ennen vaahtolaukaisua, sillä vaahtokerroksen pinta nousee nopeasti ja näkyvyys katoaa kokonaan.

Tärkeimmät vaahdon ominaisuudet, jotka vaikuttavat niiden valintaan, ovat juoksettavuus, kuumuuden kesto ja uudelleensyttymisaste sekä polttoaineen sietokyky. Mitä suurempi juoksettavuus, sitä nopeammin vaahto peittää kaikki pinnat. Vaahdon tulee kestää kuumuutta, sillä vaahto ei saa tuhoutua sitä mukaa, kun sitä muodostuu. Jo muodostuneen vaahdon tulee myös estää uudelleensyttymistä. Polttoaineen sietokykyä tarvitaan silloin, kun vaahto sekoittuu polttoaineeseen eivätkä sammutusominaisuudet saa heiketä.

Jos odotettavissa on pieni öljyvuoto, ts. muodostuu vain ohut palava öljykerros, on juoksettavuudella tärkein merkitys sammutuksessa. Mitä paksumpi on palava kerros tai mitä pidempi on esipaloaika, sitä enemmän vaaditaan kuumuuden kestolta ja polttoaineen sietokyvyltä.

Proteiinivaahdot (P) muodostavat kovan kemiallisen rakenteen kuplan seinämään. Nämä vaahdot kuivuvat hitaasti ja ovat jähmeitä, mikä pienentää niiden kykyä levittäytyä polttoaineen pinnalle. Ne kestävät kuumuutta ja estävät uudelleensyttymistä. Polttoaineen sietokyky on heikko, jos vaahto suihkutetaan voimakkaasti palavan nesteen päälle.

Synteettisillä vaahdoilla (S) on raskasvahtoina huono kuumuudenkestävyys, eivätkä ne kunnolla estä uudelleensyttymistä. Niiden polttoaineen sietokyky on myös heikko. Synteettiset vaahdot soveltuvat kuitenkin suurten tilojen kevytvaahdoiksi.

Fluoroproteiinivaahtojen (FP) rakenne on vastaava kuin proteiinivaahtojen. Lisäksi niillä on suuri polttoaineen sietokyky. Vaahdossa olevat pinta-aktiiviset aineet tekevät vaahdosta juoksevamman, ja vaahto muodostaa hyvän peiton esimerkiksi metallireunoja vastaan. Fluoroproteiinivaahdoista on ainutlaatuisen ominaisuuksiensa takia tullut lähes pakollisia tiloissa, joissa on nestemäisen hiilivetypalon vaara.

Synteettiset kalvovaahdot (AFFF) ovat fluoroproteiinivaahtoja juoksevampia, jolloin palo saattaa sammua nopeasti. Vaahdottomat kalvot ovat kuitenkin hyvin ohuita ja rikkoutuvat helposti. Monissa tapauksissa AFFF:n käyttö edellyttääkin vaahdotusta. Fluoroproteiinkalvovaahdot (FFFP) yhdistävät FP-vaahtojen hyvät ominaisuudet AFFF:n sammutusnopeuteen.

Melkein kaikista edellä käsitellyistä vaahdoista on olemassa myös alkoholia kestävät muodot.

4.2.2 Vesisumut

Vesisumut edustavat uutta sammutustekniikkaa /32/, jossa perinteisen sammutteen sammutusmekanismit pyritään optimoimaan. Veden kaikki kolme sammutusmekanismia tulevat sitä tehokkaammin hyödynnetyiksi mitä pienempiä pisarat ovat. Palon sammutukseen tai hallintaan vaadittavat vesimäärät ovat perinteisiin järjestelmiin verrattuna pieniä, joten vesisumut soveltuvat erityisen hyvin kuljetuskaluston, kuten juuri laivojen ja lentokoneiden, palosuojaukseen.

Vesisumuilla voidaan korvata niin tavanomaisia sprinklerijärjestelmiä kuin kaasujärjestelmiäkin. Kiinteiden vesisumujärjestelmien sammutustehokkuudesta on saatu kiistatonta näyttöä /24, 25, 33, 34/, ja etenkin laivasovellutuksissa ne ovat tehneet varsinaisen läpimurron. Päinvastoin kuin perinteiset sprinklerijärjestelmät, vesisumut sammuttavat myös nestepaloja, ja niitä voidaan käyttää myös tiloissa, joissa on korkeita jännitteitä. Puhtaat vesisumut on kuluvana vuonna sisällytetty EPAn SNAP-listaan.

Vielä muutama vuosi sitten vesisumuteknologiaa ei yksinkertaisesti ollut olemassa. Tällä hetkellä vesisumujärjestelmien valmistajia samoin kuin sumujen tuottamistekniikoita on jo useita. Vesisumuihin liittyvä tutkimus- ja kehitystyö on tällä hetkellä erittäin intensiivistä.

Nykyisin käytössä olevat sumusuuttimet ovat kolmea päätyyppiä,

- isku- tai törmäyssuuttimia,
- korkeapainesuuttimia sekä
- paineilmasuuttimia.

Törmäyssuuttimissa kuristuksen edessä on este, johon törmätessään suurella nopeudella virtaava vesisuihku hajoaa pieniksi pisaroiksi. Suuttimet muistuttavat perinteisiä sprinklerisuuttimia. Kuristuksen halkaisija on kuitenkin pienempi ja paine jonkin verran suurempi vaikkakin edelleen alhainen (< 10 bar). Esteen takia liikemäärät ovat melko pienet, ja hyvin hienojakoisen sumun tuottaminen tällä menetelmällä on vaikeaa.

