

STUK-YTO-TR 82
MAALISKUU 1995

Uudet sammutusmenetelmät

Maarit Tuomisaari
VTT Rakennustekniikka
Palotekniikka

Tutkimuksen johto Säteilyturvakeskuksessa
Jouko Marttila

Tutkimus on tehty Säteilyturvakeskuksen tilauksesta.

SÄTEILYTURVAKESKUS
PL 14, 00881 HELSINKI
(90) 759 881

ISBN 951-712-037-0
ISSN 0785-9325

Painatuskeskus Oy
Helsinki 1995

TUOMISAARI, Maarit (VTT Rakennustekniikka). Uudet sammutusmenetelmät. STUK-YTO-TR 82. Helsinki 1995. 24 s.

ISBN 951-712-037-0

ISSN 0785-9325

Avainsanat: ydinvoimalaitos, palontorjunta, uudet palojen sammutusmenetelmät, halonien korvaaminen

TIISTELMÄ

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan uusimpia sammutusaineita ja -menetelmiä, joita on viime vuosina kehitetty pääasiassa halonien korvikkeiksi tai niiden vaihtoehdoiksi. Täydellistä halonien korviketta ei ole vielä löydetty, mutta siihen liittyvää tutkimusta tehdään laajasti eri puolilla maailmaa. Vaikka tutkimuksen motivaationa onkin ollut lähivuosina kokonaan kiellettävien halonien korvaaminen, tutkimus on merkittävästi edistänyt koko sammutustekniikan kehittymistä. Markkinoille on tullut uusia sammutusaineita, ja -menetelmiä, jotka mahdollisesti ilman halonikieltoa olisivat jääneet kehittämättä. Palontorjunnan lähtökohtia on jouduttu arvioimaan kokonaan uudelleen, ja voidaankin todeta, että monet perinteiset sammutusmenetelmät mutta etenkin uudet menetelmät yhdessä luotettavan palonilmaisujärjestelmän kanssa muodostavat tehokkaan palosuojauksen lähes kaikissa ajateltavissa olevissa tiloissa.

TUOMISAARI, Maarit (Technical Research Centre of Finland). Newest fire extinguishing methods. STUK-YTO-TR 82. Helsinki 1995. 24 p.

ISBN 951-712-037-0

ISSN 0785-9325

Keywords: nuclear power plant, fire protection, newest fire extinguishing methods, replacements or alternatives to halons

ABSTRACT

Newest fire extinguishing media and methods developed during the last few years as replacements or alternatives to halons are reviewed in this study. No perfect replacement has been found yet but it is being looked for widely around the world. Even though the motivation of most of the research has been to replace halons, the use of which will be almost totally banned in the near future, the research has forwarded the development of all the areas of suppression technology. New suppression agents and methods have appeared in the market which - without the ban of halons - probably would never have been discovered. The whole basis of fire safety engineering has had to be reconsidered, and it may be concluded that many old but especially new extinguishing methods together with a modern fire detection system form an efficient fire protection system in almost any building and construction.

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
TIIVISTELMÄ	
ABSTRACT	
ALKUSANAT	
1 JOHDANTO	7
2 SAMMUTUSMEKANISMIT	8
3 HALONIT	9
3.1 Yleistä	9
3.2 Sammutusmekanismit	9
3.3 Ympäristövaikutukset /4,5/	10
4 HALONEJA KORVAAVAT AINEET	11
5 HALONIEN VAIHTOEHDOT	14
5.1 Perinteiset sammutteet ja menetelmät	14
5.1.1 Vesi ja lisäaineet	14
5.1.2 Hiilidioksidi	16
5.1.3 Jauheet	16
5.2 Uudet sammutteet ja menetelmät	17
5.2.1 Kaasut	17
5.2.2 Aerosolit	17
5.3 Vesisumut	18
5.3.1 Yleistä	18
5.3.2 Sammutustehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä	19
5.3.3 Kaupalliset vesisumujärjestelmät	20
5.3.4 Standardit ja määräykset	21
6 ERITYISTILOJEN PALOSUOJAUS	22
6.1 Elektroniikkatilat	22
6.2 Kaapelitilat	23
VIITTEET	24

ALKUSANAT

Tutkimus on tehty Säteilyturvakeskuksen rahoituksella tilauksen 25/410/94 mukaisesti. Säteilyturvakeskuksen yhdyshenkilö tutkimuksessa on ollut ylitarkastaja Jouko Marttila.

1 JOHDANTO

Halonit on YK:n ympäristöohjelmaan liittyvän ns. Montrealin pöytäkirjan (1987) nojalla jo osittain kielletty ja tullaan lähes kokonaan kieltämään siten, että esimerkiksi ydinvoimaloissa halonien käyttö on kielletty vuoden 2000 alusta lähtien. Uusien halonien tuotanto ja kulutus on lähes kaikkialla jo lopetettu vuoden 1994 alusta lähtien. Ns. välttämättömien kohteiden halonin saanti on tarkoitus turvata esimerkiksi maakohtaisista halonipankeista.

Tuotannon lopettaminen ja käytön kieltäminen ei liity halonien sammutustehokkuuteen. Halonit ovat erinomaisia sammutteita: niiden sammutustehokkuus on poikkeuksellisen hyvä, ne ovat sähköä johtamattomia ja suhteellisen vaarattomia ihmisille, ne hajoavat nopeasti eikä niistä jää palotilaaan jälkisiivousta vaativaa jätettä. Haloneja onkin pitkään käytetty monien erityisilojen palosuojauksessa. Tyypillisiä haloneilla suojattuja erityistiloja ovat esimerkiksi erilaiset elektroniikkatilat, palavia nesteitä sisältävät tilat, lentokoneet, museot ja kirjastot.

Syinä halonien kieltämiseen ovat niiden tuhoisat ympäristövaikutukset: halonit ovat Montrealin pöytäkirjan säännöstelemistä aineista tehokkaimmat maapalloa suojaavan ilmakehän otsonikerroksen tuhoamisessa. Halonien merkitys otsonikadossa paljastui odotettuakin suuremmaksi vasta Montrealin pöytäkirjan allekirjoittamisen jälkeen, ja alkuperäistä halonien käytön rajoittamista säätelevää aikataulua on jouduttu jälkeensä vielä kiristämään.

Halonien asteittainen häviäminen kiinteissä sammutuslaitteistoissa ja käsisammuttimissa on avannut laajat markkinat korvaaville ja vaihtoehtoisille sammutteille. Siksi kaikkialla maailmassa tehdään kuumeisesti tutkimusta ja tuotekehitystä uusien ympäristöystävällisten sammutteiden löytämiseksi /1-4/. Täydellistä halonien *korviketta* ei vielä ole löydetty, vaikka useita korvikkeina mainostettuja aineita onkin jo kaupallisesti saatavilla. Meneillään oleva tutkimus on hyödyttänyt merkittävästi myös muuta sammutustekniikkaa, ja halonien *vaihtoehdot* ovatkin tällä hetkellä erittäin varteenotettavia ehdokkaita monissa halonien käyttösovellutuksissa mutta myös lukuisissa muissa kohteissa.

Koska nimenomaan halonien kieltäminen on ollut pääasiallinen motivaatio viime vuosien sammutusteknisen tutkimuksen lisääntymiselle, myös tässä tutkimuksessa tarkastellaan uusia sammutusaineita ja -menetelmiä vertaamalla niitä haloneihin. Vertailun helpottamiseksi luvussa 2 esitetään ensin lyhyesti tunnetut sammutusmekanismit. Luvussa 3 käsitellään halonien ominaisuuksia sekä syitä ensinnäkin niiden erinomaisuuteen sammutustekniikassa ja toisaalta niiden tuhoisiin ympäristövaikutuksiin. Lukuun 4 on koottu tällä hetkellä tunnettuja halonien korvikkeita ja lukuun 5 halonien vaihtoehtoja. Luvussa 6 tarkastellaan erityiskohteena (ydinvoimaloiden) elektroniikka- ja kaapelitilojen palosuojauksena ja esitetään suojaukselle periaateratkaisuja.

2 SAMMUTUSMEKANISMIT

Palamisella on neljä perusedellytystä:

- palamiskykyinen aine,
- energia palamisen käynnistämiseksi ja ylläpitämiseksi,
- happi sekä
- häiriintymätön kemiallinen ketjureaktio.

Jos mikä tahansa perusedellytyksistä poistetaan, palo sammuu. Sammutusmekanismit jaetaan neljään eri pääryhmään sen mukaan, mikä palamisen perusedellytyksistä poistetaan:

- 1) Sammutusraivaus:
Palamiskykyinen aine poistetaan palotilasta
- 2) Jäähdytys:
Palavan aineen lämpötila lasketaan alle syttymislämpötilan tai liekin lämpötila lasketaan niin alhaiseksi, että reaktioiden lämmön-
tuotto ei riitä ylläpitämään palamista.
- 3) Tukahduttaminen:
Happipitoisuus pienennetään alle syttymis-

rajan. Palava pinta voidaan myös peittää siten, että polttoaine ja happi eivät pääse sekoittumaan.

- 4) Inhibitio eli kemiallinen sammutus:
Palamisen ketjureaktio katkaistaan.

