

Peter Kangedal  
Tommy Hertzberg  
Magnus Arvidson

# Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning - en litteraturstudie

Brandforsk projekt 507-991

Peter Kangedal  
Tommy Hertzberg  
Magnus Arvidson

# Pyrotekniskt genererade aerosoler för brandsläckning - en litteraturstudie

Brandforsk projekt 507-991

## Abstract

### Pyrotechnically generated aerosols for fire extinguishment - a literature survey

An aerosol constitutes of a mixture of gas and particulate material, where the particles can be in a liquid and/or solid form. The aerosol is by definition this mixture of phases but has often been associated to the particulate phase only.

This report contains a literature study of pyrotechnically generated aerosols used for fire extinguishment. As indicated by the designation, the aerosol is generated by the combustion of a solid compound. The equipment ('generator') consists of a housing with four main parts, an electric ignition device, a block of aerosol-generation composition, a chemical coolant and a delivery nozzle. When activated, a mixture of finely divided solid particles and gases are formed.

Primarily, pyrotechnically generated aerosols extinguish the fire chemically, by interfering with the flame chain reaction. Physical action is due to the heat removal from the flame, as heat is absorbed during the phase transition of aerosol particles from solid to liquid and further to gaseous form.

The technology is usually not suitable for use in occupied areas because of the recommended extinguishing concentrations may result in an atmosphere within the protected enclosure that cannot be safely breathed for a prolonged period. In addition, the visibility inside the protected enclosure is severely reduced upon the activation.

The aerosol that is formed is believed not to contribute to global atmospheric warming or ozone depletion.

**Key words:** Pyrotechnically generated aerosols, extinguishing agents, literature survey

**Sökord:** Aerosoler, släckmedel, släcksystem, litteraturstudie

**SP Sveriges Provnings- och  
Forskningsinstitut**  
SP Rapport 2001:28  
ISBN 91-7848-874-5  
ISSN 0284-5172  
Borås 2001

**SP Swedish National Testing and  
Research Institute**  
SP Report 2001:28

Postal address:  
Box 857,  
SE-501 15 BORÅS, Sweden

Telephone: +46 33 16 50 00  
Telex: 36252 Testing S  
Telefax: +46 33 13 55 02  
E-mail: info@sp.se

# Innehållsförteckning

	<b>Abstract</b>	<b>2</b>
	<b>Innehållsförteckning</b>	<b>3</b>
	<b>Förord</b>	<b>5</b>
	<b>Sammanfattning</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Allmän beskrivning av tekniken</b>	<b>9</b>
1.1	Allmänt	9
1.2	Pyroteknisk generering av aerosoler	10
1.2.1	Gasformiga biprodukter	10
1.2.2	Partikelstorlek	11
1.2.3	Betydelsen av det skyddade rummets storlek	11
1.3	Aerosolens egenskaper	11
1.4	Släckegenskaper	12
1.5	Aerosolgeneratorns utformning	12
1.5.1	Den aerosolbildande blandningen	13
1.5.2	Aerosolens utströmningstemperatur	13
1.6	Generatorns kylmedel	14
1.6.1	Viktiga aspekter	14
1.6.2	Olika typer av kylsystem	14
1.6.3	Materialval	14
1.7	Aerosolsystemets effektivitet	15
1.7.1	Faktorer som påverkar släckeffektiviteten	15
1.7.2	Designfaktorer som påverkar släckeffektiviteten	15
<b>2</b>	<b>Släckmekanismer</b>	<b>17</b>
2.1	Aerosolernas släckmekanismer	17
2.2	Släckegenskaper	17
2.3	De kemiska kedjereaktionerna	17
2.4	Partikelstorlekens betydelse vid termisk kylning av flamman	18
2.5	Andra parametrar som påverkar släckeffektiviteten	20
<b>3</b>	<b>Praktiska erfarenheter av aerosoler</b>	<b>21</b>
3.1	Släckförmågan hos aerosolsläckmedlet	21
3.2	Dimensionering av släckmedel vid rumsskydd	21
3.2.1	Dimensioneringsmetod enligt ett ryskt förslag	21
3.2.2	Metod enligt Australiensisk/Nya Zeeländsk standard	22
3.3	Siktning vid generering av aerosoler	23
3.4	Tillförlitligheten hos aerosolsystemet	23
3.5	Korrosionsanalys	24
3.6	Tillämpningsområden	25
<b>4</b>	<b>Hälsa-, personsäkerhets- och miljöaspekter</b>	<b>26</b>
4.1	Allmänt	26
4.2	Avgörande faktorer för den toxiska dosen	26
4.3	Partiklarnas toxiska egenskaper	27
4.4	Partikelstorlekens betydelse för toxiciteten	27
4.5	Gasernas toxiska egenskaper	27
4.6	Andningsvägarnas skyddsmekanismer	28

4.7	Aerosolsläckmedels godkännande i USA	28
4.8	Toxikologiska studier	30
4.9	Miljöaspekter	31
<b>5</b>	<b>Standardisering</b>	<b>33</b>
5.1	Standard; Australien/Nya Zeeland	33
5.1.1	Organisationerna	33
5.1.2	Släckmedlet	33
5.1.3	Begränsningar	33
5.1.4	Säkerhetsaspekter	34
5.1.5	Den kemiska sammansättningen	34
5.1.6	Krav på generatorns olika delar	35
5.1.7	Krav på släckkoncentration	35
5.1.8	Dimensioneringskrav för rumsfyllnad	36
5.1.9	Tryckavlastningar	36
5.1.10	Installationsrekommendationer	37
5.1.11	Hälsoaspekter	37
5.2	Standard; International Maritime Organisation (IMO)	38
5.2.1	Organisationen	38
5.2.2	Allmänna krav	38
5.2.3	Dimensionering och design av system	38
5.2.4	Brandprovningmetoden enligt IMO MSC/Circ. 1007	39
<b>6</b>	<b>Marknadsöversikt</b>	<b>42</b>
6.1	Pyrogen Ltd (Pyrogen)	42
6.2	Dynamit-Nobel (Dynameco)	42
6.3	Ansul (Micro-K)	43
6.4	Celanova (FirePro)	43
6.5	Powsus Inc (Envirogel)	43
6.6	Firecom (FPG)	44
<b>7</b>	<b>Fortsatta insatser</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>Referenser</b>	<b>46</b>

## Förord

Detta projekt är initierat och finansierat av Brandforsk (projektnummer 507-991) och omfattar en litteraturstudie angående aerosoler för brandsläckning. Rapporten behandlar endast översiktligt dispersionsgenererade aerosoler eftersom kondensationsgenererade aerosoler, även benämnda *pyrotekniskt genererade aerosoler*, dominerar marknaden. Referensgruppen för projektet utgjordes av den fasta referensgruppen för ”Släckmedel”. Följande personer ingick:

Anders Danielsson	AB Förenade Brandredskap
Mats Helltegren	Svenska Skum AB
Jens Hjort	Svenska Brandförsvarsföreningen
Susanne Hessler	Brandforsk
Göran Holmstedt	Lunds Tekniska Högskola
Anna-Maria Larsson	NOHA Försäljnings AB Sweden
Birger Lennmalm	Brand & Riskteknik HB
Leif Ljung	Svenska Petroleum Institutet
Sören Lundström	Räddningsverket
Bengt Lydersson	Sjöfartsverket
Per Lindblad	SAAB Military Aircraft
Mats Rosander	Räddningstjänsten Helsingborg
Mariette Schelander	Försäkringsbolaget Zürich
Ragnar Wighus	Norges Branntekniske Laboratorium
Johan Åqvist	Försvarets Materielverk
Anders Wallin	Brandforsk
Magnus Arvidson	SP Brandteknik
Magnus Bobert	SP Brandteknik
Henry Persson	SP Brandteknik
Bror Persson	SP Brandteknik

## Sammanfattning

Aerosoler utgörs av fasta eller vätskeformiga partiklar som är dispergerade (fördelade) i en gas. Aerosolpartiklarnas storlek är en viktig parameter för hur effektivt partiklarna sprider sig och hur effektiva de är som släckmedel. Små partiklar, i storleksordningen några mikrometer har gasliknande egenskaper när det gäller spridnings- och fördelningsmönster. Även som släckmedel har aerosolpartiklarnas storlek en avgörande betydelse. Ju mindre storlek en partikel har, desto större blir den totala ytan per viktenhet, vilket är av betydelse eftersom den fysiska växelverkan med flamman och brandgaserna sker via det fasta materialets yta.

Tekniken att distribuera aerosolen kan delas in i dispersions- och kondensationsmetoder. Denna litteraturstudie behandlar endast översiktligt dispersionsgenererade aerosoler eftersom kondensationsgenererade aerosoler dominerar marknaden.