Korkeapainesuuttimissa käytetään korkeaa vesipainetta, joka yhdessä tai useamassa kuristuksessa hajottaa suihkun hienoiksi pisaroiksi. Järjestelmien toimintapaine voi olla "keskipainealueella" ($\sim 15 - 35$ bar) tai sitä korkeampi, jopa yli 200 bar. Korkeapainejärjestelmä vaatii aina omat putkistonsa, pumppunsa ja vesisäiliönsä. Korkeapainesuuttimilla on mahdollista tehdä hyvin pieniä pisaroita, joiden tunkeutumiskyky on parempi kuin matalapaineisilla suuttimilla muodostetuilla pisaroilla.

Paineilmasuuttimissa paineistettu ilma, tyyppi tai muu kaasu sekoitetaan paineistettuun veteen, jolloin vesi hajoaa sumuksi. Paineet ovat kuitenkin edelleen alhaisia. Menetelmällä päästään hyvin pieniin pisaroihin, joilla on suuri tunkeutumiskyky. Paineilmasuuttimet edellyttävät putkitusta kahdelle aineelle ja suuren paineilmavaraston. Suunnittelussa tarvitaan sekä hydraulisia että pneumaattisia laskelmia.

Kaikilla vesisumujärjestelmillä on hyvät ja huonot puolensa, ja kun yksi sumujärjestelmä on päätetty hankkia, siihen ei voi liittää muita.

Vesisumun ominaisuuksista sammutustehokkuuteen vaikuttaa erityisesti sumun pisarakokajakautuma. Muita merkittäviä tekijöitä ovat vesivuon tiheys ja pisaroiden tunkeutumiskyky sekä mahdolliset lisäaineet. Esimerkiksi jo pieni määrä ruokasuolaa saattaa parantaa sammutustehoa (vrt. merivesi). Tutkimus lisäaineiden vaikutuksesta vesisumujen sammutustehoon on vielä ollut hyvin hajanaista, mutta Suomessa on tarjolla jo ainakin yksi kaupallinen järjestelmä, joka soveltaa vesisumuun sekoitettua lisäainetta. EPAn SNAP-listalle on myös sisällytetty yksi lisäaineellinen vesisumu miehittämättömien tilojen suojaukseen. SNAP-listausta varten on kukin lisäaine analysoitava erikseen.

Sumujen pisarakokajakautuma vaihtelee niin ajallisesti kuin paikallisestikin. Vesisumuna pidetään suihkua, jonka $D_{v0.99}$ (halkaisija, jota pienempi halkaisija on 99 %:lla nestetilavuuden pisaroista) metrin päässä suuttimesta keskellä suihkun poikkileikkausta on alle 1 mm. Käytännössä $D_{v0.9} \leq 400 \mu\text{m}$, sillä sitä suuremmat pisarat saavat jo aikaan allaspalojen pinnan sekoittumista ja roiskimista. Usein sumujen pisarakoot ovat vielä paljon pienempiä: tilavuuskeskihalkaisija voi olla alle 100 μm .

Jotta pienet pisarat ylipäättään voisivat tunkeutua liekkiin ja saavuttaa palavan pinnan, niiltä edellytetään riittävän suurta liikemäärää. Veden käyttö on optimaalista nimenomaan, jos vesi saadaan liekkiin nestemäisenä.

Pelkät pienet, hyvin tunkeutuvat pisarat eivät takaa suurta sammutustehokkuutta. Pisaroita on myös oltava riittävän paljon. Tilanteesta riippuen vesimäärä ilmaistaan tilavuusvirtana joko yksikkötilavuutta (vrt. kaasut) tai yksikköpinta-alaa (vrt. tavanomaiset sprinklerit) kohden. Käytännössä sumun pisaratiheydet vaihtelevat paikallisesti, joten keskimääräiset tilavuuskonsentraatiot tai vesivuon tiheydet saattavat olla vain hyvin karkeita arvioita.

Puhtaan vesisumun sammutustehokkuuteen ja sammutusmekanismien keskinäiseen tärkeysjärjestykseen vaikuttavat itse vesisumun ominaisuuksien lisäksi palon tyyppi ja palotila. Nämä myös vaikuttavat sumujen käyttäytymiseen perinteisiä suihkuja huomattavasti enemmän.

Palon tyyppi määräytyy palavasta aineesta, sen sijoittelusta ja palon vaiheesta. Esimerkiksi allaspalon sammutuksessa tärkein sammutusmekanismi voi olla säteilylämmönsiirron estäminen nestepinnan ja liekin välillä tai hapen syrjäytyminen lähellä pintaa, kun taas selluloosapalossa oleellisinta voi olla palavan pinnan jäädyttäminen. Palon vaihe vaikuttaa voimakkaasti pisaroiden tunkeutumiskykyyn ja höyrystymisnopeuteen. Mitä suurempi palo on, sitä nopeammin vesi höyrystyy, mutta toisaalta sitä voimakkaampia ovat palotilan kaasuvirtaukset, jolloin sumun on vaikeampi tunkeutua liekkeihin.

Palotilan koko vaikuttaa säteilyn voimakkuuteen, liekin nopeuteen ja sammutteen leviämiseen. Esteet palotilassa ovat erityisen ennalta arvaamattomia, sillä sen lisäksi, että ne vaikeuttavat sumun leviämistä ja pienentävät pisaroiden liikemäärää, ne myös pienentävät pisaratiheyttä veden tarttuessa kaikkialle esteiden pinnoille. Suljetussa tilassa palo on aina helpompi sammuttaa, sillä silloin kaikkia veden kolmea sammutusmekanismia voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi, ja toisaalta itse palaminenkin pienentää tilan happipitoisuutta.