Yllämainituista menetelmistä sammutusraivaus on esimerkiksi ydinvoimaloissa käytännön mahdollisuus eikä sitä käsitellä tässä tutkimuksessa.

Palaminen tapahtuu lähes aina kaasumaisessa muodossa. Kaasuilla palamisnopeus riippuu niiden pitoisuudesta ilmassa. Nesteiden ja kiinteiden aineiden palamisnopeus riippuu yleensä siitä, miten nopeasti niistä muodostuu palamiskykyisiä kaasuja. Palamisen jatkumisen edellytyksenä on tietty palamiskykyisen kaasun ja ilman seos. Kaikki sammutusmenetelmät muuttavat kyseisen seoksen suhteita siten, että palaminen ei ole enää mahdollista.

3 HALONIT

3.1 Yleistä

Haloni¹ ovat kaasumaisia halogenoituja hiilivetyjä, joissa yksi tai useampia vetyatomeita on korvattu halogeeniatomeilla (fluori, kloori, bromi ja jodi). Halonien tyyppimerkinnässä ilmoitetaan, kuinka monta hiiliatomia ja kutakin halogeeniatomia edellä olevassa järjestyksessä ko. halonimolekyylissä on. Sammutustekniikassa yleisimmin käytetyt halonit ovat täysin halogenoituja hiilivetyjä, ja ne on lueteltu taulukossa I.

Taulukko I. Sammutustekniikassa käytetyimmät halonit.

Tyyppi	Kemiallinen kaava
1211	CF ₂ ClBr
1301	CF ₃ Br
2402	C ₂ F ₄ Br ₂

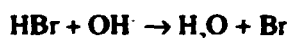
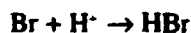
Suomessa käytössä ovat olleet vain halonit 1211 ja 1301. Haloni 1211 pysyy normaalipaineessa nesteinä aina -4°C lämpötilaan saakka, ja n. 10 bar paineistetussa säiliössä se on nestemäinen normaalilämpötilassa. Säiliöstä purkautuvasta halonista osa on nestemäisessä muodossa, mikä kasvattaa sammutteen kantamaa. Haloni 1211 on ns. 'streaming agent', joten se soveltuu *kohdesuojaukseen*. Sitä käytetäänkin nimenomaan käsisammuttimissa.

Halonin 1301 höyrynpaine on korkeampi, joten se purkautuu lähes kokonaan kaasuna. Koko suojelettavaan tilaan saadaan nopeasti riittävä halonipitoisuus. Haloni 1301 on ns. 'total flooding agent', joten se soveltuu *tilasuojaukseen*. Sitä käytetäänkin nimenomaan kiinteissä sammutuslaitteistoissa. Tilasuojaus edellyttää aina suljettua ja riittävän tiivistä tilaa, jotta sammu-

tuksen edellyttämää sammutepitoisuutta voitaisiin ylläpitää riittävän kauan.

3.2 Sammutusmekanismit

Halonien pääasiallinen sammutusmekanismi perustuu siihen, että ne katkaisevat palamisen ketjureaktioita. Halonimolekyylit hajoavat lämmön vaikutuksesta, ja vapautuneet halogeenit poistavat palamisreaktioissa välituotteina olevia vetyatomeja ja hydroksidi-ioneja muodostaen niistä vettä. Halonien vaikuttaessa voi tapahtua esimerkiksi seuraavia reaktioita:



Halonimolekyylien lämmittäminen ja hajottaminen sitoo lämpöä, joten halonit myös jäädyttävät palotilaa - joskaan eivät läheskään niin tehokkaasti kuin esimerkiksi vesi. Siksi, vaikka suljetussa tilassa palo voi sammua sekunneissa, uudelleensyttymisen estämiseksi vaadittavaa pitoisuutta on ylläpidettävä ainakin 10 min. Halonien sammuttava pitoisuus palotilassa on 3 ... 8 %. Happipitoisuus tilassa laskee niin vähän, ettei se ole ihmiselle vaarallista. Haloneista ei myöskään jää palotilaan mitään jälkisiivousta vaativaa jätettä.

Haloneja on puhtautensa ja tehokkuutensa takia käytetty monenlaisissa erityistiloissa kuten elektroniikkaa, taidekokoelmia tai muita arvoesineitä sisältävissä tiloissa. Halonit sammuttavat tehokkaasti myös palavia nesteitä, joten ne ovat olleet käytössä myös lentokoneissa, laivojen konehuoneissa ja palavien nesteiden valmistus-, pumpaus- ja säilytystiloissa.

3.3 Ympäristövaikutukset /4,5/

Halonien vapautuessa ilmakehään ne nousevat ylempiin stratosfääriin, jossa auringon säteily hajottaa molekyylit. Vapaat Br- ja Cl-radikaalit aloittavat tuhoisan ketjureaktion, jossa ne ensin kaappaavat otsonimolekyylistä yhden happiatomin ja jälleen useassa reaktiossa irrottautuvat vapaiksi radikaaleiksi, jotka jälleen hajottavat otsonia jne. Yksi bromiatomi voi käynnistää reaktion, jossa tuhoutuu satoja tuhansia otsonimolekyylejä, ennenkuin radikaali pyyhkiytyy vielä ylempiin ilmakehään, troposfääriin.

Kaasujen otsonikerrosta tuhoavaa vaikutusta kuvataan ns. ODP-arvolla (ozone depletion potential), ja se on haloneilla suurempi kuin millään muulla Montrealin pöytäkirjan säännöstenmällä aineella. Toinen kaasujen ympäristövaikutusta kuvaava parametri on ns. GWP-arvo (global warming potential), joka kuvaa kaasusta aiheutuvaa ilmakehän lämpenemistä eli kaasun kykyä absorboida infrapunasäteilyä. Montrealin pöytäkirja ei käsittele ilmakehän lämpenemistä eli kasvihuoneilmiötä, mutta käytännössä se aina määritellään kaasumaisille sammutteille ja se myös vaikuttaa sammutteen yleiseen hyväksyntään. Myös yhdisteen elinaika ilmakehässä saate-

taan ilmoittaa: mitä pidempi elinaika, sitä enemmän voi aiheutua tuhoja.

Sekä ODP- että GWP-arvot ovat suhteellisia lukuja. ODP-arvon referenssinä on erään täysin halogenoidun kloorifluorihiilivety-yhdisteen (CFC-11) arvo (ODP = 1.0). GWP-arvon referenssinä on joko CFC-11:n tai hiilidioksidin ilmakehää lämmittävä vaikutus (GWP = 1). Sitä, kumpaa referenssiä kulloinkin on käytetty, ei aina ilmoiteta, mikä voi aiheuttaa sekaannusta. Saman aineen GWP voi olla esimerkiksi 1200 hiilidioksidiin verrattuna ja 0.26 CFC-11:n verrattuna. Käytetään referenssinä kumpaa tahansa, GWP-arvoissa voi esiintyä melkoista hajontaa kirjallisuuslähteestä riippuen. Ja edelleen, oli referenssi mikä tahansa, ideaalisessa sammutteessa sekä ODP- että GWP-arvot ovat nollija. Halonien ympäristövaikutukset on esitetty taulukossa II.

Taulukko II. Halonien ympäristövaikutukset.

Haloni	ODF	GWP (CO ₂)
1211	3,0	
1301	10,0	5800
2402	6,0	

4 HALONEJA KORVAAVAT AINEET

Haloneja korvaavilla aineilla /1-4/ tarkoitetaan aineita, joiden sammutusmekanismi on sama kuin haloneilla. Parhaassa tapauksessa olemassaoleviin halonisammutuslaitteistoihin voitaisiin vain vaihtaa sammutusaine (ns. "drop-in" -korvikke).

Haloneja korvaavien aineiden tutkimus on keskittynyt toisiin halogenoituihin hiilivetyihin, ts. korvikke-ehdokkaatkin ovat pääasiassa haloneja. Haloninimitystä ei niistä kaupallisissa esitteissä juurikaan käytetä todennäköisesti nimen huonon maineen takia. Tässäkin tutkimuksessa haloninimitystä käytetään vain tarkoitettaessa taulukon I sammutusaineita, muita haloneja käsitellään yleisen käytännön mukaisesti halonien korvikkeina.

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 sammutusaineisiin verrattuna on, että yhdisteissä ei ole bromia eivätkä kaikki ole täysin halogenoituja.

Yhdysvaltain ympäristösuojeluvirasto, 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 niiden myrkyllisyys, sammutus tehokkuus, fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, vaikutus otsonikerrokseen, elinikä, vaikutus kasvihuoneilmiöön sekä aineiden kaupallinen saatavuus. Lääketieteellinen myrkyllisyys on arvioitu tarkastelemalla aineiden vaikutusta sydämen toimintaan. Tätä vaikutusta kuvataan kahdella eri pitoisuusparametrilla, NOAEL (no observed adverse effect level) ja LOAEL (lowest observed adverse effect level), jotka osaltaan määräävät aineiden soveltuvuuden miehittyihin

tiloihin. Niiden ja tilasta arvioitun poistumisajan avulla määrätään myös korkeimmat sallitut pitoisuudet.