Dispersionsmetoden innebär att fast material mekaniskt finfördelas till ett pulver. Pulvret trycksätts sedan med en gas (inertgas eller halongenerat kolväte) i en tryckbehållare. Gasen fungerar dels som drivgas, dels som partikelspridare och har även en släckeffekt. Dispersionsmetoden kräver ett rörsystem med munstycken för distributionen i ett rum.

Kondensationsmetoden innebär att en substans i fast fas antänds och bildar en upphettad ånga. När ångan kyls kondenserar den och en aerosol med små partiklar bildas. Sättet kallas allmänt även för *pyrotekniskt genererade aerosol*, och har den fördelen att det inte krävs några trycksatta behållare, rör, ventiler eller munstycken för att distribuera släckmedlet. De pyrotekniskt genererade aerosolerna är viktigt mycket effektiva; experimentella resultat och uppgifter från tillverkare visar på en effektivitet 3 - 10 gånger bättre än för Halon 1301.

Släcksystem för pyrotekniskt genererade aerosoler består av en behållare, en fast blandning av ett fint pulver, oxidationsmedel, förtunningsmedel och ett bindemedel, en tändsats, och ett kylmedel. De heta ångorna som genereras vid förbränningen passerar ett kemiskt kylmedel (skapat genom en kemisk reaktion som absorberar värme) vilket sänker ångans temperatur.

Systemet kan aktiveras manuellt eller automatiskt, via en elektrisk impuls eller en termisk utlösningmekanism. Impulsen antänder den fasta substansen som i huvudsak innehåller någon typ av kaliumförening. Kalium är en viktig komponent för den kemiska släckverkan som gör tekniken effektiv. Kaliumradikalerna som bildas är mycket aktiva och avbryter de kemiska förbränningsreaktionerna i flamman, genom att neutralisera de syre-, väte- och hydroxidradikaler som får en flamma att propagera. Aerosolen som genereras består till cirka 40 % av fasta partiklar och till resterande 60 % av gaser vilka även har en inerterande effekt vid släckningen.

Eftersom pyrotekniska aerosoler varken kräver tryckbehållare eller rörsystem är installationen av aerosolsystemen relativt enkel. Det behövs heller inte något större underhåll när systemet väl är på plats. Varje aerosolgenerator klarar dock endast av att skydda en begränsad volym vilket innebär att det för lite större volymer krävs att flera generatorer kopplas in samt att dessa aktiveras simultant, för att uppnå erforderlig släckeffekt. För att uppnå maximal effektivitet krävs att eventuell ventilation till det skyddade utrymmet stängs av. Även placeringen av generatorerna är en viktig faktor för att erhålla en effektiv släckning.

Ett flertal standarder för aerosolbaserade släcksystem finns. International Maritime Organisation (IMO) har utvecklat en och i Australien och Nya Zeeland har man tagit fram en gemensam standard för användning av pyrotekniskt genererade aerosolsystem. I arbetet med standarden utgick man från aerosolsläckmedlet Pyrogen vilket återspeglas i standarden där man benämner alla system för pyrotekniskt genererade aerosoler med namnet Pyrogen. Ryssland är annars föregångslandet när det gäller tekniken med pyrotekniskt genererade aerosoler; tekniken är ursprungligen ett resultat av försöken att ta fram ett fast bränsle för raketer. Dåvarande Sovjetunionens forskningslaboratorium, Soyuz, utvecklade släckmedlet. Också Ryssland har en standard för användning av dessa släcksystem. Inom Europa (CEN) pågår för närvarande standardisering inom området. Den kommande standarden är begränsad till pyrotekniskt genererade aerosoler

Hälsoriskerna med aerosolsläckmedel är viktiga att beakta och är inte fullständigt utredda. En hel del tester har gjorts för att utreda de toxiska effekterna, både av partiklarna och av de gaser som bildas vid släckning. Kolmonoxid, som blockerar syreupptagningsförmågan, kan bildas i större eller mindre kvantiteter vid genereringen av den pyrotekniska aerosolen och små partiklarna som bildas kan tränga djupt ner i lungorna och kan vara mycket skadliga, särskilt om de för med sig något giftigt lättlösligt ämne.

De pyrotekniska aerosoler som idag är godkända är endast godkända för obemannade utrymmen. En orsak till detta är att utströmningen förorsakar en kraftig siktnedsättning vilket försvårar möjligheterna till orientering och utrymning.

Pyrotekniskt genererade aerosoler anses vara miljövänliga och har bland annat ODP-värdet noll (Ozone Depleting Potential) och låg GWP-faktor (Global Warming Potential). Däremot produceras vid förbränning koldioxid, vilket är en växthusgas. Flera aerosolsystem är godkända av EPA (US Environmental Protection Agency) under deras SNAP (Significant New Alternatives Policy)-program.

Begränsningen till obemannade utrymmen tillsammans med fördelar såsom hög släckeffektivitet och enkel installation, sätter gränserna för lämpliga tillämpningsområden. Inom det marina området har IMO drivit på utvecklingen och tagit fram riktlinjer för användning av släcksystemen i maskinrum och andra utrymmen på fartyg. MCA (Maritime and Coastguard Agency) i Storbritannien har testat och godkänt system för användning i maskinrum på mindre båtar. Systemet uppfyller även kraven i det så kallade fritidsbåtsdirektivet. Släcksystemet används idag på fartyg i Australien. Andra tillämpningsområden är generellt i maskin- och motorutrymmen, kontrollrum, datarum och olika transportapplikationer.





# 1 Allmän beskrivning av tekniken

## 1.1 Allmänt

Aerosoler består av små fasta partiklar eller vätskedroppar i en gas. Aerosolen skapas genom antingen dispersions- eller kondensationsmetoden. Dispersionsaerosoler bildas genom finfördelning av ett fast material, eller en vätska, i en gas. Kondensationsaerosoler bildas genom att överhettade ångor kondenserar eller genom kemiska reaktioner i gasfas (vilket även kallas pyrotekniskt genererade aerosoler) [1].

En viktig faktor för ett aerosolsläckmedels effektivitet är dess förmåga att fördela sig i ett rum. Aerosolpartiklarnas fördelnings- och släckegenskaper är också en funktion av aerosolpartikelns storlek, vilken kan variera från nanometer- till millimeterskala ( $10^{-9}$  –  $10^{-3}$  m).

Generellt är det svårt att tillverka ett mycket finfördelat pulver till en rimlig kostnad. Det är även svårt att undvika att det bildas agglomerat eller att pulvret koagulerar vid lagring. Ett sätt att komma runt detta problem är just att använda sig av tekniken med en pyrotekniskt genererad aerosol.

Spectrex Fire Extinguishment (SFE) är ett släckmedel producerat av företaget Spectronix och utgångsmaterial för en aerosol genererad via en exotermisk (dvs. värmealstrande) kemisk reaktion. SFE får vidare i rapporten representera generellt utgångsmaterial för pyroteknisk aerosol. SFE behöver inte rörsystem, tryckbehållare eller ventiler. En anordning för att förvara den aerosolbildande blandningen är allt som behövs. Tryckprovning, vägning och annan kontroll/underhåll av behållare, rör, munstycken och ventiler behövs inte [2].

SFE har utmärkta brandsläckningsegenskaper och uppges av [2] vara ungefär 6 gånger effektivare än Halon 1301 per massenhet och upp till 10 gånger effektivare än alternativa ersättningsmedel för Halon 1301, t ex HFC-23. Effektiviteten sägs vara jämförbar med pulverläckmedel<sup>1</sup>. Användandet av SFE är oberoende av syretillgång och kan därför vara effektivt i en vätska eller på andra ställen där syrekoncentrationen är låg. Initieringen av SFE kan ske elektriskt eller via antändning genom termisk påverkan från branden [2].

Exempel på en dispersionsaerosol är en produkt kallad Envirogel [39], vilken har testats [3] enligt delar av MSC/Circ.848 [4], vid US Coast Guards anläggning i Mobile, Alabama. Släckmedlet består av pulver som sprids med hjälp av en HFC-gas<sup>2</sup>. Då försöken genomfördes hade produkten inte tidigare testats i så stor rumsvolym som nu användes ( $500 \text{ m}^3$ ). Under provningen hade man också svårigheter med att lösa distributionen och fördelningen av släckmedlet.

---

<sup>1</sup> Partikeldiametern för ett pulverläckmedel är 10 - 100 gånger större än för ett aerosolsläckmedel.

<sup>2</sup> Fluorerade kolväteföreningar.