Tällä hetkellä näyttää siltä, että sumuille on vaikeata asettaa selkeitä, yleispäteviä vaatimuksia sammutusjärjestelmien suunnittelun ja standardisoinnin avuksi. Missään tapauksessa olemassa olevia sprinkleri-, hiilidioksidi- tai halonisääntöjä ei voida suoraan soveltaa vesisumuille eikä niitä voida suoraviivaisesti sellaisiksi edes muokata. Toistaiseksi enemmän kuin mitkään muut sammutusjärjestelmät, vesi-sumujärjestelmät tulee räätälöidä kuhunkin sovellutuskohteeseen erikseen. Laivoja varten tämän räätälöinnin avuksi on kehitetty tarkoin määritetyt palokoheet /8, 9/, jotka järjestelmän on läpäistävä.

4.3 MUUT SAMMUTTEET JA MENETELMÄT

4.3.1 Jauheet

Sammutejauheet jaetaan kahteen päätyyppiin, nestepaloihin soveltuviin B-jauheisiin, joita ovat esimerkiksi natrium- ja kaliumbikarbonaatit (NaHCO_3 ja

KHCO_3), sekä neste- ja kiinteiden aineiden paloihin soveltuviin AB-jauheisiin, joiden yleisimmät pääkomponentit ovat monoammoniumfosfaatti ja ammoniumsulfaatti ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ja $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Kaikissa kaupallisissa jauheissa on pinnoitteita kosteuden imeytymisen estämiseksi sekä jauheen juoksevuuden parantamiseksi.

Jauheiden oleellisimmilla komponenteilla, suoloilla, on veden tapaan kolme pääasiallista sammutusmekanismia /24/:

- Kuumassa hajotessaan suolat sitovat suuren määrän lämpöä, kaliumbikarbonaatti voi sitoa lämpöä 4,2 MJ/kg ja kaliumkarbonaatti jopa 5,5 MJ/kg.
- Toinen sammutusmekanismi on kemiallinen: liekissä esiintyvät aktiiviset radikaalit voivat rekombinoitua joko heterogeenisesti suola- hiukkasten pinnalle tai homogeenisesti alkalimetalliatomien katalysoimissa kaasufaasireaktioissa. Palamisen ketjureaktio häiriintyy.
- Kolmanneksi, jäähtymistä edistävissä hajoamisreaktioissa vapautuu vettä ja hiilidioksidia, jotka paikallisesti laimentavat happipitoisuutta.

Kaikki mekanismit ovat suoraan tai epäsuoraan pintailmiöitä. Näin ollen, mitä suurempi pinta, sitä tehokkaampi sammutus. Jauheiden sammutustehokkuutta voidaan optimoida samalla tavalla kuin veden eli hiukkaskokoa pienentämällä.

Jauheita käytetään melko vähän kiinteissä sammutusjärjestelmissä. Jauhejärjestelmät käyttävät yleensä tyypeä ponneaineena. Jauheiden etuna on hyvä sammutuskyky ja myrkyttömyys, haittana on niiden likaava vaikutus.

4.3.2 Aerosolit

Aerosolit /24 - 27/ ovat uusi tuote sammutustekniikassa. Aerosolilla tarkoitetaan yleisesti joko nestemäisten tai kiinteiden hiukkasten ja kaasun seosta, jossa hiukkaskoko on 1 μm :n suuruusluokkaa.

Sammuteaerosoleja muodostetaan polttamalla sopivia pyroteknisiä aineita, jolloin ne ensin höyrystyvät ja sitten kondensoituvat pieniksi hiukkasiksi. Pyroteknisesti muodostetut sammuteaerosolit sisältävät yleensä alkalimetallisuoloja samoin kuin edellisessä luvussa käsitellyt B-jauheetkin, mutta aerosolien hiukkaskoko on huomattavasti pienempi. Pienen hiukkaskoon takia suolojen sammutusmekanismit käytetään tavanomaisia jauheita tehokkaammin hyväksi. Tässä suhteessa perinteisesti käytetty vesi ja vesisumut ovat analogisia jauheiden ja aerosolien kanssa.

Aerosolit vastaavat hyvin kaasumaisia sammutteita; niillä on kaasun virtausominaisuudet ja ne ovat ilmaa kevyempiä, joten ne voivat tunkeutua helposti kaikkialle ja soveltua siten tilasuojaukseen. Aerosoleihin liittyvä merkittävä etu kaikkiin muihin sammutteisiin verrattuna on se, että ne eivät edellytä säiliöitä, putkistoja, suuttimia ym. kiinteitä asennuksia.

Aerosolit muodostuvat melko hitaasti mutta heikentävät merkittävästi näkyvyyttä palotilassa. Aerosolit ovat sähköjohtamattomia, ja valmistajien mukaan aerosolit voidaan palon sammuttua tuulettaa nopeasti pois palotilasta, jolloin niiden likaava vaikutus on hyvin pieni. Aerosolit eivät tuhoa otsonikerrosta ja ilmakehää lämmitävä vaikutus on hyvin pieni. Niiden myrkyllisyyttä tai korroosiovaikutusta sen

sijaan ei vielä kunnolla tunneta. Jos mukana on klooriyhdisteitä, korroosiovaikutus on ilmeinen. Klooriyhdisteitä käytetään paljon Venäjällä, josta koko aerosolisammutustekniikka on lähtöisin, mutta länsimaissa klooria vältetään. Myrkyllisyys-vaikutukset saattavat liittyä hiukkasten pieneen kokoon, jolloin ne mahdollisesti kertyvät keuhkoihin.