Taulukkoon III on koottu EPA:n vuoden 1994 SNAP-listasta haloneja korvaavat aineet, jotka on jaettu kahteen pääryhmään, kohdesuojaukseen ja tilasuojaukseen (miehitetyt ja miehittämättömät tilat) soveltuvat aineet. Aineille on annettu myös kemiallinen kaava tai seoksen koostumus sekä ODP- ja GWP-arvot, mikäli ne ovat olleet löydettävissä.

Mikään taulukon III aineista ei sovellu suoraan halonin korvikkeeksi, ts. halonilaitteistoja ei sellaisenaan voida käyttää uudella aineella täytettyinä. Seuraavat ominaisuudet ovat yhteisiä laikille mainituille korvikkeaineille:

- Ne ovat nesteytettyjä kaasuja.
- Ne ovat puhtaita, aineet höyrystyvät välittömästi eivätkä likaa palotilaa.
- Ne ovat sähköä johtamattomia.
- Kiinteitä halonisammutuslaitteistoja voidaan soveltaa tietyin muutoksin: varastointilavuus on suurempi ja vähintäänkin suuttimet on vaihdettava.
- Aineista syntyy haloneja enemmän hajoamistuotteita, pääasiassa fluorivetyä.
- Aineiden kilohinta on haloneja korkeampi.
- Korvikkeaineilla on haloneja huomattavasti pienempi ODP-arvo, sen sijaan GWP-arvo on usein haloneja suurempi.

Osa SNAP-listan aineista on vain väliaikaisratkaisuja, sillä esimerkiksi FM-100 tullaan poistamaan käytöstä vuoden 1996 alkuun mennessä, ja kaikille HCFC-yhdisteille ollaan asettamassa rajoituksia. Tavoitteena on, että HCFC-yhdisteiden käyttö lopetetaan vuoteen 2030 mennessä, EU-maissa käytön takarajaksi saattaa tulla 1.1.2003. Kaikilla HCFC-yhdisteillä ODP > 0, HFC- ja FC-yhdisteillä ODP = 0, mutta GWP

Taulukko III. Haloneja korvaavia puhtaita aineita.

Tyyppi-merkintä	Kemiallinen kaava	Kauppanimi	ODP	GWP (CO ₂ /CFC-11)
<i>Kohdesuojaus</i>				
HBFC-22B ₁	CHF ₂ Br bromidifluorimetaani	FM-100	0.74	
HCFC seos B	HCFC-123 + ?	Halotron I	0.02	90/
HCFC seos C		NAF P-III		
HCFC seos D		Blitz III		
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃ diklorotrifluorietaani	FE-232	0.02	85/0.02
HCFC-124	CHClFCF ₃ klorotetrafluorietaani	FE-241	0.02	430/0.1
FC-5-1-14	CF ₃ CF ₂ CF ₂ CF ₂ CF ₃ perfluoriheksaani	PFC/CEA-614	05200/	
<i>Tilasuojaus (miehitetyt tilat)</i>				
HFC-227ea	CF ₃ CHFCF ₃ heptafluoripropaani	FM-200	0	> 2000/0.6
HCFC seos A	HCFC-22 (82%) HCFC-123 (4.75%) HCFC-124 (9.5%)	NAF S-III	> 0.02	90-1600/
HFC-23	CHF ₃ trifluorimetaani	Kaltron/Solkaflam 23, FE-13	0	9000/
FC-3-1-10	CF ₃ CF ₂ CF ₂ CF ₃ perfluoributaani	PFC/CEA-410	0	5500/
	CF ₃ CF ₂ CF ₃	PFC-218/CEA-308	0	
<i>Tilasuojaus (miehittämättömät tilat)</i>				
HBFC-22B ₁	CHF ₂ Br bromidifluorimetaani	FM-100	0.74	
HCFC-22	CHClF ₂ klooridifluorimetaani		0.055	1500/0.34
HCFC-124	CHClFCF ₃ klooritetrafluorietaani	FE-241	> 0.02	430/0.1
HFC-125	CHF ₂ CF ₃ pentafluorietaani	FE-25	0	3400/0.58
HFC-134a			0	1200/0.26
(haloni)13001	CF ₃ I joditrifluorimetaani	Triodide	0.009	= 0

vaihtelee ja elinikä ilmakehässä voi olla pitkä. Etenkin FC-yhdisteiden GWP on suuri ja elinikä pitkä. Kaikki ympäristövaikutukset tulevat jat-

kossa vaikuttamaan aineiden hyväksyntään. Varmaa ei myöskään ole, kauanko valmistajat aikovat aineita tuottaa.

Mitään kohdesuojaukseen tarkoitettuista aineista ei saisi käyttää asuintiloissa, ja CEA-614 soveltuu vain tiloihin, joissa ei ole kerrassaan mitään muuta vaihtoehtoa. 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. Puhtaila aineilla tarkoitetaan joko kaasumaisia tai lähes välittömästi höyrystyviä aineita, jolloin ne eivät likaa palotilaa. Standardissa annetaan myös ohjeet järjestelmän suunnittelusta ja asennuksesta. Vuoden 1994 painos sisältää kahdeksan sammutusainetta, joista seuraavat seitsemän ovat taulukossa III mainittuja halonien korvikkeita: PFC/CEA-410, FM-200, NAF S-III ja FE-13 miehitettyihin tiloihin ja FM-100, FE-241 ja FE-25 miehitättämiin tiloihin.

Kehitteillä on myös standardi NFPA 2002 (Recommended Practice for Fire Protection of Special Occupancies), jossa tullaan antamaan suosituksia lähinnä haloneilla aiemmin suojattujen erityistilojen palosuojaukselle.

Miehitettyjen tilojen tilasuojaukseen soveltuvia aineita tarkastellaan seuraavassa hieman yksityiskohtaisemmin.

FM-200: Sammuttamiseen tarvittava pitoisuus ilmassa on n. 7 t-%. Hajoamisessa syntyy runsaasti fluorivetyä, HF. Haloniin verrattuna tarvittava sammutemäärä ja varastointitilavuus on n. 1.7-kertainen. Halonien tapaan se varastoidaan 25 bar säiliöihin, mutta muuten olemassaolevan halonilaitteiston käyttö edellyttää lisäsäiliöitä sekä putkisto- ja suutinmuutoksia.

NAF S-III: Käytettävät pitoisuudet ovat n. 9 t-%. Haloniin verrattuna tarvittava varastointitilavuus on n. 1.4-kertainen, muuten se sopii olemassa oleviin halonilaitteistoihin vain suutinmuutoksin. NAF S-III on kuitenkin vain väliaikainen vaihtoehto, sillä kaikkien HCFC-yhdisteiden tuotanto lopetettaneen vuoteen 2030 mennessä. Valmistaja mainostaa NAF S-III:a halonien ainoana "drop-in"-korvikkeena, koska vaaditut muutokset halonilaitteistoihin ovat pienehköt.

FE-13 jne.: Kolmella eri kauppanimellä myytävä trifluorimetaani on halonin 1301 edelläkävijä. Sammuttava pitoisuus on n. 15 t-%. Vaikutus kasvihuoneilmiöön on merkittävä. Käytännössä varastointitilavuus on niin suuri ja säiliöpaine niin korkea, ettei sitä juurikaan voi soveltaa olemassaoleviin halonilaitteistoihin.

CEA-410: Käytettävät pitoisuudet ovat n. 7 t-%. Aineen elinikä ilmakehässä on pitkä (2500 v) ja se vaikuttaa maapallon lämpenemiseen. Haloniin verrattuna tarvittava sammutemäärä on n. 1.9-kertainen ja varastointitilavuus 1.7-kertainen. Sekä CEA-410:n että CEA-308:n käyttö on rajoitettu kohteisiin, joissa mikään muu sammutte ei tule kysymykseen.

Yhdysvalloissa on jo myönnetty ensimmäisiä ainekohtaisia hyväksyntöjä. Yllämainituista 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 ainekohtaisia hyväksyntöjä tulee todennäköisesti koko ajan lisää, koska uusien aineiden testaus on jatkuvaa.

UL:n hyväksynät perustuvat standardiin UL 1058 (Standard for Halogenated Agent Extinguishing System Units), joka kehitettiin alunperin haloni 1301 -laitteistoille. Standardin asettamia vaatimuksia on kuitenkin osittain tiukennettu, jotta uusiin aineisiin liittyvät epävarmuustekijät tulisivat riittävästi kompensoiduiksi. Esimerkiksi, kun halonin tuli sammuttaa testipalo 60 s:ssä, tulee uuden aineen sammuttaa se 30 s:ssä. Standardi sisältää sekä komponenttitestausta että palokokeita.

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

5 HALONIEN VAIHTOEHDOT

Halonien käyttöä voidaan yleisesti ottaen pienentää minimoimalla palon todennäköisyyttä rakenteellista palosuojausta parantamalla, sopivilla materiaalivalinnoilla sekä asentamalla tilaan palonilmaisujärjestelmä. Palonilmaisujärjestelmien toimintaa ei tässä tutkimuksessa tarkastella, niihin liittyvä katsaus löytyy viitteestä 6. Varsinaisia sammutevaihtoehtoja on EPA:n SNAP-listasta koottu taulukkoon IV. Listassa on sekä vanhoja, perinteisiä aineita että aivan uusia aineita ja menetelmiä. Listalle ovat ehdolla myös Argoniten ja MinimARin seos sekä kaksi vesisumua. Uusista aineista Inergeniiä käsitellään NFPA 2001 -standardissa, ja sillä on UL:n ja FM:n hyväksynnät. Seuraavassa käsitellään lähes kaikkia tilasuojaukseen soveltuvia vaihtoehtoisia aineita yksityiskohtaisemmin siten, että painotus on nimenomaan uusilla aineilla ja menetelmillä. Uusista menetelmistä painotus on puolestaan vesisumuteknologioilla, koska sen hyväksikäyttö edellyttää paljon syvempää sammutustekniikan ymmärrystä kuin minkään muun kaupallisen sammutustekniikan.