## 1.2 Pyroteknisk generering av aerosoler

Vid pyroteknisk generering av aerosoler erhålls mycket små partiklar. Partiklarna bildas genom att släckmedlet förångas i generatoren vid hög temperatur varefter de övergår till vätska eller fast fas när gasen kyls. Aerosolerna genereras genom förbränning av en fast blandning bestående av ett fint pulver, oxidationsmedel, förtunningsmedel och ett bindemedel [5]. Resultat visar att ungefär 20 % av grundmaterialet SFE inte formar aerosoler vid förbränningen och att ytterligare 15 till 20 % förloras genom att det fastnar i bädden av svårsmälta material som fungerar som kylmedel [5].

Produktionshastigheten av aerosolen är en funktion av SFE's sammansättning, form (fast, pulver eller som gel) och tillförselsystem. Genom att variera mängderna av aktiva komponenter samt oxiderande och reducerande medel, kan förbränningshastigheten påverkas [2].

Den pyrotekniska genereringen av brandsläckande aerosoler sker vid höga temperaturer. Den maximala temperaturen varierar från 680°C för formel C (se nedan) till 1370°C för formel A. Formel A och C definierar olika sammansättningar av de kemiska komponenterna i det aerosolbildande släckmedlet SFE. Förbränningsvärmets varierar från ~4,0 kJ/g för formel A till ~4,6 kJ/g för formel C. Antändning och förbränning av blandningen skapar aerosoler i storleksordningen 2 µm [5].

### 1.2.1 Gasformiga biprodukter

Utöver de aerosoler som frigörs produceras samtidigt även andra gaser med brandsläckande egenskaper. Förbränningsprodukterna från de flesta aerosolsläcksystemen består till 40 % av fasta partiklar och till 60 % av gaser. Gasprodukterna består av kväve (N<sub>2</sub>), koldioxid (CO<sub>2</sub>), kolmonoxid (CO), vatten (H<sub>2</sub>O), syre (O<sub>2</sub>) samt spår av kolväten. Den höga temperaturen hos flödet av aerosoler och gaser orsakar att aerosolen stiger till de övre skikten av rummet vilket gör att den brandsläckande effektiviteten minskar om branden är lågt placerad. Aerosolen som skapas ur SFE kan anses vara en blandning mellan ett gas-släckmedel och ett pulver-släckmedel (torra kemikalier) [1]. Efter en aktivering av ett SFE-släckmedlet bestod atmosfären av beståndsdelarna enligt tabell 1.

Tabell 1 Sammansättningen av olika gaser som bildas vid aktivering.

Ämne	Utan kylning	Med kylning
N <sub>2</sub>	78 – 79 %	78 – 79 %
O <sub>2</sub>	19 – 20 %	20 – 21 %
CO <sub>2</sub>	0,2 – 2 %	0,1 – 0,6 %
CO	0 – 0,1 %	0,1 – 0,5 %
C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	1 – 16 ppm	1 – 700 ppm

De fasta partiklarna kan vara olika typer av salter beroende på den ursprungliga oförbrända blandningens sammansättning eller bestå av starkt basiska ämnen, t ex kaliumhydroxid KOH. Både salterna och de basiska ämnena som bildas kan vid hög luftfuktighet orsaka kraftig korrosion på metaller [5].

### 1.2.2 Partikelstorlek

Storleken på de partiklar som bildas vid förbränningen är 1 till 3 mikrometer i diameter. Dessa partiklar är så pass små att de kan hålla sig svävande i det skyddade utrymmet i perioder om 10-tals minuter till flera timmar. Ett exempel på storleksfördelning ges i tabell 2 nedan.

Tabell 2 Exempel på partiklarnas storleksfördelning enligt uppgifter i brev från det ryska sjöfartsverket [6]

Storleksfraktion [ $\mu\text{m}$ ]	Andel partiklar [%]
< 2	42
2 – 5	43
5 – 10	13
>10	2

I en toxikologisk studie av Kimmel et al [7] mättes aerosolpartiklarnas MMAD (Mass Median Aerodynamic Diameter<sup>3</sup>) för sammansättning A1 (se tabell 5 nedan) av släckmedlet SFE till mellan 1,94 och 3,69 mikrometer beroende på den dimensionerande startkoncentrationen (laddningen) medan standardavvikelsen,  $\sigma_g$ , varierade mellan 1,6 och 1,9. För sammansättning A2 av samma släckmedel var motsvarande värden mellan 2,48 och 4,53 mikrometer och  $\sigma_g$  varierade mellan 1,7 och 2,1.

### 1.2.3 Betydelsen av det skyddade rummets storlek

I ett test av Kimmel et al [8] undersöktes skillnader i atmosfären, efter pyroteknisk generering av SFE, i en inhalationskammare och i ett storskaligt rum. Masskoncentrationen av aerosolpartiklar var ungefär 1,5 gånger högre i det stora rummet jämfört med den lilla exponeringskammaren. I båda fallen avtog koncentrationen av aerosolpartiklar exponentiellt med likartade hastigheter. Den hygroskopiska tillväxten av partiklarna var större och skedde snabbare i det i det stora rummet. Gaskoncentrationen var även den en faktor 1,5 högre i det stora rummet. I det stora rummet avtog dock gaskoncentrationen exponentiellt medan gaskoncentrationen i den lilla exponeringskammaren var konstant under försökstiden på en timme [8].

## 1.3 Aerosolens egenskaper

En partikels förmåga att hålla sig svävande hänger ihop med dess storlek. De egenskaper som påverkar utformningen av ett aerosolsystem beror av vilka egenskaper man vill prioritera hos aerosolen. Om man vill att aerosolen skall uppföra sig som en gas, det vill säga kunna strömma runt hinder, ta sig runt och bakom föremål och kunna infiltrera små utrymmen, är det viktigt att partiklarna är små. Ju större en partikel är desto mer påverkas den av gravitation och tröghet.

Förlusten av aerosolpartiklar sker genom sedimentation, diffusion och koagulation. Storleken (massan) och hastigheten hos aerosolpartiklarna påverkar rörelsen. Större

<sup>3</sup> MMAD för en partikelmängd definieras som den aerodynamiska diameter  $d_a$  där hälften av en mängdens massa består av partiklar med större diameter än  $d_a$ . Med en partikels aerodynamiska diameter  $d_a$  menas den diameter en (sfärisk) vattendroppe har med samma fallhastighet som partikeln.

partiklar med en radie större än 1 mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) har en tendens till att falla ned och förloras genom sedimentation medan mindre partiklar i submikronstorlek diffunderar ut till väggarna genom Brownsk rörelse. Koagulation, bildandet av större partiklar genom kollisioner, orsakas av olika krafter såsom termiska, elektriska, molekylära och hydrodynamiska krafter [1].

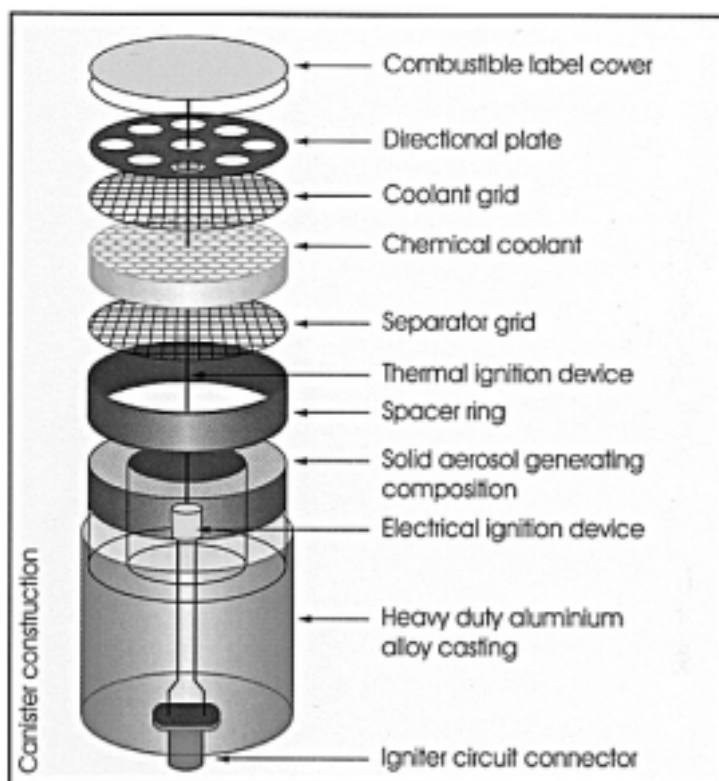
I en studie av Kimmel et al [9] mättes masskoncentrationen av fasta partiklar i volymer innehållande släckmedlet SFE formel A. Under statistiska förhållanden avtog masskoncentrationen av partiklar exponentiellt på grund av gravitationens inverkan. Halveringstiden  $T_{1/2}$  varierade mellan 16 och 18 minuter.