Aerosolisammutusjärjestelmät ovat lupaavia mutta vielä lähinnä tuotekehitysteella. Kuitenkin EPAn SNAP-listalta löytyy jo kolme eri aerosolia; FS 0140, joka on jalokaasuaerosoliseos, PGA, joka on hiilivetygeelin ja kuivakemikaalin seos, sekä SFE, pelkkä kuivakemikaali.

5 KONEHUONEEN PALOSUOJAUS

5.1 PALON HAVAITSEMINEN

5.1.1 Havaittavia ilmiöitä

Ilmiöitä, joita on mahdollista havaita konehuoneen alkavassa palossa, ovat yleensä

- öljypalon liekit ja musta savu
- sähkölaitteiden ja kaapelien kuumenemisessa ja palossa kehittyvä vaalea savu.

Lisäksi tyypillisiä havaittavissa olevia ilmiöitä, jotka voivat aiheuttaa palon, ovat

- öljyvuodot
- pintojen ylikuumeneminen.

Kaikki ilmiöt öljyvuotoa lukuun ottamatta on mahdollista havaita sopivalla yhdistelmällä tässä tutkimuksessa tarkasteltuja paloilmaisimia (ks. taulukko 4). Lisäksi nykyisillä monisensori- ja monikriteeritekniikoilla voidaan ilmaisujärjestelmästä räätälöidä erheelliset ilmoitukset minimoiva, useampia eri hälytystasoja sisältävä järjestelmä.

5.1.2 Lämpöilmaisimet

Pisteilmaisintyyppiset lämpöilmaisimet ovat liian hitaita: Palo ehtii konehuoneessa kehittyä pitkälle, ennen kuin lämpötilat ilmaisinten kohdalla ovat riittävän korkeat. Jotta ilmaisu saataisiin ajoissa, tulisi pisteilmaisimia olla lukematon määrä kaikkien oletettujen palokohtien välittömässä läheisyydessä. SOLAS -sopimus pitää kuitenkin toistaiseksi pisteilmaisimia riittävänä konehuoneen yleissuojauksena.

Lämpöilmaisinkaapeli sen sijaan soveltuu erinomaisesti kriittisten kohtien ylikuumenemisen ilmaisuun. Kaapelityypistä riippuen voidaan paikantaa yksittäisiä kuumia pisteitä tai havaita pidemmän aikavälin lämpötilamuutoksia, jolloin voidaan ajoissa ryhtyä kuumien pintojen jäähdytys- tai valvontatoimenpiteisiin.

5.1.3 Savuilmaisimet

Pisteilmaisintyyppisten lämpöilmaisimien tavoin SOLAS-sopimus sallii konehuoneen yleissuojaukseksi pisteilmaisintyyppiset savuilmaisimet. Tilojen suuren koon ja sokkeloisuuden sekä tehokkaan ilmastoinnin takia tätäkään ratkaisua ei voida pitää riittävänä, vaikka savuilmaisimet yleensä ovatkin lämpöilmaisimia nopeampia. Kuitenkin – varmuuden maksimoimiseksi – konehuoneen perusilmaisujärjestelmä voisi koostua ionisaatioilmaisimista, joiden sijoittelussa otetaan huomioon ilmastointi ja esteet. Jotkut valmistajat myös mainostavat näytteenottoilmaisimia, jotka soveltuvat myös likaisiin olosuhteisiin ja ovat hinnaltaan kilpailukykyisiä pisteilmaisinjärjestelmän kanssa.

Optisia savuilmaisimia tarvitaan sähkölaitteiden ja kaapelien välittömään läheisyyteen kytemisvaiheessa kehittyvän vaalean savun havaitsemiseksi. Tapauskohteisesti on selvitettävä, onko pisteilmaisoin riittävä vai saavutetaanko parempi suojaustaso linjailmaisoin- tai näytteenottoilmaisintyyppisellä ratkaisulla.

5.1.4 Liekki-ilmaisimet

SOLAS-sopimus sallii liekki-ilmaisimet vain täydentämään savu- tai lämpöilmaisinjärjestelmää. Rajoitus on ymmärrettävä, koska konehuoneen kaikkia kohtia on käytännössä mahdoton saada liekki-ilmaisimien havaintokenttään. Toisaalta liekki-ilmaisimien käyttö on konehuoneessa erittäin perusteltua, koska öljypalot ovat alusta lähtien liekehtiviä.

UV-ilmaisoin soveltuu konehuoneeseen yleensä huonosti, koska sen herkkyys kärsii jo pienistä pöly- tai öljymääristä. IR-ilmaisoin puolestaan soveltuu konehuoneeseen hyvin. Ilmaisun pääasiallisia virhelähteitä ovat kuumat kappaleet – joiden vaikutus nykyään osataan tosin eliminoida – mutta konehuoneen tapauksessa ilmoitus ylikuumentuneesta pinnasta voi olla jopa toivottavaa.

5.1.5 Kaasuilmaisimet

Kaasuilmaisimet ovat niin uutta tekniikkaa palonilmaisussa, että niitä ei SOLAS -sopimuksessa edes mainita. Markkinoilla palonilmaisuuun tarkoitettuja kaasuilmaisimia on vasta vähän, eikä käyttökokemusta ole päässyt paljoa kertymään. Siksi, vaikka kaasuilmaisoin voi periaatteessa olla ihanteellinen ratkaisu, saattaa siihen käytännössä liittyä vielä luotettavuusongelmia.