5.1 Perinteiset sammutteet ja menetelmät

5.1.1 Vesi ja lisäaineet

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. Vesijäähdytyksen tehokkuus riippuu höyrystymisnopeudesta, joka on yleensä sitä suurempi mitä pienempiä pisarat ovat.
- Höyrystyminen myös laimentaa palotilan happipitoisuutta, sillä veden tilavuus kasvaa yli 1700-kertaiseksi, kun se höyrystyy. Höyryn ulosvirtaus myös estää ilmavirtauksen sisään. Happipitoisuuden pieneneminen rajoittaa palamisnopeutta ja voi tukahduttaa palon kokorajan.
- Kolmas sammutusmekanismi ei perustu höyrystymiseen, vaan pienet pisarat jo sellaisenaan vaimentavat säteilylämmönsiirtoa siten, että absorboitujen lämpösäteilyä liekin ja palamiskykyisten aineiden välillä. Silloin vielä palamattomien pintojen syttyminen voi estyä ja jo palavien pintojen palamisnopeus pienetä.

Vettä käytetään perinteisesti mm. käsiammuttimissa, palokuntien suihkuputkissa ja kiinteissä sprinklerilaitteistoissa. Automaattisista sammutusjärjestelmistä sprinklerilaitteistoista on pitkäaikaisin, yli 100 vuoden kokemus. Erään yhdysvaltalaisen tutkimuksen mukaan sprinklerien sammuttamista paloista yli 97 % oli sellaisia, joissa korkeintaan kolme sprinkleriä laukesi, ts. palo saatiin tehokkaasti rajatuksi jo palon alkuvaiheessa. Suomessa Teollisuusvakuutuksen vakuuttamistaan kohteista keräämän tilaston mukaan 80 % paloista saadaan sammumaan siten, että korkeintaan kuusi sprinkleriä on lauennut. Sprinklerit eivät siten yleensä aiheuta suuria vesivahinkoja, ja ne sopivat hyvin kaikkiin sellaisiin tiloihin, joissa vesivahinkoja ei tarvitse kokonaan välttää eikä veden riittävyys aiheuta ongelmia.

Sprinklerit eivät yleensä sammuta nestepaloja luotettavasti, mikäli nesteen leimahduslämpötila on alle 60 °C, mutta ne jäädyttävät kuitenkin palotilan rakenteita niin tehokkaasti, että palo voidaan saada rajatuksi. Sprinklerit eivät sovi tiloihin, joissa on korkeita jänitteitä. Veden käyttöä tulee myös varoa eräiden metallien palossa. Sprinklerien soveltuvuudesta, asennuksesta ja vaatimuksista on runsaasti julkaistua tietoa, Suomessa sprinklerilaitteistot rakennetaan Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskushiton julkaisemien ohjeiden mukaisesti [7].

Taulukko IV. Vaihtoehtoisia sammutusaineita.

Sammutus- tyyppi	Aine	Kauppanimi	Sovellutus
<i>Kohdesuojaus</i>			
Neste	Vesi		käsiammuttimet sprinklerit
Neste	Vaaho		käsiammuttimet sprinklerit
Kaasu	CO ₂		käsiammuttimet kiinteä laitteisto
Jauhe	Kuivakemikaali		käsiammuttimet
Aerosoli	Hiilivetygeeli/ kuivakemikaalisuspensio	PGA	
<i>Tilasuojaus (miehitetyt tilat)</i>			
Neste	Vesi		sprinklerit
Kaasu	CO ₂		kiinteä laitteisto (evakuointi ennen laukaisua)
Kaasu	N ₂ (52%), Ar (40%), CO ₂ (8%)	Inergen (IG 541)	kiinteä laitteisto (nopea evakuointi)
<i>Tilasuojaus (miehittämättömät tilat)</i>			
Kaasu	N ₂ (50 %), Ar (50 %)	Argonite (IG 55)	kiinteä laitteisto (mahdollisesti myös miehitetyt tilat)
Kaasu	jalokaasuseos	MinimAR	kiinteä laitteisto
Kaasu/aerosoli	jalokaasu/ jauheaerosoliseos	FS 0140	
Aerosoli	hiilivetygeeli/ kuivakemikaalisuspensio	PGA	
Aerosoli	kuivakemikaali	SFE	

Veden sammutustehokkuutta voidaan edelleen parantaa käyttämällä erilaisia lisäaineita. Yleisesti ottaen veden tunkeutumista huokosiin aineisiin voidaan helpottaa lisäämällä siihen pintajännitystä alentavia aineita kuten erilaisia pesuaineita. Uudelleensyttymistä voidaan estää käyttämällä tunnettuja liekinestoaineita, jotka jäävät sammutetuille pinnoille. Yleisiä lisäaineita ovat myös jäätymisen estoaineet, jotka saattavat suurina pitoisuuksina kuitenkin heikentää veden sammutustehoa /8/.

Nestepalojen sammutuksessa vaahtonesteet ovat eduksi. Vaahdot jaetaan kolmeen ryhmään vaahdotulvun eli vaahdon tilavuuden ja vaahdossa olevan nesteen tilavuuden suhteen mukaan: puhutaan raskas-, keski- ja kevytvaahdoista. Raskasvaahdon sammutusvaikutus perustuu sen kykyyn peittää palava aine sekä vaahdon sisältämän suuren vesimäärän jäähtymiseen. Kevytvaahdon jäähtymisvaikutus on pienempi, ja sen sammutusvaikutus perustuu lähinnä tukahduttamiseen. Kevytvaahdolla pyritään yleensä täyttämään koko palotila tai ainakin peittämään

kaikki palavat pinnat. Raskasvaahdot ja keskivaahdot soveltuvat palavien nesteiden sammuttamiseen, kevytvaahdot ja keskivaahdot suljetuissa tiloissa nesteiden ja kiinteiden aineiden sammutukseen.

Vaahdot voidaan käyttää käsiammuttimissa, mutta myös sprinklerilaitteistoon voidaan liittää vaahdonesteen annostelulaitteet. Sammutusvaahdot saadaan aikaan liuottamalla veteen vaahdotuodostavaa nestettä sekä sekoittamalla liuokseen ilmaa vaahdonkehittämissä.

5.1.2 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on halonien ohella ollut yleisin sammutekaasu, jonka sammutusmekanismi on pääasiassa hapen syrjäyttäminen mutta myös jossain määrin jäädytys. Hiilidioksidia käytetään sekä käsiammuttimissa että kiinteissä sammutuslaitteistoissa niin kohdesuojaukseen kuin tilasuojaukseenkin. Se soveltuu hyvin nestepalojen sammuttamiseen. Palavasta puusta se pystyy saannuttamaan vain liekit, hehkuvan hiiltymään varastoitunut lämpö aikaansaa uudelleensyttymisen nopeasti. Siksi sammuttamisen edellyttämää kaasupitoisuutta on voitava ylläpitää jopa vuorokausia. Hiilidioksidia säilytetään huoneenlämmössä nesteytettyinä painesäiliöissä noin 50 - 60 barin paineessa. Vapautuessa hiilidioksidi kaasuuntuu nopeasti ja jäädyttää ympäristöään.

Hiilidioksidin tyypillisiä käyttökohteita ovat palavien nesteiden varasto- ja käsittelytilat sekä koneiden kohdesuojaukset. Hiilidioksidi on puhdasta ja halpaa, minkä vuoksi sitä käytetään kohteissa, joissa tulipaloja sattuu usein.

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

Vastaavasti kuin sprinklerijärjestelmistä, hiilidioksidijärjestelmistä ja niiden asennuksesta on

olemassa ohjeet Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliiton julkaisussa /9/.

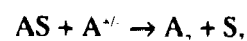
5.1.3 Jauheet

Sammutejauheet jaetaan kahteen päätyyppiin: nestepaloihin soveltuvat B-jauheet, joita ovat esimerkiksi natrium- ja kaliumbikarbonaattit (NaHCO_3 ja KHCO_3) sekä neste- ja kiinteiden aineiden paloihin soveltuvat AB-jauheet, 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 juoksevuuuden parantamiseksi.

Jauheiden oleellisimmilla komponenteilla, suoloilla, on veden tapaan kolme pääasiallista sammutusmekanismia /1(Session 11)/:

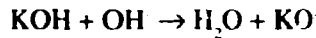
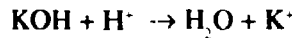
- Kuumassa hajotessaan suolat sitovat suuren määrän lämpöä, kaliumbikarbonaatti voi sitoa lämpöä 4.2 MJ/kg ja kaliumkarbonaatti jopa 5.5 MJ/kg.
- Toinen sammutusmekanismi on kemiallinen: liekissä esiintyvät aktiiviset radikaalit voivat rekombinoitua joko heterogeenisesti suola-hiukkasten pinnalle tai homogeenisesti alkalimetalliatomien katalysoimissa kaasufaasireaktioissa. Palamisen ketjureaktio häiriintyy.
- Kolmanneksi, jäähtymistä edistävissä hajoamisreaktioissa vapautuu vettä ja hiilidioksidia, jotka paikallisesti laimentavat happipitoisuutta.