## 1.4 Släckegenskaper

Värmeabsorption och heterogen katalys är exempel på fenomen som sker på ytan av de bildade aerosolpartiklarna - ju större area som finns tillgänglig desto snabbare kommer dessa processer att ske, vilket innebär att förmågan att släcka en brand ökar. Små partiklar av ett material har en större ytarea per massenhet och en minskad partikeldiameter har visat sig ha en positiv inverkan på effektiviteten då en brand släcks. Ytterligare en fördel med små partiklar är att när de väl har blivit fördelade håller de sig svävande längre. En typisk sfärisk partikel av kaliumsalt med en diameter på  $10 \mu\text{m}$  har en fallhastighet på ungefär  $5 \text{ mm/s}$  vilket innebär en uppehållstid i luften på i storleksordningen några minuter. Med en diameter på  $1 \mu\text{m}$  erhålls en hastighet på  $\sim 0,05 \text{ mm/s}$  och en uppehållstid som kan mätas i timmar [10]. Aerosoler av mycket små partiklar uppför sig som en gas och inertering av branden blir möjlig under en längre tid [2].

## 1.5 Aerosolgenerators utformning

En partikelgenerator för SFE har tre större delar; höljet, eldfast material/isoleringsmaterial och ett antändningssystem. Kylningen av aerosolen måste kopplas med en isolering av höljet från värmen som alstras då SFE förbränns. För generatorhöljet är det viktigt att det har en hög motståndskraft mot bland annat värme och värmechock. Höljet skall även ha en förmåga att hålla kvar och begränsa flammen och den tryckupbyggnad som orsakas av SFE-förbränningen. En för snabb tryckupbyggnad skulle i värsta fall kunna orsaka en explosion.



Figur 1: Principskiss på en generators beståndsdelar [33].

Höljet skall också ha en maximal kontaktyta mot aerosolerna utan att förhindra aerosoler från att flöda ut, vilket skulle kunna påverka släckeffektiviteten [5].

### 1.5.1 Den aerosolbildande blandningen

Utgångsmaterialet för pyroteknisk aerosol är ett fast material, pulver eller gel. Detta mals ner till ett fint pulver som blandas med bindemedel av harts. När materialet antänds sprids förbränningsprodukterna ut som en aerosol med fasta partiklar svävande i luften tillsammans med olika gaskomponenter.

Tabell 3 Sammanställning av de olika beståndsdelarna i släckmedlet SFE [1]

A	B	C
Kaliumperklorat	Kaliumnitrat	Kaliumperklorat
Förtunningsmedel av metall	Förtunningsmedel av metall	Kaliumnitrat
Bindemedel av harts	Bindemedel av harts	Förtunningsmedel av metall
		Bindemedel av harts

Ett exempel på pyrotekniskt genererade aerosol är **51-35** vilken tillverkas av det ryska företaget Kaskad. Partiklarna som genereras är baserat på Kaliumnitrat ( $\text{KNO}_3$ ), organiska föreningar olösliga i vatten, phenol-formaldehyd harts ( $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{O}_2$ ) samt epoxihartser. Ett annat exempel på kemisk sammansättning hos släckmedel är Soyus aerosolsystem från Dynamit Nobel AG [11]:

- Kaliumnitrat 63 %
- Nitrocellulosa 13 %
- Glycerintriacetat 10 %
- Kol 9 %
- Olja/vax 2 %
- Fe III oxid 0,5 %
- Diphenylamin 0,5 %
- Centralit 0,5 %

### 1.5.2 Aerosolens utströmningstemperatur

I en rapport av Vitali, Kibert och Akers [5] behandlas den tekniska utvecklingen av ett aerosolsystem som ger ett flöde av partiklar och gas vid en relativt låg temperatur, vilket i sin tur medför en relativt snabb termodynamiskt jämvikt med den omgivande luften. Att sänka temperaturen hos aerosolen kan uppnås med olika värmeväxlingstekniker.

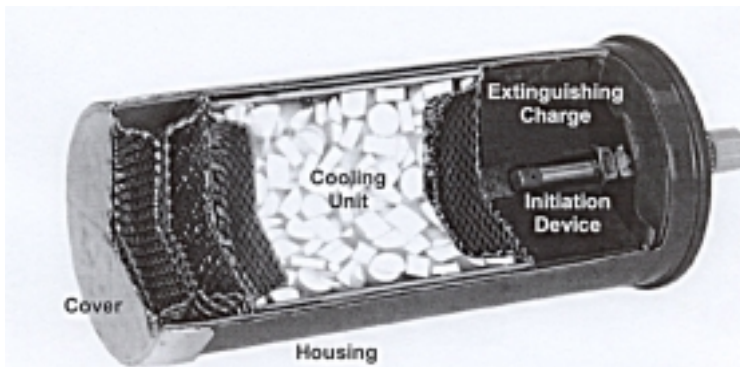
En reducering av temperaturen hos aerosolen är även viktigt ur personsäkerhetssynpunkt med tanke på att höga temperaturer kan orsaka brännskador hos människor som befinner sig framför generatoren. Föremål kan även antändas eller få skador av en hög temperatur om de är placerade för nära generatoren.

För att ge aerosolen möjlighet att sprida sig och fördelas i rummet behövs enligt [5] ett fritt avstånd på minst 1 meter om mindre än 1 kg släckmedel används i generatoren och minst 2 m för 'större' generatorer.

## 1.6 Generatorns kylmedel

### 1.6.1 Viktiga aspekter

Tester av olika medium visar att någon typ av fast material är det bästa att använda som kylmedel. Ett fast material har generellt bättre termisk konduktivitet än vatten, men inte lika bra värmelagringsförmåga. En annan viktig egenskap hos ett fast material är att det som regel har en hög smältpunkt vilket innebär att det kan behålla sin strukturella form även vid höga temperaturer.



Figur 2: Genomsnitt av en generator från Dynamit Nobel med det värmeabsorberande kylmedlet i mitten [36].

Principen med att använda ett fast material som kylmedel bygger på att man låter flödet av varma aerosoler strömma genom en packad sektion av små, värmeabsorberande kulor. Packningen av kulorna är kritisk då det är viktigt att optimera kulornas yta för en effektiv värmeöverföring från flödet till det värmeabsorberande materialet. En bädd av små kulor ger en större total area per längdenhet, det vill säga mer energi kan ledas bort från flödet. Samtidigt kan för små kulor ge upphov till oönskat tryckfall. En annan viktig aspekt är adhesionen av aerosolpartiklar på ytan av de värmeabsorberande kulorna. För en bädd med små kulor är den totala effektiva ytan för adhesion större än en bädd med stora kulor [5].

### 1.6.2 Olika typer av kylsystem

För att minska problemet med höga temperaturer vid utströmningen finns det olika typer av kylsystem. En lösning är att använda en kemisk kylare. Aerosolen passerar då på sin väg ut ur generatoren ett skikt bestående av en kemisk förening som reagerar endotermiskt och därmed absorberar värme. Fysisk kylning kan åstadkommas med hjälp av värmeledande metallkonstruktioner, vattenbaserade system eller kemikalier som tar upp energi utan att reagera. De uppgifter som påträffas i artiklar tyder på att kylning av släckmedlet medför att partiklarna som strömmar ut blir större. Därigenom minskar också deras yta per massenhet, vilket bland annat resulterar i lägre släckeffektivitet.

### 1.6.3 Materialval

Materialet hos kylmedlet måste ha en smältpunkt som är högre än den temperatur som alstras av den pyrotekniska processen. Skulle kylmedlet smälta kan aerosolflödet blockeras vilket kan orsaka en explosion. Materialet bör även ha en hög specifik värmekapacitet och finnas kommersiellt tillgängligt.

Vitali, Kibert och Akers [5] fann två material som uppfyllde dessa krav för ett kylmedel:

- Aluminiumoxid med en specifik värmekapacitet på 1,09 kJ/kg K och en smältpunkt på 2054°C.
- Magnesiumoxid med en specifik värmekapacitet på 1,17 kJ/kg K och en smältpunkt på 2826°C.

## 1.7 Aerosolsystemets effektivitet

### 1.7.1 Faktorer som påverkar släckeffektiviteten

För att kunna designa ett effektivt aerosol baserat släcksystem måste hänsyn tas till flera olika kemiska och fysiska detaljer hos tekniken [2]:

- Aerosolerna produceras genom en exoterm kemisk reaktion som genererar mycket värme (temperaturen i förbränningszonen kan uppgå till 2000 K).
- Förbränningsprocessen producerar synliga flammor, flamfronten avancerar tillsammans med aerosolströmmen.
- Aerosolernas spridningsmönster påverkas av krafterna vid aktivering (förbrännings-hastigheten), atmosfäriska förhållanden (vind och luftflöden), brandstorlek och turbulens samt partikelkoncentrationen.
- Aerosolens rörelsemängd när den lämnar partikelgeneratoren beror på vilka kemiska ingredienser som SFE (grundmaterialet) består av, hur stor area av ytan som är tillgänglig vid förbränning, tryckuppbyggandet av gasprodukterna och vilken sträcka aerosolen passerar i generatoren (systemet) innan den lämnar den, munstycket utformning och storlek.