Kuitenkin konehuonetta vastaavissa koeolosuhteissa CO-anturi havaittiin niin selvästi perinteisiä ilmaisimia paremmaksi, että CO-pitoisuutta kannattaa mitata konehuoneessa. CO-pitoisuuden määrittämistekniikka on hyvin tunnettua, ja kaupallisia mittausjärjestelmiä on useita. Mittausjärjestelmiä ei ole kehitetty varsinaisesti palonilmaisuuun, mutta riittää, että järjestelmälle säädetään sopiva kynnyspitoisuus, jota seuraa hälytys.

5.2 SAMMUTUS

SOLAS -sopimus edellyttää, että konehuoneen tilasuojauksena on CO₂-, hajasuihku- tai kevytvaahtojärjestelmä. Muunlaiset järjestelmät hyväksytään, jos niillä on vastaava sammutustehokkuus kuin em. järjestelmillä. IMO hyväksyy nyttemmin muita vesi- tai kaasupohjaisia järjestelmiä, mikäli ne läpäisevät tietyt sammutuskokeet. Ainakin vesipohjaisilta järjestelmiltä sammutuskokeiden läpäisy edellyttää selvästi parempaa sammutustehokkuutta kuin on sallituilla, perinteisillä järjestelmillä.

Palotilastojen perusteella voidaan päätellä, että säädösten mukaiset CO₂-määrät ovat aliarvioituja /4/, ja hajasuihkujärjestelmän vesimääriä koskeva vähimmäisvaatimus (5 l/min/m²) on puolestaan niin alhainen, ettei allaspaloja saataisi edes

hallintaan /35/. Myös kevytvaahtojärjestelmän hyväksytytty täyttönopeus (1 m/min) on liian alhainen konehuonepalojen sammuttamiseksi: eräs vaahtojärjestelmävalmistaja mainostaa läpäisseensä IMO:n konehuonekokeet täyttönopeuksilla 2 m/min ja 3,5 m/min konehuoneen koosta riippuen. Nykytietämyksen mukaan SOLAS -sopimuksen mukaista perinteistä sammutusjärjestelmää ei ainakaan yksin voida pitää riittävänä palosuojauksena konehuoneessa.

5.2.1 Tila- vai kohdesuojaus

Vaikka SOLAS-sopimus sallii pelkän tilasuojauksen ja vaikka IMO:n sammutuskokeet on toistaiseksi tarkoitettu vain tilasuojausjärjestelmille, käytännössä olisi hyvä asentaa myös kohdesuojaus konehuoneen kriittisiin kohtiin. Kohdesuojauksen yhtenä suurena etuna on se, että todennäköisesti ainakin osa koneista voidaan pitää jatkuvasti käynnissä, jolloin laivan ohjattavuus säilyy. Kohdesuojauksen tarpeellisuutta painotetaan myös ruotsalaisessa tutkimuksessa /6/, jossa tarkasteltiin öljyspraypalojen sammuttamista vedellä. Tutkimuksessa suositeltiin kohdesammutusjärjestelmän automaattilaukaisua. Automaattilaukaisu edellyttää luotettavaa ilmaisu, mikä ei nykyään enää ole ylittämätön ongelma. Voidaan ajatella, että jo lämpöilmaisinkaapelilta saatu ylikuumenemisvaroitusta laukaisisi esimerkiksi vesisumujärjestelmän, joka jäähdyttäisi kuumia pintoja.

Vesisumuilla on tehty riskianalyysiin perustuvia kohdesuojaukskokeita konehuonetta vastaavissa tiloissa /36/. Käytetyillä vesisumujärjestelmillä suurin onnistuneesti tilasuojattu tila oli 140 m³. Tulosten perusteella kirjoittaja suosittaa riskianalyysiin perustuvaa kohdesuojauksa automaattisesti laukeavalla vesisumujärjestelmällä.

5.2.2 Kaasut

Tällä hetkellä yleisimmät konehuoneen sammutusjärjestelmät ovat CO₂- ja halonijärjestelmiä. Halonijärjestelmistä tulee lähitulevaisuudessa kokonaan luopua, ja hiilidioksidin huonona puolena on se, että yleensä aikaa kuluu vähintään 15 - 20 min palon syttymisestä, ennen kuin CO₂-järjestelmä laukaistaan. Useimmissa tapauksissa tässä ajassa ehtii tapahtua huomattavaa vahinkoa.

Nytemmin sammutusjärjestelmässä voidaan käyttää myös jotakin kaupallisesti saatavilla olevaa halonien korviketta. Yksikään korvikekaasu ei kuitenkaan ole täysin halonin veroinen. Mikään niistä ei suoraan sovellu olemassa oleviin halonisammutuslaitteistoihin, ja ne vaativat haloneja suuremman varastointitilavuuden. Korvikkeisiin liittyvä käytännön ongelma on niiden jatkuva saatavuus: suurimman osan aineista tiedetään jo nyt olevan vain väliaikaisratkaisuja ja toisaalta, koska "täydellistä" halonin korviketta jatkuvasti etsitään, tulee todennäköisesti koko ajan esiin uusia, edellisiä parempia aineita, ja vanhojen aineiden valmistus saatetaan lopettaa.

Argonpohjaiset sammutekaasut ovat varteenotettavia vaihtoehtoja, jos varastointitilavuus ei ole ongelma. Konehuoneet ovat kuitenkin niin suuria, että tarvittavat säiliötilavuudet saattavat nousta kohtuuttomiksi.

Kaikkien tunnettujen kaasujärjestelmien heikkoutena on niiden huono jäähdytysteho. Jos päädytään koko tilan kattavaan kaasujärjestelmään, olisi kuumia pintoja syytä lisäksi jäähdyttää vedellä. Toinen kaasujärjestelmien käytännön heikkous on,

että kaasun laukaisu edellyttää lähes täysin suljettua tilaa. Kaikki ilmanvaihtoaukot on suljettava ennen laukaisua, mikä yleensä viivyyttää sammutuksen aloittamista, ja jos aukkoja ei suljeta, sammutuksen edellyttämää kaasupitoisuutta ei saavuteta.