Heterogeeninen katalyysi tarkoittaa tässä yhteydessä seuraavankaltaisia reaktioita:



missä $A^{*'}$ on joku vapaa radikaali kuten OH^{\cdot} , H^{\cdot} tai CH_3^{\cdot} ja A_2 joku pysyvä lopputuote kuten H_2O , CO_2 tai $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$. S on suola-hiukkasen pinta.

Homogeeninen katalyysi voi olla seuraavanlainen (mikä vastaa halonien sammutusmekanismia):



Kaksi mekanismia - lämmön sitominen ja heterogeeninen katalyyysi - ovat pintailmiöitä. Homogeeninen katalyyysi ja laimennus puolestaan riippuvat erityisesti toisesta pintailmiöstä, lämmön absorboitumisesta ja siitä seuraavasta termisestä hajoamisesta. Näin ollen, mitä suurempi pinta, sitä tehokkaampi sammutus. Sammutustehokkuutta voidaan silloin optimoida hiukkaskokoa pienentämällä, sillä pienillä hiukkasilla on suurempi pinta massayksikköä kohden.

Edellämainittujen sammutusmekanismien lisäksi A-jauheilla on se ominaisuus, että suolan hajotessa palavalle pinnalle muodostuu ohuen kalvon kaltainen pinnoite, joka eristää pinnan ympäröivästä hapesta ja edesauttaa palon tukahtumista.

Jauheita käytetään erityisesti käsisammuttimissa, mutta myös jonkin verran kiinteissä sammutusjärjestelmissä. Jauhejärjestelmät käyttävät yleensä tyyppiä punneaineena. Jauheiden etuna on hyvä sammutuskyky ja myrkyttömyys, haittana on niiden likaava vaikutus.

5.2 Uudet sammutteet ja menetelmät

5.2.1 Kaasut

Hiilidioksidin lisäksi halonien kaasumaisia vaihtoehtoja ovat jalokaasut, pääasiassa argon 1(*Session 10*),2(*Session 1*),3,4'. Jalokaasut ovat täysin inertejä, ts. ne eivät osallistu mihinkään kemiallisiin reaktioihin, ja niiden sammutusvaikutus perustuukin yksinomaan tukahduttamiseen. Kohteesta riippuen vaadittava sammutepitoisuus on erittäin korkea, yleensä 35 - 60 %. Jalokaasuille ODP = 0, ja kaupallisten kaasuseosten GWP myös hyvin pieni.

Inergen on kaupallinen nimi sammutuskaasuseokselle, joka koostuu kolmesta kaasusta, tyypeistä, argonista ja hiilidioksidista. Inergeniä käytetään

vain kiinteissä sammutuslaitteistoissa. Kaasu varastoidaan 80 l ja 150 barin säiliöissä, ja yksi säiliö riittää n. 12 m³ tilan suojaukseen. Inergen alentaa ilman happipitoisuuden suojattavassa tilassa 21 t-%:sta alle 15 t-%, mikä sinänsä on jo 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 kuitenkin kaksi koulukuntaa, ja toista edustaa Argonite, joka on Inergenin tavoin kaasuseos, mutta se ei sisällä hiilidioksidia. Argonitessa puolet on argonia, puolet tyyppiä. Argonite säilötään 300 bar säiliöihin.

Seuraavat ominaisuudet ovat yhteisiä kaikille halonien vaihtoehtoina esitetyille kaasuille:

- Niitä säilytetään kaasumaisina, jolloin varastointitilavuudet ovat suuret.
- Ne ovat puhtaita, eivätkä likaa palotilaa.
- Ne ovat sähköä johtamattomia.
- Purkautumisaika on melko pitkä, 1 - 2 min.
- Aineista ei synny hajoamistuotteita.
- ODP = 0, ja GWP joko 0 tai hyvin pieni.

5.2.2 Aerosolit

Aerosolit 1(*Session 11*),2(*Session 11*),3' ovat uusi tuote sammutustekniikassa. Aerosolilla tarkoitetaan yleisesti joko nestemäisten tai kiinteiden hiukkasten ja kaasun seosta, jossa hiukkaskoko on 1 µm:n suuruusluokkaa.

Sammutusaerosoleja muodostetaan polttamalla sopivia pyroteknisiä aineita, jolloin ne ensin höyrystyvät ja sitten kondensoituvat pieniksi hiukkasiksi. Aerosoleista käytetään erilaisia, niiden muodostamiseen liittyviä lyhenteitä. Kirjallisuudesta löytyvät ainakin seuraavat lyhenneet, joista jotkut ovat myös kauppanimiä:

PGA: Pyrotechnically Generated Aerosols tai PyroGenic Aerosols

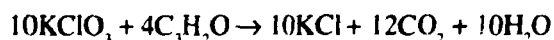
CGA: Combustion Generated Aerosols

PXA: Pyrotechnically generated EXtinguishing Aerosols

EMAA: Encapsulated Micron Aerosol Agent

Pyroteknisesti muodostetut sammuteaerosolit sisältävät yleensä alkalimetallisuoloja samoin kuin luvussa 5.1.3 käsitellyt B-jauheetkin, mutta aerosoleilla hiukkaskoko on huomattavasti pienempi. Pienen hiukkaskoon takia suolojen sammutusmekanismit käytetään tavanomaisia jauheita tehokkaammin hyväksi. SFE:n valmistajan mukaan aerosolin sammutusteho on kolme kertaa parempi kuin tavanomaisilla jauheilla. Aerosolit vastaavat hyvin kaasumaisia sammutteita: niillä on kaasun virtausominaisuudet ja ne ovat ilmaa kevyempiä, joten ne voivat tunkeutua helposti kaikkialle ja soveltua siten tilasuojaukseen.

Tyypillisesti pyrotekniset aineet valmistetaan yhdistämällä sopiva hapetin ja pelkistin johonkin läyhteaineeseen. Tuote jauhetaan ja mahdollisesti vielä sekoitetaan sopivaan sidosaineeseen kuten epoksihartsiin. Lopputuote voi olla geelimäinen aine, kuiva jauhe tai pala kiinteää ainetta. Pyrotekniset yhdisteet, joissa on kaliumpohjainen hapetin ja orgaaninen sidosaine, ovat hyvin tunnettuja rakettipolttoaineita. Sammuteaerosolien muodostuksessa käytetään vain hitaammin palavia aineita, jotka palavat hallitulla nopeudella. Päinvastoin kuin rakettipolttoaineet, sammuteaerosolien polttoaineet edellyttävät myös ulkopuolista happea palamisreaktioiden ylläpitämiseksi. Palamisen yhteydessä voi esiintyä esimerkiksi seuraavanlainen reaktio:



Reaktio tapahtuu niin korkeassa lämpötilassa (> 1500°C), että alkalimetallisuola, KCl, on aluksi kaasumainen, mutta se sitoo nopeasti lämpöä ensin kondensoitumalla nesteeksi ja sitten kiinteytymällä suolakiteeksi (= aerosolihiukkanen). Yksi aerosolien muodostukseen liittyvä ongelma onkin niiden korkea muodostumislämpötila - joissakin tapauksissa muodostumiskohdasta voi jopa iskeä pistoliekkejä ympäristöön. Polttoaineen jäähtyminen on ratkaistu eri tavoin, joista yksi tapa on pitää polttoainesäiliö vesihautessa.

Käytännössä tulipalon sattuessa aerosolin muodostus käynnistyy joko itsestään tai aine sytytetään sähköisesti. Palamistuotteista n. 40 % on kiinteitä hiukkasia ja n. 60 % kaasua.

Aerosoleihin liittyvä merkittävä etu kaikkiin muihin sammutteisiin verrattuna on, että ne eivät edellytä säiliöitä, putkistoja, suuttimia ym. kiinteitä asennuksia. Erään vertailun mukaan sama sammutusteho saadaan joko 150 kg:lla hiilidioksidia tai 4 kg:lla aerosolipolttoainetta, joka voidaan vaikka säilöä yhtenä kiinteänä kappaleena. Sammutuksen edellyttämät pitoisuudet aerosoleilla vaihtelevat välillä 50 - 100 g/m³, kun ne haloneilla ovat 200 - 300 g/m³.

Aerosolit muodostuvat melko hitaasti mutta heikentävät merkittävästi näkyvyyttä palotilassa. Aerosolit ovat sähköä johtamattomia, ja valmistajien mukaan aerosolit voidaan palon sammuttaa tuulettamalla nopeasti pois palotilasta, jolloin niiden likaava vaikutus on hyvin pieni.

Aerosolien ODP = 0 ja GWP 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. Myrkyllisyysvaikutukset saattavat liittyä hiukkasten pieneen kokoon, jolloin ne mahdollisesti kertyvät keuhkoihin.