Vid en undersökning av Jacobson *et al.* [12] observerades att temperaturen hos de pyrotekniskt genererade aerosolerna när de når flammen är en viktig faktor när det gäller dess släckeffektivitet. De varma aerosolpartiklarna är mer aktiva, fyller det skyddade utrymmet under längre tidsperioder och släcker flammen snabbare vid lägre koncentrationer. Ytterligare tester har gjorts vid Hatsuta testanläggning i Japan där olika design av aerosolgeneratorer och olika släckkoncentrationer av släckmedlet SFE undersöktes. De huvudsakliga resultaten som gjordes var:

1. Lågt placerade bränder krävde längre släcktider.
2. En ökning av den dimensionerande koncentrationen betydde inte nödvändigtvis en förbättring av dess effektivitet.
3. Utformningen av generators inre förbränningskammare var kritisk när det gäller aerosolens produktionshastighet och dess effektivitet.
4. Korrosionstest på stål, aluminium, koppar och tenn visade inga tecken på korrosion.
5. Gasanalyser av aerosolatmosfären visade att speciellt koncentrationen av kolmonoxid påverkades kraftigt av den kemiska sammansättningen av den aerosolbildande blandningen SFE och av generators utformning.

### 1.7.2 Designfaktorer som påverkar släckeffektiviteten

I tester gjorda av Jacobson [13] undersöktes hur design och konfiguration av ett aerosolsystem påverkar dess släckeffektivitet. Testresultaten visade på flera olika faktorer som påverkar ett systems effektivitet, bland annat SFE generators placering, där en placering mitt i rummet gav bäst resultat. Formel A (se tabell 3 ovan) som har den snabbare förbränningshastigheten av formlerna A och C (släckmedlet som testades) gav bäst resultat av de två olika sammansättningarna. Modifieringar av generatoren för att få en kraftigare ström av aerosoler och rikta strömmen nedåt direkt mot branden ökade turbulensen av partiklar i testrummet och släckte branden snabbare.



Släckeffektiviteten hos aerosolerna har visat sig bero på flera olika designfaktorer [12]:

- Den kemiska sammansättningen av grundmaterialen.
- Generatorns utformning, speciellt den inre förbränningskammaren och den väg som aerosolerna passerar inuti generatorn.
- Aerosolens temperatur vid generatorns utsläpp.
- Utformningen av det skyddade utrymmet och placeringen av generatorerna.

## 2 Släckmekanismer

### 2.1 Aerosolernas släckmekanismer

Det är huvudsakligen tre olika mekanismer hos aerosolen som släcker en brand. Den första mekanismen är termisk, då materialet i partiklarna bryts ned i en *endoterm* process. Nedbrytningsreaktionerna absorberar därmed värme från branden (i motsats till en *exoterm* nedbrytning som skulle ha genererat värme).

Den andra mekanismen är kemisk. Aktiva komponenter i brandrummet såsom väte-, hydroxid- och syreradikaler vilka gör att en flamma propagerar, kan återbildas genom heterogent katalyserade reaktioner på partiklarnas yta, eller som ett resultat av reaktioner i gasfas där alkalimetallerna deltar som katalysatorer. Detta leder till att förbränningsreaktionerna avstannar och flammen slocknar.

Slutligen har de produkter som bildas vid förbränningen av den aerosolbildande blandningen, bland annat vattenånga och koldioxid, en inerteffekt.

Två av mekanismerna, värmeabsorption och heterogen katalys, är fenomen som sker vid partikelns yta. Detta innebär att ju större den totala ytan är desto snabbare sker dessa processer och därmed ökar släckeffektiviteten. Små partiklar har en större yta per massenhet och är till följd av detta effektivare för att släcka en brand än större partiklar [10]. Man har dock visat att den ökade värmeabsorptionen inte bara är en effekt av mer exponerad yta/kg då partikeldiametern minskar utan att den också är en direkt effekt av partikeldiametern i sig [14] (se nedan).

### 2.2 Släckegenskaper

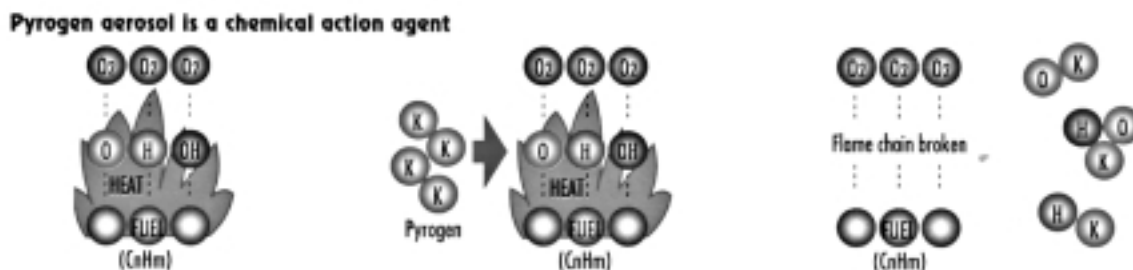
Släckning av brand sker genom att utföra ett eller flera av fyra möjliga alternativ:

- Ta bort bränslet
- Uteslut syret från processen
- Absorbera producerat värme
- Bryt de kemiska kedjereaktionerna.

Fasta aerosolpartiklar fungerar som ett släckmedel genom samtliga dessa mekanismer utom den första. Kemisk inhibering av radikalreaktioner via katalytiskt aktiva ytor, värmeabsorption och kylning via nedbrytning och förångning av de fasta partiklarna, utspädning av syrekonzentrationen i flamregionen då den kemiska reaktionen av partiklarna och aktiva ämnen producerar inerta gaser som koldioxid, vilket leder till lokalt låga syrekonzentrationer.

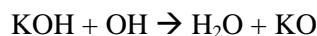
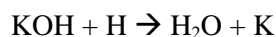
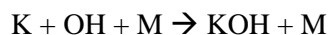
### 2.3 De kemiska kedjereaktionerna

Den kemiska släckeffekten utgörs av att fria syre-, väte- och hydroxidradikaler, vilka får en flamma att propagera, tas bort från flammans reaktionskedja av t ex kaliumradikaler. Kaliumradikalen är väldigt aktiv och reagerar med O-, H- och OH-radikaler och avbryter därmed förbränningsreaktionen. På ytan av aerosolpartikeln reagerar sedan syre-, väte- och hydroxidradikalerna med varandra.



Figur 3 Exempel på den kedjebrytande effekten som aerosolerna har på förbränningsreaktionerna i branden [33]

Att bryta den kemiska reaktionskedjan är en funktion av flera variabler. Beroende på temperaturen vid interaktionen kan aerosolpartiklarna fungera som inhibitorer genom följande steg [1].

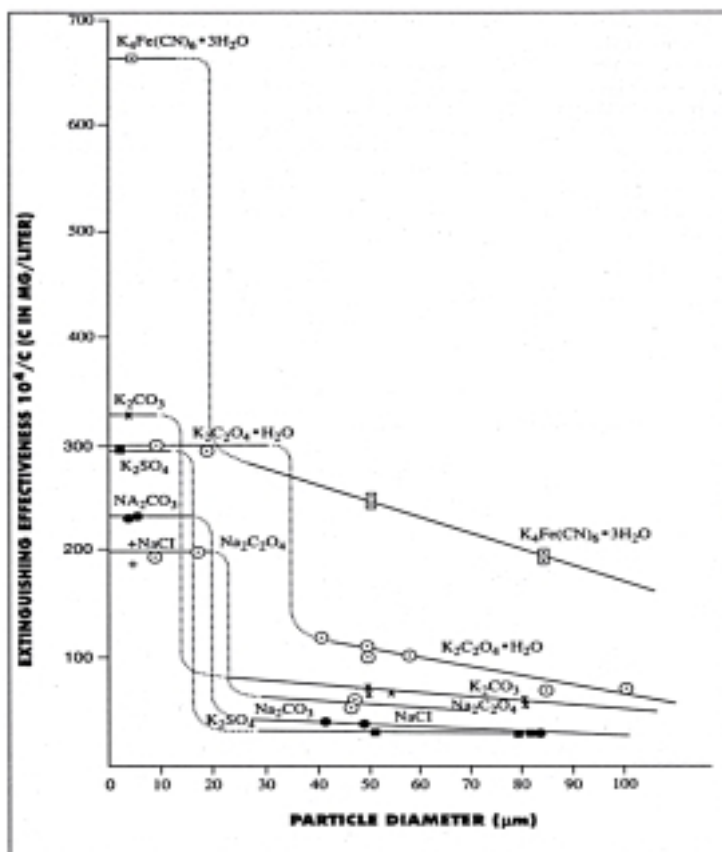


M är den energi från branden som tillförs reaktionen och OH och H är de aktiva ämnena. De kemiska föregångarna som reagerar och samverkar med de aktiva ämnena beror på hur alkalimetallerna (K, Na, Cs, Rb, Sr och  $NH_4$ ) och anjonerna ( $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  och  $PO_4^{3-}$ ) uppför sig. Alkalimetallerna har bevisats vara särskilt effektiva som branddämpare. Kaliumsalterna är i regel överlägsna natriumsalterna. Även anjonerna spelar en viktig roll för hur effektivt branden bekämpas [1].