5.2.3 Vesi ja lisäaineet

Veden käyttö konehuonepalojen sammutuksessa on sen ylivertaisen jäädytystehon takia erityisen houkutteleva vaihtoehto. Vettä voidaan käyttää tilassa monin eri tavoin. Se soveltuu varmuudella kohdesuojaukseen, tilasuojauksen tehokkuudesta on saatu näyttöä, se voidaan suihkuttaa suurina pisaroina tai sumuna, ja sitä voidaan käyttää vaahdossa.

Vaahtosprinklereiden soveltuvuutta konehuoneen tilasuojaukseen tutkittiin eräässä tutkimuksessa /37/. Sprinkleriveteen sekoitettiin AFFF-vaahtonestettä siten, että muodostui kevytvaahtoa. Vaaho sammutti allaspalot tehokkaasti, eikä ilmanvaihdolla ollut vaikutusta sammutusaikoihin. Myös spraypalot saatiin sammumaan, mutta sprinklereiden sijoittelu ja tyyppi oli kriittinen, ja pahimmassa tapauksessa vettä vaadittiin 30 - 40 l/min/m². Tilan täyttönopeus vaikutti oleellisesti sammutustulokseen. Kyseinen vaahtojärjestelmä tuskin läpäisisi IMO:n palokokeita.

SOLAS -sopimuksen sallima kevytvaaho ei siten ole kovinkaan tehokas spraypalojen sammuttaja, mutta myös vaaho voidaan osoittaa tehokkaaksi tilasuojajaksi, mikäli se läpäisee IMO:n sammutuskokeet. Ainakin yksi vaahtojärjestelmävalmistaja mainostaa läpäisseensä kokeet. Pelkkien pilssialueiden suojaksi soveltuu nykytietämyksellä ainakin kalvovaahdotyyppinen raskasvaaho.

Vesisumujen käyttöä konehuoneen tila- ja kohdesuojaukseen tutkitaan jatkuvasti eri puolilla maailmaa. Suurin osa tutkimuksesta on kuitenkin luottamuksellista, yksityisten valmistajien toimesta tai toimeksiannosta tehtävää. Ainakin yksi valmistaja on läpäissyt IMO:n tilasuojaukselta testaavat palokokeet tietyin tilakokoja koskevin rajoituksin. Testejä on myös "epävirallisesti" mukaeltu kohdesuojaukseen, ja useampikin valmistaja on näin saanut testipalot sammumaan.

Kanadan laivaston tutkimuksissa /38/ on tultu siihen tulokseen, että vesisumujärjestelmät eivät sovellu hyvin suurten konehuoneiden tilasuojaukseen, ellei konehuoneita voida jakaa pienempiin suojattaviin alueisiin. Vain siten vaadittavat vesimäärät voivat pysyä käytännössä realistisissa rajoissa. Tehokas ryhmittely edellyttää kuitenkin teknisesti kehittyneitä palonilmaisua, ja Kanadan laivaston aluksiin suositellaankin seuraavia vesisumuun liittyviä rajoituksia:

- Suurin tilasuojattava tila on 200 m³.
- Muutokset palonilmaisujärjestelmään eivät ole todennäköisiä, siksi jälkiasennettava vesisumujärjestelmä on laukaistava koko tilaan, ei alueittain.
- Vesisumujärjestelmän ei tarvitse kattaa pilssialueita, vaan niissä on säilytettävä AFFF-järjestelmät.
- Vettä on tultava vähintään 3 min, minkä katsotaan riittävän miehistön hyökkäysvalmisteluihin.

Yhdysvaltalaisen tutkimuksen mukaan /39/ nykyinen vesisumuteknologia ei kykene läpäisemään IMOn konehuonetestejä, jolloin nykyiset järjestelmät eivät myöskään soveltuisi tilasuojuukseen. Tutkimuksessa tehtiin kokeita kahden eri valmistajan järjestelmillä, joiden käyttöpainet olivat n. 15 bar ja 70 bar.

Jo nyt tiedetään, että yllä mainitut johtopäätökset ovat pääosin jopa vääriä, sillä vesisumua ei voida sammutteena yleistää. Vesiumua on tarkasteltava koko järjestelmän osana. Sumun sammutustehokkuus riippuu ratkaisevasti mm. pisarakoosta ja pisaroiden tunkeutumiskyvystä, ja vesisumujärjestelmiä on lähes yhtä monta erilaista kuin on valmistajiakin.

Kaiken kaikkiaan nykytietämyksen mukaan vesisumut soveltuvat erinomaisesti kriittisten kohtien kohdesuojuukseen. Tilasuojuukseen voidaan ryhtyä IMOn testit läpäisseellä järjestelmällä. Vesisumut ovat käyttökelpoisempia kuin hajasuihkut myös siksi, että ne jäädyttävät kuumia pintoja hellävaraisemmin kuin suuret vesimäärät, jolloin mahdolliset laitevauriot voidaan kokonaan välttää. Ympäröiviä kaasuja ja mahdollisia öljysumuja vesisumut puolestaan jäädyttävät erittäin nopeasti, jolloin ainakaan lämpötilojen puolesta alue ei ole ihmisille vaarallinen.