5.3 Vesisumut

5.3.1 Yleistä

Vesisumut eivät vielä sisälly EPA:n SNAP-listaan, mutta kaksi eri valmistajaa on anonut hyväksyntää listalle. Kiinteiden vesisumujärjestelmien sammutustehokkuudesta on kuitenkin saatu kiistatonta näyttöä /1(*Sessions 8,9*),2(*Session 10*),10,11/, ja etenkin laivapuolella ne ovat tehneet varsinaisen läpimurron. Vesisumujen ajankohtaisuuteen on halonien kieltämisen lisäksi vaikuttanut se, että vaadittavat vesimäärät ovat yleensä pieniä. Siksi vesisumut voivat soveltua erityisen hyvin kuljetuskaluston kuten juuri laivojen ja lentokoneiden palosuojaukseen. Vesisumut soveltuvat sekä kohde- että tilasuojaukseen, jolloin samalla sammutteella voidaan periaatteessa korvata niin tavanomaisia sprinkleri-järjestelmiä kuin kaasujärjestelmiäkin.

Veden sammutusmekanismeja käsiteltiin luvussa 5.1.1, ja kaikki mekaanismit tulevat vesisumuilla pienen pisarakoon takia tehokkaammin hyväksikäytetyiksi kuin tavanomaisilla sammutussuihkuilla. Erityisesti säteilylämmön vaimenemisella on merkitystä nimenomaan sumujen yhteydessä. Käytännössä ihminen voi seistä aivan palokohdan lähellä tuntematta kuumuutta - toisaalta sumut yhdessä muodostuvan höyryn ja savun kanssa saattavat peittää näkyvyyden niin tehokkaasti, että palokohdan vieressä seisova ei edes tiedä, että vieressä palaa.

Monessa suhteessa parit 'vesisuihku - vesisumu' ja 'jauhe - aerosoli' ovat keskenään analogisia: pienet hiukkaset optimoivat kummankin sammutteen sammutustehokkuuden, mutta sammutteen ohjaaminen oikeaan paikkaan voi olla hankalaa etenkin tilasuojaussovellutuksissa.

5.3.2 Sammutustehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä

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.

Vesisumun ominaisuuksista sammutustehokkuuteen vaikuttaa erityisesti sumun pisarakokajakautuma. Muita merkittäviä tekijöitä ovat vesivuontiheys, sumun liikemäärä eli käytännössä pisaroiden tunkeutumiskyky sekä *lisäaineet*, joita käsiteltiin luvussa 5.1.1. Erityisen lupaavilta lisäaineilta näyttävät tällä hetkellä alkalimetallisuolat, joiden sammutusmekanismeja käsiteltiin luvuissa 5.1.3 ja 5.2.2. Eri suolojen on havaittu toimivan erityisen hyvin vesisumuihin liuotettuna ilmeisesti siksi, että pisaroiden höyrystyessä palotilassa suolat kiteytyvät hyvin pieniksi hiukkasiksi, jolloin niiden sammutusmekanismit hyödynnetään aerosolien tavoin mahdollisimman tehokkaasti. Tavallisella ruokasuolallakin on havaittu olevan sammutusta edistävä vaikutus. Laimean ruokasuolaliuoksen (2.5 %) on todettu sammuttavan dieselöljypaloja paljon pienemmällä vesimäärällä ja paljon nopeammin kuin makea

vesi. Suoloihin usein kuitenkin liittyy myös haitallinen korroosiovaikutus.

Kaiken kaikkiaan tutkimus lisäaineiden vaikutuksesta vesisumujen sammutustehoon on vielä ollut hyvin hajanaista, mutta tarjolla on jo ainakin yksi kaupallinen järjestelmä (SoftEx™), joka soveltaa vesisumuun sekoitettua lisäainetta. Aineen koostumus on kuitenkin salainen.

Sumujen *pisarakokajakautuma* vaihtelee niin ajallisesti kuin paikallisestikin. Vesisumuna pidetään suihkua, jonka D_{50} (halkaisija, jota pienempi halkaisija 90 % nestetilavuuden pisaroista) metrin päässä suuttimesta keskellä suihkun poikileikkausta on alle 400 µm. Sitä suuremmat pisarat saavat jo aikaan allaspalojen pinnan sekoittumista ja roiskimista. Käytännössä sumujen pisarakoot ovat yleensä paljon pienempiä.

Jotta pienet pisarat ylipäätään voisivat tunkeutua liekkiin ja saavuttaa palavan pinnan niiltä edellytetään riittävän suurta *liikemäärää*. Veden käyttö on optimaalista nimenomaan, jos vesi saadaan liekkiin nestemäisenä: liekin sammutus edellyttää 0.27 l/m³ nestemäistä vettä, höyrynä vettä tarvitaan lähes kaksinkertainen määrä, 0.51 l/m³.

Pelkät pienet, hyvin tunkeutuvat pisarat eivät takaa suurta sammutustehokkuutta. Pisaroita on myös oltava riittävän paljon. Tilanteesta riippuen *vesimäärä* ilmaistaan tilavuusvirtana joko yksikkötilavuutta (lpm/m³, vrt. kaasut) tai yksikköpinta-alaa (lpm/m², vrt. tavonaiset sprinklerit) kohden. Käytännössä sumun pisaratiheydet vaihtelevat paikallisesti, joten keskimääräiset tilavuuskonsentraatiot tai vesivuontiheydet saattavat olla vain hyvin karkeita arvioita.

Vesisumun ominaisuudet paljolti määräävät sen, soveltuuko sumu perinteisiä sprinklereitä korvaavaan kohdesuojaukseen vai kaasujärjestelmiä korvaavaan tilasuojaukseen.

Palon tyyppi määräytyy palavasta aineesta, sen sijoittelusta ja palon vaiheesta. Palava aine voi olla esimerkiksi nesteallas, nestespray, kiinteä aine jne. Vesisumut sammuttavat näitä aineita eri tavoin. Esimerkiksi allaspalon sammutuksessa tärkein sammutusmekanismi voi olla säteilyläm-

mönsiirron estäminen nestepinnan ja liekin välillä tai hapen syrjäytyminen lähellä pintaa, kun taas selluloosapalossa oleellisinta voi olla palavan pinnan jäähdyttäminen.

Palavan aineen sijoittelu vaikuttaa palon kehitymis- ja leviämisenopeuteen. 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. Kytevässä palossa lämmöntuotto ja sen myötä höyrystyminen on vähäistä, ja sammutus edellyttää suurta paikallista vesivuontiheyttä palokohdan läheisyydessä.

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.

Palotilan ilmanvaihto-olosuhteet vaikuttavat tilan kaasuvirtauksiin samoin kuin itse vesisumun ja höyryn virtauksiin. Täysin suljettu tai täysin avoin tila muodostavat luonnollisesti aivan eri puitteet sammutukselle. Suljetussa tilassa palo on aina helpompi sammuttaa, sillä silloin kaikkia veden kolmea sammutusmekanismia voidaan käyttää tehokkaasti hyväksi, ja toisaalta itse palaminenkin pienentää tilan happipitoisuutta.

Kaiken kaikkiaan pisaratiheydet voivat vaihdella palotilan eri kohissa deka-deja. Sumuille onkin erittäin vaikeata määrittää yleispätevää, palon sammutukseen vaadittavaa vesivuontiheyttä, kuten perinteisille sprinklerijärjestelmille on voitu tehdä, tai yksikäsitteistä, kaasupitoisuutta vastaavaa tilavuuskonsentraatiota. Vesisumujärjestelmien asennussuunnittelu edellyttää syvää sumujen toimintaperiaatteiden ymmärrystä.

5.3.3 Kaupalliset vesisumujärjestelmät

Vielä muutama vuosi sitten vesisumuteknologiaa ei yksinkertaisesti ollut olemassa. Tällä hetkellä vesisumujärjestelmien valmistajia samoin kuin

sumujen tuottamistekniikoita on jo useita. Nykyisin käytössä olevat sumusuuttimet ovat kolmea päätyyppiä:

- 1) isku- tai törmäyssuuttimet,
- 2) korkeapainesuuttimet sekä
- 3) paineilmasuuttimet.

Törmäyssuuttimissa kuristuksen edessä on este, johon törmätessään suurella nopeudella virtaava vesisuihku hajoaa pieniksi pisaroiksi. Nämä suuttimet muistuttavat perinteisiä sprinklerisuuttimia (esimerkiksi AquaMist™, LoFlow™). 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 useammassa kuristuksessa hajottaa suihkun hienoiksi pisaroiksi (esimerkiksi Hifog™, Ultrafog™). Yhdessä suuttimessa voi olla jopa parikymmentä erillistä kuristusta, joista syntyvät suihkut yhdistyvät yhdeksi sumuksi. Suurella nopeudella purkautuva sumu vetää mukaansa myös ympäröivää ilmaa, joka lisää sumun liikemäärää ja saattaa näin parantaa sammutustehokkuutta. Toisaalta ylimääräinen ilma voi myös edistää palamista. Korkeapainejärjestelmissä paine voi olla lähes 300 bar, ja järjestelmä vaatiikin kokonaan omat putkistonsa, pumppunsa ja vesisäiliönsä. Korkeapainesuuttimilla on mahdollista tehdä hyvin pieniä pisaroita, joiden tunkeutumiskyky on yleensä parempi kuin matalapaineisilla suuttimilla muodostetuilla pisaroilla.