## 2.4 Partikelstorlekens betydelse vid termisk kylning av flammen

Då en dispersionsmetod används för att sprida en aerosol är ursprungspartiklarna som regel större än för en pyrotekniskt genererad aerosol. Partiklarna kan då ha formen av torra kemikalier vilka måste sönderdelas i flammen för att erhålla nödvändig specifik yta för interaktion. För att vara ett effektivt släckmedel måste stora partiklar brytas ner till partiklar i submikron storlek (dvs. partikelns diameter  $d$  är under en mikrometer,  $d < 1 \mu m$ ) vilka effektivt kan interagera med flammorna och producera inhiberande ämnen t ex alkalihydroxider. Uppehållstiden i flammen är viktig för att nedbrytningen skall kunna ske.

För en stor partikel kan den nödvändiga uppehållstiden vara svår att uppnå då partikelns massa kommer att få partikeln att snabbt falla genom flammen. När det gäller aerosolpartiklar i storleksordningen  $1 \mu m$  är den nödvändiga uppehållstiden för att producera de reaktiva ämnena mycket kortare. Diffusionsegenskaperna hos den lilla solida partikeln får den att stanna kvar i flammen. Utöver partikelstorleken måste hänsyn även tas till effekter som beror av partikelns densitet och rörelsemängd samt konvektionskrafter när partikeln penetrerar flammen [1].



Figur 4 Betydande effektivitetsökningar i släckeffekt kan fås vid vissa partikelstorlekar [1].

Pulvrets effektivitet är relaterad till dess specifika yta och absorptionsförmåga, partikelns förmåga att kemiskt/katalytiskt bromsa radikalreaktioner och generera inertgaser samt ämnets förmåga till värmelagring genom förångning och nedbrytning.

Den sista punkten får en stor betydelse särskilt då de använda partiklarnas diameter underskrider en kritisk gräns,  $S_L$ , som är specifik för varje ämne men som 'typiskt' ligger under 50 mikrometer [14, 15]. Underskrids denna gräns  $S_L$ , erhålls en markant ökning av medlets släckverkan. Fenomenet har förklarats med att en partikel med en diameter  $< S_L$  fullständigt bryts ned och förångas. Bägge dessa steg tar energi från flaman. Partiklar med en diameter  $> S_L$  har istället en termisk stabilitet som förhindrar nedbrytningen varför pulvrets värmelagringsförmåga och därmed dess släckeffektivitet drastiskt minskar. Experimentella data visar ett ökat behov av släckmedel på 5-8 gånger för att erhålla samma släckeffekt som följd av att partikeldiametern  $d$  ökade från  $d < S_L$  till  $d > S_L$  [15].

Det har demonstrerats att små partiklar av torrt pulver mindre än gränsstorleken  $S_L$  kan skapas med hjälp av mekaniska medel. Dock är den praktiska användningen av mekaniskt tillverkade partiklar begränsad på grund av svårigheten att lagra ämnen under lång tid utan att de klumpar ihop sig. Fuktighet kommer också att ha en skadlig effekt på de torra substanserna och resultera i att kemikalierna förstörs. Produktion av partiklar genom förbränning kringgår dessa problem och det fasta materialet (SFE) har en uppskattad livstid på 15 år [1].

## 2.5 Andra parametrar som påverkar släckeffektiviteten

I några försök utförda av Kibert och Dierdorf [1] testades släckmedlet SFE och dess släckningsförmåga. Försöken utfördes med SFE placerat under nivån för branden då aerosolen har en tendens att stiga på grund av dess höga genereringstemperatur och på buoyancy-krafter (termisk lyftkraft). SFE placerades även över nivån för branden. Med SFE placerat ovanför branden så var släcktiden betydligt längre än då SFE var placerad under branden. Experiment med SFE visar att ju turbulenta branden är desto snabbare sker släckningen. Turbulens ökar omblandningen och ger bättre kontakt mellan aerosolpartiklarna och flammen och därmed bättre värmeöverföring.

Vid försöken var släcktiderna generellt betydligt längre för formel B (se tabell 3) av SFE, vilket tyder på att även den kemiska sammansättningen av släckmedlet har en stor betydelse för dess effektivitet.

## 3 Praktiska erfarenheter av aerosoler

### 3.1 Släckförmågan hos aerosolsläckmedlet

Vid ett testprogram [2] testades ett släckmedel SFE av typ A, map släckförmåga vid rumsfyllnad på klass A (träribbstaplar) och klass B bränder (poolbrand av n-heptan). Vid försöken undersöktes släckeffektiviteten och aerosolernas inerteringsförmåga. Försöken genomfördes i ett 60 m<sup>3</sup> stort rum med dimensionerna 4 x 3,3 x 4,3 m (längd x bredd x höjd). Två stycken generatorer som vardera innehöll upp till 3 kg släckmedel placerades invid väggarna, i golvnivå och brandkällorna placerades mitt i rummet.

Resultatet visade att aerosolen som generatorm genererade hade kylts ner till omgivande temperatur 0,5 meter från generatorm. Det förekom heller inga risker för skador på grund av tryck, värme eller toxicitet vid kontakt med utrustningen. SFE-aerosolen bedömdes vid testerna inte vara toxisk vid släckande koncentrationer på 50 - 100 g/m<sup>3</sup>, och upp till 240 g/m<sup>3</sup> observerades inga dödsfall bland försöksdjuren [2].

I en annan artikel redovisas försök där klass A bränder släcktes med olika typer av kommersiella dispersionsaerosoler [16]. Man uppskattade bl. a släckmedlens effektivitet, uttryckt som nödvändig mängd pulver per exponerad brandyta. Värdena som erhöles låg kring 300 g/m<sup>2</sup>.

För att släcka klass B bränder finns släckkoncentrationer på mellan ~10 - 250 g/m<sup>3</sup> rapporterade [14,15]. Den stora variationen beror på vilken typ av partiklar som använts, hur partikelstorleksfördelningen såg ut och på vilket sätt som partiklarna har distribuerats. Det sistnämnda är en viktig parameter och i [15] redovisas hur en trefaldig ökning av påföringstrycket för aerosolen (från ~15 till 50 psi.) medför en minskning av kritisk partikelkoncentration för att släcka en klass B brand, från 90 till 30 g/m<sup>3</sup>. Orsaken till detta är förstas den förbättrade omblandningen och därmed den förbättrade kontakten mellan aerosol och flamma som tryckökningen åstadkommer.

### 3.2 Dimensionering av släckmedel vid rumsskydd

#### 3.2.1 Dimensioneringsmetod enligt ett ryskt förslag

I sitt förslag till IMO:s underkommitté för brandskydd (FP) föreslog Ryssland 1998 följande modell för dimensionering [17]:

$$M=K_1 * K_2 * K_3 * V * Q$$

V = utrymmets volym (m<sup>3</sup>).

Q = den dimensionerande släckande koncentrationen av det aerosolbildande släckmedlet, (bestäms experimentellt för varje typ av generator (kg/m<sup>3</sup>)).

K<sub>1</sub> = koefficient som tar hänsyn till oregelbundenheten i spridningen av aerosolen i det skyddade utrymmet.

K<sub>1</sub> = 1,1 när de icke stängningsbara öppningarna är 0,1 % eller mindre, av den totala omslutande arean, inklusive golv och tak.

$K_1 = 1,3$  när de icke stängningsbara öppningarna är större än 0,1 % av den totala omslutande arean inklusive golv och tak.

$K_2$  = säkerhetsfaktor som tar hänsyn oförutsägbara förluster av aerosol. Detta beror bland annat av sådant som påverkar aerosolens spridning i rummet som t ex rummets inredning och utformning. Talet definieras som kvoten mellan arean hos rummets interna konstruktioner (dvs. alla ytor som inte utgör rummets avgränsning) och rummets volym ( $m^{-1}$ ).