5.2.4 Jauheet ja aerosolit

Jauheet kiinteissä tilasammutusjärjestelmissä ovat harvinaisia, kohdesammutuksessa niitä tosin käytetään. Jauheet eivät tunkeudu esteiden ohi, ja niiden jälkisiivous vaatii huomattavan työn. Aerosolit puolestaan saattaisivat olla käyttökelpoisia, mutta järjestelmät ovat vasta tutkimus- ja kehitysasteella.

5.3 SUOSITELTAVA ILMAISU JA SAMMUTUS KONEHUONEESSA

Palonilmaisui- ja sammutusjärjestelmiä tulisi tarkastella aina yhtenä kokonaisuutena, ja suunnitelmat tulisi tehdä yhteistyössä kumpienkin järjestelmien valmistajien kanssa. Tässäkin raportissa esitetyt palonilmaisui- ja sammutusjärjestelmien kuvaukset ovat osittain karkeita yleistyksiä, jotka eivät välttämättä päde kaikille yksittäisille ratkaisuille.

Seuraavassa esitetään yhteenveto konehuoneeseen soveltuvan kiinteän palosuojausjärjestelmän periaatteista. Lähtökohtana on ollut pelkästään mahdollisimman korkea paloturvallisuustaso, joka monissa tapauksissa saattaa olla suorastaan ylimitoitettu. Aiheutuvia kustannuksia ei myöskään ole arvioitu. Käytännössä tilakohtaisiin ratkaisuihin vaikuttavat riskianalyysi sekä yksittäisten palonilmaisui- ja sammutusjärjestelmien erityisominaisuudet. Viitteessä 40 on palosuojausjärjestelmää tarkasteltu yksityiskohtaisemmin (hintatiedot mukaan lukien) erään laivan esimerkitapauksessa.

Konehuoneen palosuojausjärjestelmän periaateratkaisu:

- yleisilmaisujärjestelmäksi CO-anturit ja pisteilmaisintyyppiset ionisavuilmaisimet tai näytteenottoilmaisimet
- IR-liekki-ilmaisimet valvomaan potentiaalisia öljyvuotoalueita

- sähkölaitteiden ja kaapelien läheisyyteen optiset savuilmaisimet (piste-, linja- tai näyttötoilmaisoin tilanteesta riippuen)
- kriittisten kohtien ylikuumentamista tarkkailemaan lämpöilmaisinkaapelit, jotka voivat laukaista kohdesuojauksena olevan paikallisen vesisumujärjestelmän
- koko tilan käsilaukaistavaksi sammutusjärjestelmäksi joku seuraavista
 1. IMO-kokeet läpäissyt vesisumujärjestelmä joko alueisiin ryhmiteltyinä tai koko tilaan,
 2. IMO-kokeet läpäissyt kevytvaahtojärjestelmä (tilan oltava joko miehittämätön ennen laukaisua tai välittömästi evakuoitavissa laukaisun jälkeen, vaatii jälkisiivousta),
 3. IMO-kokeet läpäissyt, halonin puhdas korvikekaasu yhdistettynä vesi-sumuilla toteutettuun jäähdyttävään kohdesuojaukseen (toistaiseksi tunnetut korvikkeet ympäristö- ja myrkyllisyysvaikutusten ja siten jatkuvuuden kannalta epävarmoja, tilan oltava suljettu ja kaasusta riippuen joko miehittämätön ennen laukaisua tai välittömästi evakuoitavissa laukaisun jälkeen),
 4. CO₂-järjestelmä yhdistettynä vesisumuilla toteutettuun jäähdyttävään kohdesuojaukseen (tilan oltava tiiviisti suljettu ja ehdottomasti miehittämätön ennen laukaisua)
- kriittisten laitteiden ja kohtien kohdesuojaukseen vesisumujärjestelmät – tapauksesta riippuen automaatti- tai käsilaukaistavat
- pilssialueille raskasvaahto- tai vesisumujärjestelmä

KIRJALLISUUSVIITTEET

1. SOLAS, International Convention for Safety of Life at Sea. International Maritime Organization, London, Consolidated Edition 1992. 543 s.
2. Iwamoto, M., Narisawa, T., Uotani, A. *Review of Engine Room Fires and Guide to Fire Prevention*. NK Tech. Bulletin . Vol.12, s. 87 - 100. 1994.
3. FP 36/INF.20 Analysis of fire casualty records. International Maritime Organization, London, 1991. 10 s.
4. Cowley, J. *Fire casualties and their regulatory repercussions*. Paper 1, IMAS 94, Fire Safety on Ships, 26 - 27 May, 1994. 28 s.
5. Jenner, B. P. *Technical and human factors in the prevention and control of shipboard fires*. Paper 2, IMAS 94, Fire Safety on Ships, 26 - 27 May, 1994. 7 s.
6. Olsson, S., Ryderman, A. *Extinguishment of oil spray fires with water*. Sveriges provnings- och forskning institut, Borås, 1990. SP Rapport. 1990:32, 67 s.
7. SOLAS, Luku II-2. *Construction - Fire protection, fire detection and fire extinction*. International Maritime Organization, London, Consolidated Edition. 1992.
8. MSC/Circ.668 *Alternative arrangements for halon fire-extinguishing systems in machinery spaces and pump rooms. ANNEX Guidelines for the approval of equivalent water-based fire-extinguishing systems as referred to in SOLAS 74 for machinery spaces and cargo pump rooms*. International Maritime Organization, London, 1994. 40 s.
9. MSC/Circ.728 *Revised test method for equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of category A and cargo pump-rooms contained in MSC/Circ.668. ANNEX Amendments to the test method for equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of category A and cargo pump-rooms contained in MSC/Circ.668. Annex, Appendix B*. International Maritime Organization, London, 1996. 2 s.
10. FP 41/WP.7/ANNEX 3 *Test method for fire testing of fixed gas fire-extinguishing system*. International Maritime Organization, London, 1996. 12 s.
11. Burry, P. *The principles of fire detection. Part 1: Introduction*. Fire Surveyor. Vol 9, No 4, s. 46 - 53, 1980.
12. Burry, P. *The principles of fire detection. Part 2: Heat detectors*. Fire Surveyor. Vol. 9, No. 6, s. 21 - 27, 1980.
13. Willey, M. *Line type heat detectors - their operation and application* Fire Surveyor, Vol 21, No. 2, s. 8 - 12, 1992.
14. Northey, J. W. *Smoke detectors: optical or ionization* Fire Surveyor, Vol. 9, No. 2, s. 20 - 23, 1980.