Paineilmasuuttimissa paineistettu ilma, typpi tai muu kaasu sekoitetaan paineistettuun veteen, jolloin vesi hajoaa sumuksi (esimerkiksi Fire Scope 2000™). Paineet ovat kuitenkin edelleen alhaisia, vastaavia kuin tyyppillisissä palosuojuukseen tarkoitetuissa vesisäiliöissä. Menetelmällä päästään hyvin pieniin pisaroihin, joilla on suuri tunkeutumiskyky. Paineilmasuuttimet edellyttävät putkitusta kahdelle aineelle ja suuren paineilma-astan. 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.

Konkreettisia kohteita, joita jo on suojattu vesisumujärjestelmillä tai joita parhaillaan tutkitaan mahdollisina suojattavina kohteina, ovat esimerkiksi seuraavat kohteet /10,11/, joista osa on perinteisesti suojattu halonisammutusjärjestelmillä (mikäli ollenkaan):

- 1) Laivojen konehuoneet, hyttitilat, käytävät, julkiset tilat, myymälät ja varastot
- 2) Lentokoneiden matkustamot, rahtitilat
- 3) Kaasu- ja höyryturbiinit
- 4) Puhelinkeskukset, ATK- ym. elektroniikkatilat

Vesisumuja asennetaan jatkuvasti enenevässä määrin kohteisiin, jotka on perinteisesti suojattu tavanomaisin sprinklerein.

5.3.4 Standardit ja määräykset

Ensimmäinen itse vesisumujärjestelmää koskeva standardiehdotus NFPA 750 (Standard for the Installation of Water Mist Suppression Systems) on valmis. Standardiehdotus käsittää mm. vaatimukset järjestelmän kaikille komponenteille ja materiaaleille. Järjestelmän suunnittelusta todetaan, että tällä hetkellä ei ole olemassa mitään yleispätevää menetelmää, johon nojautuen suunnittelu voitaisiin tehdä. Asennukset tulee tehdä hyväksyntöjen pohjalta tapauskohtaisesti. Standardiehdotuksessa luetellaankin runsaasti erilaisia, luvussa 5.3.2 esitettyjä, palokuormaa ja palotilaa koskevia perusasioita, joita tulee suunnittelussa ottaa huomioon.

Varsinaisia palokokeita standardiehdotus ei sisällä, ja vesisumujärjestelmiä voidaankin hyväksyä vain, mikäli kulloiseenkin sovellutustarkoitukseen liittyvää kokeellista näyttöä on tarpeeksi. Palokoeomenetelmiä on kehitetty järjestelmällisesti vasta laivapuolella, ja tällä hetkellä lopullista hyväksyntää vailla ovat palokoeomenetelmät laivojen hyttialueille, julkisiin tiloihin, myymälöihin ja varastoihin sekä konehuoneisiin /12,13/. Yhdysvalloissa näitä menetelmiä tultaneen soveltamaan valituin kohdin myös asuinrakennusten ja julkisten rakennusten vesisumujärjestelmiin.

Laivojen konehuoneen palosuojausta koskeva menetelmäehdotus on valmiina vesisumujärjestelmille, joita käytettäisiin nimenomaan kaasujen korvikkeena. Konehuoneiden kohdesuojaukselle on kehitteillä omat palokoeomenetelmänsä.

Todelliset palotilanteet ovat hyvin erilaisia ja - kuten edellä on jo moneen otteeseen todettu - ympäristötekijät vaikuttavat vesisumun sammu- tustehokkuuteen oleellisesti. Siksi tällä hetkellä näyttää siltä, että sumuille on vaikeata asettaa selkeitä, yleispäteviä vaatimuksia sammutusjärjestelmien suunnittelun ja standardisoinnin avuksi. Missään tapauksessa olemassaolevia sprinkleri- tai halonisääntöjä ei voida suoraan soveltaa vesisumuille eikä niitä voida suoravii- vaisesti sellaisiksi edes muokata. Selvää joka tapauksessa on, että vesisumut ovat erittäin tehokkaita sammutteita, mutta - ainakin toistai- seksi - *enemmän kuin mitkään muut sammutus- järjestelmät, vesisumujärjestelmät tulee räätä- löidä kuhunkin sovellutuskohteeseen erikseen.*

6 ERITYISTILOJEN PALOSUOJAUS

Minkä tahansa tilan palosuojausta suunniteltaessa on otettava huomioon kolme perusasiaa: henkilöturvallisuus, toiminnan jatkuvuus ja omaisuuden suojaus. Tilasta riippuen edellämainitut perusasiat painottuvat eri tavoin. Ydinvoimaloissa kaikki kolme tekijää ovat yleensä erittäin tärkeitä, mutta tilakohtaisesti painotukset voivat vaihdella. Seuraavassa käsitellään tarkemmin elektroniikka- ja kaapelitilojen palosuojausta. Näitä tiloja ei kuitenkaan voida yleistää ja antaa kaiken kattavaa patenttiratkaisua, vaikka palosuojausjärjestelmää käsitelläänkin vain periaatetasolla. Tilojen koko, tiiviys, ilmanvaihtolosuhteet, palokuorma ym. vaikuttavat kaikki osaltaan palosuojausratkaisuun ja siksi lopullisia päätöksiä tehtäessä tulee kutakin erikoistilaa aina arvioida yksilöllisesti. Palosuojauksen tavoitetaso ja yksityiskohtaisten välineistösuunnitelman tulisi perustua tilakohtaiseen riskianalysiin. Automaattinen paloilmoitin soveltuu hyvin minkä tahansa rakennuksen mutta erityisesti tärkeiden rakennusten kuten ydinvoimaloiden kaikkien tilojen perusvalvontaan. Erikoistiloissa, joissa yleisesti käytetään myös kiinteitä sammutuslaitteistoja, ovat usein ongelmana tiloissa vallitsevat olosuhteet, kuten tehokas ilmanvaihto, korkea lämpötila tai likaisuus. Ratkaisuna vakioilmaisimien lisäksi ovat erityisilmaisimet sekä tilakohtaisesti valittu kiinteä sammutuslaitteisto. Palonilmaisua ja eri ilmaisintyyppejä on käsitelty lähemmin viitteessä 6, ja tässä yhteydessä ilmaisintyyppejä mainitaankin vain nimeltä toimintaperiaatteisiin puuttumatta.

6.1 Elektroniikkatilat

Elektroniikkatilat ovat erityisen haavoittuvia tulopaloissa. Jo pienikin palo saattaa koitua kohtalokkaaksi toiminnan jatkuvuutta ajatellen. Toiminta voi katketa vaiheessa, jolloin omaisuusvahingot ovat vielä olemattomat eikä henkilöturvallisuus ole uhattuna. Siksi tärkeät elektroniikkatilat suojataan nykyään pääasiassa näyttötoilmaisimin, joilla palo voidaan havaita jo hyvin varhaisessa vaiheessa. Näyttötoilmaisimet ovat selvästi tavanomaisia savuilmaisimia herkempiä ja vähemmän alttiita ympäristön olosuhteista aiheutuville häiriöille.

Ydinvoimaloissa lähes kaikkia elektroniikkaa sisältäviä tiloja voitaneen pitää erittäin tärkeinä, ja niihin näyttötoilmaisimet ovat suositeltavia. Tilakohtaisesti voidaan arvioida tilojen olosuhteet kuten ilmanvaihto ja esteet, ja arvioinnin perusteella ehkä tyytyä tavanomaisiin savuilmaisimiin tilojen perusvalvonnassa.

Paloilmoittimen lisäksi tai vaihtoehtona elektroniikkatiloissa on yleensä aina myös sammutusjärjestelmä. Järjestelmä voi olla koko tilan

käsittävä tai esimerkiksi elektroniikkakaappikohtainen. Ideaalinen sammute sammuttaa tehokkaasti, ei johda sähköä eikä likaa tiloja. Tällainen ideaalinen sammute oli haloni 1301.

Nytemmin sammutusjärjestelmässä voidaan käyttää jotakin kaupallisesti saatavilla olevaa halonien korviketta, joista yksikään ei kuitenkaan ole täysin halonin veroinen. Mikään tällä hetkellä tunnetuista korvikeaineista ei suoraan sovellu olemassa oleviin halonisammutuslaitteistoihin, ja ne vaativat haloneja paljon suuremman varastointitilavuuden. Suurin korvikkeisiin liittyvä käytännön ongelma on niiden jatkuva saatuus: 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.

Jos tällä hetkellä tunnettuun korvikeaineeseen kuitenkin päädytään, tulevaisuutta ajatellen turvallisin on päätyä aineeseen, jonka ODP- ja GWP-arvot ovat nollija ja jotka soveltuvat mihitettyihin tiloihin.

Tavanomaisista sammutusjärjestelmistä elektroniikkatiloissa käytetään edelleen hiilidioksidia, joka soveltuukin tarkoitukseen erinomaisesti, kunhan laukaisuhetkellä ollaan varmoja siitä, että tila on miehittämätön. Uudet kaasumaiset sammutusvaihtoehdot ovat hiilidioksidin ohella myös varteen-otettavia sammutteita, mikäli suuri varastointitilavuus ei muodostu ongelmaksi.