$K_2 = 1,3$  när den förhindrande faktorn är  $1,0 m^{-1}$  eller mindre.

$K_2 = 1,4$  när den förhindrande faktorn är mellan  $1,0$  och  $5,0 m^{-1}$ .

$K_2 = 1,8$  när den förhindrande faktorn är  $5,0 m^{-1}$  eller mer.

$K_3$  = felkoefficient vid bestämmandet av Q-faktorn, normalt ansätts  $K_3 = 1,1$ .

Antal generatorer kan bestämmas genom formeln  $N = M/m$ , där  $m$  är släckmedelsmängden (kg).

Begränsningen för den dimensioneringsmetod enligt det ryska förslaget är att metoden endast kan användas vid atmosfäriska förhållanden samt i utrymmen där den totala arean av öppningar som inte är stängningsbara, är mindre än 0,5 % av den totalt omslutande arean.

Definitionen på Q innebär att den dimensionerande koncentrationen måste bestämmas för varje typ av generator. Släckeffektiviteten hos aerosolerna påverkas av temperaturen vid generering. Det ryska förslaget skiljer mellan tre olika aerosol-typer:

1. Varma aerosoler, där temperaturen vid generatorns utsläpp är högre än  $600^{\circ}C$ . Den dimensionerande partikelkoncentrationen anges till  $50 g/m^3$ .
2. Kylta aerosoler, där temperaturen vid generatorns utsläpp är mellan  $200$  och  $600^{\circ}C$ . Den dimensionerande partikelkoncentrationen anges till  $70 - 80 g/m^3$ .
3. Kalla aerosoler, där temperaturen vid generatorns utsläpp är under  $100^{\circ}C$ . Den dimensionerande partikelkoncentrationen anges till  $100 - 110 g/m^3$ .

Enligt det ryska förslaget skall placeringen av aerosolgeneratorerna ske på ett sådant sätt att personal eller utrustning inte påverkas av jetutströmningen av aerosol från generatorn, och att den tillgodoser en effektiv distribution av partiklar i rummet.

Utanför det skyddade rummet i närheten av rummets ingångar föreslår man att det skall finnas skyltar som talar om att det finns ett aerosolsläcksystem och att det skall finnas ljus- och ljudsignaler som varnar vid aktivering.

### 3.2.2 Metod enligt Australiensisk/Nya Zeeländsk standard

I den Australiensisk/Nya Zeeländska standarden för aerosolsystem [18] används vid beräkning av erforderlig mängd släckmedel den enkla formeln:

$$M = C \cdot V$$

där

$M$  = massan släckmedel som behövs för släckning (g).

$C$  = lägsta dimensioneringsfaktor ( $\text{g/m}^3$ ).

$V$  = volymen av det skyddade utrymmet ( $\text{m}^3$ )

Dimensioneringsfaktorn  $C$  bestäms genom försök, s.k. 'listning' för varje specifik risk. Standarden innehåller inga referenser till dimensionering utöver en hänvisning till att minimimängden skall vara  $100 \text{ g/m}^3$ . Vid listningen skall också begränsningar sättas för generatorns täckningsarea, maximal takhöjd, etc. Vid lägre lufttryck än normalt behövs ingen korrektion av släckmedelmängden, men för högre tryck korrigeras uttrycket med en korrektionsfaktor. På motsvarande sätt behöver man korrigera för temperaturer under  $0^\circ\text{C}$ .

Standarden innehåller modeller både för att ta hänsyn till öppningar och för att kompensera för ventilationssystem som inte stängs av. En komplicerande faktor om man vill uppnå längre hålltider är att generatorerna endast levererar släckmedel under några sekunder efter aktivering. Man kan därmed inte uppnå en långsam "pysande" påspädning. För att uppnå långa hålltider kan man vara tvungen att aktivera ett antal generatorer sekventiellt.

### 3.3 Siktnedsättning vid generering av aerosoler

Aerosolröken som produceras av generatorerna är tät och påverkar sikten i rummet kraftigt. Den optiska densiteten, eller siktbarheten hos röken, är en parameter som lätt går att mäta och bestämma. Men vid en brand i ett utrymme produceras även brandgaser och brandgasernas egenskaper beror till stor del på vad det är som brinner. Vid en aktivering av ett aerosolsystem är det alltså inte enbart aerosolröken som bör beaktas utan även den inblandning av brandgaser som kommer att ske. Bland annat United States Coast Guard (USCG) framför åsikten att det inte praktiskt går att förutsäga vare sig rökens färg eller densitet och att en eventuell standard som behandlar siktnedsättning vid användning av aerosolsystem därför skulle vara meningslös [19].

Vid en eventuell oavsiktlig aktivering av hela eller delar av ett aerosolsystem, skulle den mängd som produceras kunna variera kraftigt beroende på hur många generatorer som är installerade i utrymmet. En annan synpunkt gäller den kemiska sammansättningen av röken. Om den är irriterande för ögonen leder detta till siktsvårigheter oavsett vilken optisk densitet röken har som produceras. Det kan istället vara nödvändigt att fastställa kriterier som endast tillåter system som inte kan irritera ögonen [19].

### 3.4 Tillförlitligheten hos aerosolsystemet

Bland annat USCG har haft bestämda uppfattningar angående olika metoder att aktivera ett aerosolsystem och tillförlitligheten hos dessa. För ett gassläcksystem som består av ett antal behållare förvarade utanför det skyddade rummet, leds släckmedlet in och fördelas i rummet med hjälp av rör och munstycken. Om det uppstår ett fel kan systemet aktiveras manuellt från förvaringsutrymmet.

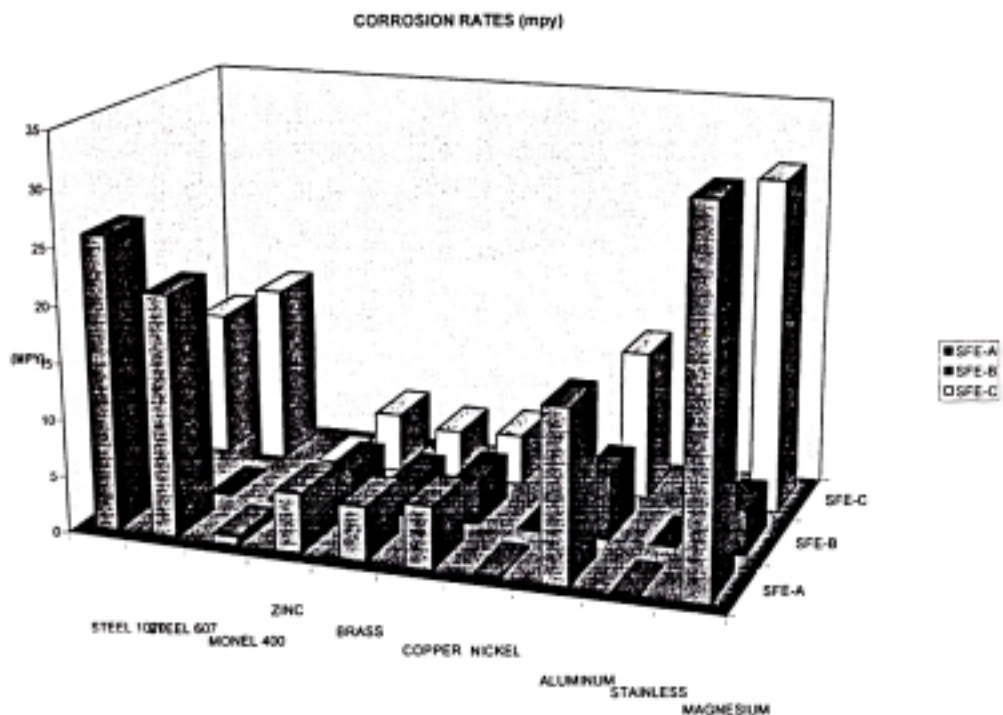
För ett aerosolsystem som består av många generatorer utplacerade i hela utrymmet finns det inget system som klarar av att aktivera alla generatorer samtidigt. En del modeller har även en termisk urladdningsmekanism. Detta kan dock innebära att generatorer aktiveras vid olika tillfällen och förhindrar en uppbyggnad av nödvändig släckkoncentration. USCG menar att det kanske skulle behöva finnas en reserv av släckmedlet på 100 % för att skydda mot fel som förhindrar en aktivering av systemet. En alternativ



lösning skulle kunna vara att placera generatorerna utanför rummet vilket möjliggör en andra, manuell aktivering [19].