15. Hemond, R., Wendt, R. *The technology of infrared and ultraviolet detection*. Fire Journal, Vol 77, No. 4, s. 86 - 89, 1983.
16. Middleton, J. F. *Flame detectors*. Proceedings of AUBE-89, 9. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, 26. - 28.9.1989 Duisburg, Saksan Liittotasavalta. Aachen: Mainz 1989. S. 143 - 154..
17. Pfister, G. *Detection of smoke gases by solid state sensors - a focus to research activities*. Fire Safety Journal, Vol. 6, s. 165 - 174, 1983.
18. Falco, L., Debergh, P. *Optical fiber alarm system* Proceedings of AUBE-89. 9. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, 26. - 28.9.1989 Duisburg, Saksan Liittotasavalta. Aachen: Mainz. S. 171 - 180.
19. Johnson, P.F. *Very early smoke detection for computer and telecommunications industries* Fire Safety Journal, Vol 14, s. 13 - 24. 1988.
20. Johnson, P. F. *Sampling systems for very high sensitivity smoke detectors*. Proceedings of IFPEI-V, International Fire Protection Engineering Institute, 21. - 31.5.1989, Carleton University, Ottawa, Ontario, Kanada.
21. Skala, G. F. *The IFD II - A new generation fire detection system*. Proceedings of AUBE-89, 9. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung, 26. - 28.9.1989 Duisburg, Saksan Liittotasavalta. S. 181 - 197.
22. Kohl, D., Kelleter, J. *Detection of smouldering fires by gas emission*. 10. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung AUBE 95, Proceedings. Aachen: Mainz 1995. S. 223 - 239.
23. Drache, T., Hahne, J. *Untersuchungen zur Ansprechwahrscheinlichkeit von Branderkennungssensoren unter realen Entdeckungsbedingungen im Schiffsbetrieb*. 10. Internationale Konferenz über Automatische Brandentdeckung AUBE 95, Proceedings. Aachen: Mainz 1995. S. 472 - 481.
24. Proceedings of the Halon Alternatives Technical Working Conference 1993, Albuquerque, New Mexico, May 11 - 13, 1993. 677 s.
25. Proceedings of the Halon Options Technical Working Conference 1994, Albuquerque, New Mexico, May 3 - 5, 1994. 588 s.
26. Proceedings: Advances in Detection and Suppression Technology. SFPE 1994. Engineering Seminars, San Francisco, California, May 16 - 18, Society of Fire Protection Engineering 1994. 100 s.
27. Grant, C. C. *Halon and Beyond: Developing New Alternatives*. NFPA Journal, Vol. 88, No. 6, s 40 - 54, 1994.
28. Rules and Regulations, Federal Register 1995. Vol. 60, No. 145, s. 38729 - 38733.
29. DiNunno, P. J. *Halon replacement clean agent total flooding systems*. Section 4/Chapter 7 in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Eds. DiNunno P. J. et al. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.

30. Forssell, E. W., DiNenno, P. J., Peatross, M. J. *Thermal Decomposition Product Evaluation of Alternative Agents for Use in Total Flooding Fire Protection Systems*. Julkaisematon.
31. Cash, T. *Fighting fires with foam, Part 2*. Fire Safety Engineering 1995. Vol. 12, No. 4, s. 9 - 14. 1995.
32. Tuomisaari, M. *Vesisumujärjestelmät sammutustekniikassa*. VTT Tiedotteita, Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus 1996.
33. Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems. Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, November 4 - 5, 1993. SP Report 1994:03. 175 s.
34. Mawhinney, J. R. *Water Mist Suppression Systems May Solve an Array of Fire Protection Problems*. NFPA Journal Vol. 88, No. 3, s. 46 - 57. 1994.
35. Kokkala, M., Andsten, T., Björkman, J. *Extinguishment of liquid fires with sprinklers and water sprays. Description of the tests*. VTT Tutkimuksia 593. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus 1989. 35 s., liitt. 145 s.
36. McKay, R. S. *Fine water spray fire suppression alternative to halon 1301 in machinery spaces - machinery space risk analysis*. Paper 12, IMAS 94, Fire Safety of Ships, 26 - 27 May, 1994. 95 s.
37. Ingason, H., Persson, H., Ryderman, A. *Foam sprinklers as a replacement for halon in engine rooms*. Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, SP Report 1992: 37. 45 s.
38. Mawhinney, J. R. *Water mist fire suppression systems for marine applications: a case study*. Paper 11, IMAS 94, Fire Safety of Ships, 26 - 27 May, 1994. Ks. 36. 12 s.
39. Bill, Jr. R. G., Charlebois, D., Waters, D. L., Richards, K. *Summary of water mist fire tests for Class II & III engine rooms*. Factory Mutual Preliminary Technical Report, 1995. 25 s.
40. Kojo, J. Diplomityö, TKK Laivalaboratorio 1996. Valmisteilla.