Tavanomaisten jauheiden ja vesisuihkujen kehittyneemmät versiot - aerosolit ja vesisumut - ovat uusia lupaavia menetelmävaihtoehtoja myös elektroniikkatiloihin. Kummallakin on tehty kokeita elektroniikkatiloissa, mutta tutkimus on kuitenkin vielä ollut melko hajanaista. Kummassakin tapauksessa niiden soveltuvuutta tulee tarkastella tilakohtaisesti, sillä aerosolipolttoaineiden sijoittelulle tai vesisumujärjestelmien asennukselle ei ole olemassa yleisiä ohjeita.

Vesisumujärjestelmän suunnittelijan tulee perinpohjin ymmärtää ulkoisten tekijöiden vaikutukset vesisumujen sammutustehokkuuteen: kahdessa päällisin puolin samanlaisessa tilassa voi sammutuksen edellyttämä vesimäärä poiketa jopa tekijällä kymmenen. Toistaiseksi eniten tutkimusta on tehty järjestelmille, jotka ovat elektroniikkakaappikohtaisia.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tämänhetkisen tietämyksen mukaan luotettavin elektroniikkatilojen palosuojaus muodostuu näyttötoilmaisista sekä automaattisesta kaasusammutuslaitteistosta. Kaasuvaihtoehtoja on jo useampia, mutta mikään niistä ei ole aivan halonin veroinen.

Sammutustekniikkaan liittyvä tutkimus- ja kehitystyö on tällä hetkellä kuitenkin niin nopeaa, että muutaman vuoden kuluttua on jo saatettu löytää täydellinen halonien korvike, ja toisaalta aerosolien ja vesisumujen soveltuvuudesta on varmuudella saatu tarkempaa tietoa.

6.2 Kaapelitilat

Kaapeleista alkanut palo voi pahimmassa tapauksessa katkaista koko toiminnan, sillä kaapeleita pitkin palo voi levitä erittäin nopeasti. Etenkin kaapelinousut ovat vaarallisia. Kaapeliläpiviennistä riippuen palo voi siirtyä kaapelien välityksellä myös tilasta toiseen.

Kaapelitiloissa tulisi ehdottomasti aina olla vähintäänkin tavanomaiset savuilmaisimet. Erityisen kriittisissä kohdissa voidaan käyttää näyttötoilmaisimia tai lämpötunnistinkaapeleita. Pitkissä kaapelitunneleissa voidaan soveltaa myös linjailmaisimia.

Sammutusjärjestelmää valittaessa kaapelien sijoittelulla on ratkaiseva merkitys. Siitä riippuu mm. se, että tarvitaanko koko tilan suojaus vai riittääkö kohdesuojaus. Mikäli kaapelitila on riittävän suljettu voidaan soveltaa luvussa 6.1 mainittuja kaasujärjestelmiä. Hiilidioksidia voidaan käyttää myös kohdesuojauksessa.

Jos kaapelitiloissa on pelkkiä kaapeleita, voidaan tila vaikka sprinklata, mutta myös vesisumut saattavat soveltaa tarkoitukseen erinomaisesti. Vesisumujen etuna tavanomaisiin sprinklerijärjestelmiin verrattuna on, että ne voidaan vaikka jälkiasentaa. Vesisumujen soveltavuuden varmentamiseksi olisi suositeltavaa tehdä todellisia kaapelipalojen sammutuskokeita.

Elektroniikka- ja kaapelitiloja samoin kuin koko suojattavaa rakennusta on luonnollisesti järkevintä ajatella kokonaisuutena siten, että ilmaisinta ja sammutusjärjestelmiä ei olisi lukemattomia erilaisia. Siksi kaikki suojattavat tilat tulisi kunnolla kartoittaa ja asettaa palosuojausjärjestelmille tietyt reunaehdot (riskianalyysi). Joissakin tiloissa suojauksen tarve on ehdoton, joissakin siitä voidaan tinkiä, ja sen mukaan tulee suunnitella koko rakennuksen tai sen osan riittävä ja järkevä palosuojaus.

VIITTEET

- /1/ Proceedings of the Halon Alternatives Technical Working Conference 1993, Albuquerque, New Mexico, May 11 - 13, 1993.
- /2/ Proceedings of the Halon Options Technical Working Conference 1994, Albuquerque, New Mexico, May 3 - 5, 1994.
- /3/ Proceedings: Advances in Detection and Suppression Technology. SFPE Engineering Seminars, San Francisco, California, May 16 - 18, 1994.
- /4/ Grant CC. Halon and Beyond: Developing New Alternatives NFPA Journal, November/December 1994: 1 - 40.
- /5/ Protecting the Ozone Layer. Vol 3. Fire extinguishing substances. UNEP IE/PAC Series. United Nations Publication. 1993: 1 - 32.
- /6/ Tuomisaari M. Paloilmäisimien toimintakyky ja luotettavuus. STUK-YTO-TR 34, Helsinki 1992: 1 - 26.
- /7/ Sprinklerisäännöt 1990. Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto ry, Helsinki 1990: 1 - 53.
- /8/ Andstén T. Jäätymistä estävien lisäaineiden vaikutus veden sammutustehoon. Palontorjuntatekniikka 22, 1989 (2)
- /9/ Hiilidioksidisäännöt 1990. Suomen Vakuutusyhtiöiden Keskusliitto ry, Helsinki 1990: 1 - 34.
- /10/ Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems. Borås, Sweden, November 4-5, 1993. SP REPORT 1994:03.
- /11/ Mawhinney JR. "Water Mist Suppression Systems May Solve an Array of Fire Protection Problems" NFPA Journal. May/June 1994: 46 - 57.
- /12/ IMO Sub-Committee on Fire Protection - 39th session FP39/WP.6/Add.1 ANNEX 1 APPENDIX B "Fire test procedures for equivalent sprinkler systems in accommodation, public space and service areas on passenger ships", 30 June 1994.
- /13/ IMO Sub-Committee on Fire Protection - 39th session FP39/WP.6/Add.2 ANNEX 2 APPENDIX B "Draft interim test method for fire testing equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of category A and cargo pump-rooms", 30 June 1994.

STUK-YTO-TR-sarjan julkaisuja

STUK-YTO-TR 81 Okkonen T (OTO-Consulting). Development of a parametric containment event tree for a severe BWR accident. (tulossa)

STUK-YTO-TR 80 Tanner V, Rosenberg R (VTT). PWR-ydinvoimalaitoksen primääripiirin aktiivisuuskulkeutismallit.

STUK-YTO-TR 79 Rosenberg R (VTT). Ydinvoimalaitosveden korroosiotuotteiden alkuaikaneanalytiikka.

STUK-YTO-TR 78 Lahdenperä K (VTT). Kaksimetalliliitosten ja austeniittisten valujen testausmekaniikoiden vertailu.

STUK-YTO-TR 77 Rautio M, Björk H, Häkkinen V, Kostianen O, Kuitunen M-L, Lehtonen P, Mesilaakso M, Söderström M (Verification Institute for the Chemical Weapons Convention). Application of CWC analytical procedures for Safeguards: Analysis of phosphorus-containing organic chemical signatures from environmental samples. Final report on Task FIN A844 on the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

STUK-YTO-TR 76 Toivonen H, Honkamaa T, Kansanaho A, Pöllänen R (STUK), Aarnio P, Ala-Heikkilä J, Nikkinen M (HY). Development of in-field monitoring techniques. Report on Task FIN A845 on the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

STUK-YTO-TR 75 Rantavaara A, Klemola S, Saxén R, Ikäheimonen TK, Moring M (STUK). Radionuclide analysis of environmental field trial samples at STUK. Report on Task FIN A 847 of the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

STUK-YTO-TR 74 Haukkala A, Eränen L (HY). Katsaus ydinonnettomuuden psykologisiin seurauksiin sekä empiirinen tutkimus säteilysuojelutoimintapiteiden vaikutuksista käyttäytymiseen kuvitteellisessa tilanteessa.

STUK-YTO-TR 73 Hyvärinen J (STUK), Hongisto O (IVO). Metallic insulation transport and strainer clogging tests.

STUK-YTO-TR 72 Tarvainen M (STUK), Paakkunainen M (Plustech Ltd), Tiitta A (VTT), Sarparanta K (TVO). BWR SWAT, gross-defect verification of spent BWR fuel. Final report on Task FIN A563 on the Finnish Support Programme to IAEA Safeguards.

STUK-YTO-TR 71 Huhtanen R (VTT). Yksinkertaisen huonepalon simulointi PHOENICS-ohjelmalla.

STUK-YTO-TR 70 Särkiniemi P, Kauppinen P (VTT). Yhdistelmätekniikan käyttö pinnan läheisten vikojen ultraäänitestauksessa ulkopinnalta.

STUK-YTO-TR 69 Kyrki-Rajamäki R (VTT). Validation of the reactor code HEXTRAN.

STUK-YTO-TR 68 Leskinen R. (RAMSE Consulting) Testing and maintenance practices of the emergency cooling system of RBMK reactor plant. (tulossa)

STUK-YTO-TR 67 Huhtanen R (VTT). Voimalaitoksen valvomon palosimulointi.

Täydellisen listan STUK-YTO-TR-sarjan julkaisuista saa Säteilyturvakeskuksen kirjastoista

ISBN 951-712-037-0

ISSN 0785-9325

**Painatuskeskus Oy
Helsinki 1995**