### 3.5 Korrosionsanalys

Ett av frågetecknena angående användandet av pyrotekniskt genererade aerosoler är hur korrosivt det är vid långvarig kontakt med metaller eller metallegeringar. Det har konstaterats att de flesta aerosoler innehåller kaliumsalter och baser som t ex kalium- och magnesiumhydroxid. Avsättning av dessa aerosoler på metallytor kan orsaka betydande korrosion. Korrosiviteten för släckmedel som innehåller klorider kan förväntas vara högre än för de medel som baseras på nitrater.



Figur 4 Korrosionshastigheten för tio olika metaller [5].

I en studie undersöktes korrosion på tio kända metaller eller legeringar då de utsattes för avlagringar från släckmedel av typen SFE med tre olika sammansättningar A, B och C (se tabell 3 ovan). Studien utfördes enligt Standard från ASTM (American Society of Testing and Materials) och exponeringstiden var 30 dagar. Resultaten kan inte extrapoleras till att förutsäga resultat för längre exponeringstider men resultaten kan ses som en indikation på möjliga typer av korrosion och korrosionshastigheter. Svårigheten med extrapolation beror bl.a. av att det är många faktorer som påverkar korrosionen; exempelvis atmosfäriska förhållanden, luftföroreningar, temperatur och vindriktning [5].

Resultatet i rapporten presenterades i tre kategorier; korrosionshastighet, massförlust och täthet av frätskador.

För testet med SFE formel A, gav det en kraftig korrosionshastighet för kolstål (1020 och 607), aluminium och magnesium. Massförlusten var även den störst hos dessa material, men tätheten av frätskador var ganska lika för alla material utom för aluminium som var mycket mer anfränt än de övriga. För SFE formel B var korrosionshastigheten acceptabel

och mer lika för alla ämnen. Detsamma gäller för massförlusten. För frätskadorna gäller ungefär samma påverkan som för SFE formel A, men angreppen var inte alls lika kraftiga, däremot var det även angrepp på mässing. För SFE formel C var korrosionspåverkan liknande den som SFE formel A uppvisade [5].

### 3.6 Tillämpningsområden

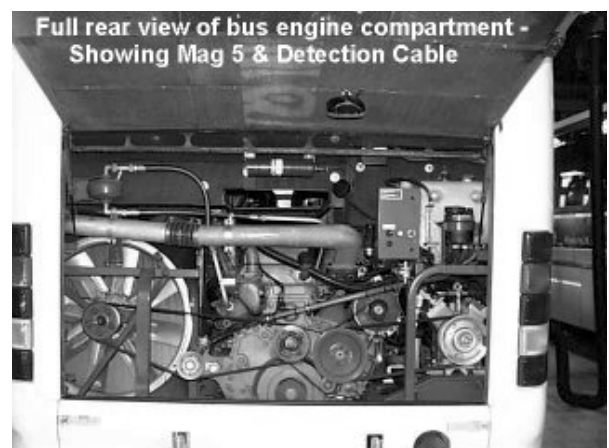
Användningsområdena för pyrotekniskt genererade aerosolsystemen för rumsskydd är många och begränsas till största delen av att systemen är olämpliga att använda i bemannade utrymmen. Aerosolerna som produceras orsakar bland annat en kraftig siktneadsättning som gör det praktiskt omöjligt att orientera sig i det rum där ett system har utlöst.

Det finns flera storlekar på aerosolgeneratorer för olika stora rumsvolymer. För stora utrymmen krävs det ofta att flera generatorer kopplas samman. För att klara av att fylla hela utrymmet måste dessa aktiveras samtidigt vilket ökar riskerna för fel. Mindre lokaler och utrymmen lämpar sig bäst för ett rumsskydd med ett fast aerosolsystem. Exempel på användningsområden för aerosol släcksystem är:

- Motorutrymmen och maskinrum i marina applikationer
- Elektriska tillämpningar som elkopplingskåp, transformatorstationer, kabeltunnlar och kontrollrum.
- Inom kommersiella och militära flygapplikationer.
- Militära fordon t ex maskinrum och utrymmen för besättning.
- Båtar och fartyg t ex maskinutrymmen och containrar.
- Fordon t ex bilar, bussar, tåg och lastbilar.
- Förrådsutrymmen och andra obemannade utrymmen inom industrin och handel.
- Maskiner och automatisk utrustning.

Det område där utvecklingen av test- och dimensioneringsmetoder har kommit längst är inom det marina. International Maritime Organisation (IMO) har bland annat tagit fram en testmetod för maskinrum och andra utrymmen på fartyg, se kapitel 5.2. Aerosolsystem har även testats enligt *Small Boat Machinery Testing Protocol*, och har godkänts för användning på båtar upp till 24 meter inkluderat arbetsbåtar, som t ex polisbåtar och fiskebåtar.

Aerosolsystemen är lätta, kompakta och kräver inte kompletterande utrustning som rör, ventiler och munstycken. Detta gör att det är relativt lätt att installera ett släcksystem i små utrymmen som t ex motorutrymmen. Som exempel kan nämnas att en testserie har gjorts i Norge där man har testat Pyrogen i motorutrymmet på bussar. Detta har lett till att fasta aerosol släcksystem har installerats i motorutrymmet på bussar i trafik [34].



Figur 5 Motorutrymmet i en Norsk turistbuss där ett Pyrogen släcksystem har installerats.

## 4 Hälso-, personsäkerhets- och miljöaspekter

### 4.1 Allmänt

Av de delar av kroppen som kommer i kontakt med den aerosol- och gasfyllda atmosfären är det lungorna som är mest oskyddade och känsligast för yttre påverkan. Lungorna utgör den största delen av människokroppen som är i direktkontakt med atmosfären, men den toxiska effekten av aerosoler är inte begränsat till lungorna. Upplöst material kan transporteras till andra delar och organ i kroppen. Utöver skador på lungorna kan aerosolerna orsaka irritationer på huden och skyddande slemhinnor [20].

En vuxen person andas normalt in och ut 10 till 20 m<sup>3</sup> luft varje dag. Röken från en brand kan innehålla uppemot 10<sup>16</sup> partiklar/m<sup>3</sup> av vilka huvuddelen är inandningsbara [21], vilket betyder att de har en diameter som är mindre än 10 mikrometer.

Genom enkla överslagsberäkningar kan man se att en släckningsaerosol med koncentrationer på 50 - 100 g fast material/m<sup>3</sup> också innehåller stora kvantiteter partiklar. Med en diameter på 20 mikrometer och en densitet på 4 kg/m<sup>3</sup> blir partikelinnehållet >10<sup>12</sup> partiklar/m<sup>3</sup>. För 20 µm stora partiklar fungerar emellertid kroppens egna 'filtreringssystem' ganska väl och så pass stora partiklar anses inte som inandningsbara. I en släckningsaerosol kan man dock utgå ifrån att det finns en hel del partiklar med en diameter som är betydligt mindre. Speciellt gäller detta pyrotekniskt genererad aerosol.

Den dos en människa får i sig beror på andningsfrekvensen, hur djupa andetagerna är och på koncentrationen av det medel som andas in [22]. Samma kemiska mekanismer och fysiska faktorer som har en avgörande roll för aerosolernas släckningsförmåga bestämmer i stort sett också aerosolernas toxicitet vid inandning. Dessa måste undersökas samtidigt när man studerar aerosolernas toxicitet. En partikel med förmågan att absorbera gaser utgör en unik fara genom dess förmåga att transportera andra material djupt ner i lungorna [23].

### 4.2 Avgörande faktorer för den toxiska dosen

Vid kraftigare andning och högre frekvens kommer vi att andas mer genom munnen och hastigheten som luften flödar med i våra andningsvägar kommer att öka. Den ökade volymen av luft som vi andas in kommer att leda till att dosen av aerosoler eller partiklar också kommer att öka. De nasala andningsvägarna har skyddsmekanismer som fångar upp partiklar. Börjar vi andas genom munnen sätter vi till stor del dessa skyddsmekanismer ur funktion och luften med eventuella toxiska ämnen hamnar i luftrören och lungorna. Ansamlingen i lungorna blir större och speciellt ökar andelen stora partiklar som inte längre kan samlas upp i de övre andningsvägarna [23].

Dosen som tillförs de regionala lungvävnader beror på partikelstorlek, specifik ytarea och den kemiska lösligheten. Potentiella toxiska effekter från exponering av lösliga aerosoler kan innebära störda lungfunktioner, irritation och förändringar i syreupptagningsförmågan, vilket kan resultera i obehagskänslor, medvetlöshet och även dödsfall [7]. Var någonstans som avlagringarna kommer att ske kontrolleras huvudsakligen av den hastighet med vilken luften rör sig i andningsvägarna (andningsfrekvensen), andningsvägarnas geometri och på partikelns aerodynamiska form [23].

### 4.3 Partiklarnas toxiska egenskaper

Ju längre tid en partikel blir kvar i lungorna desto större skada kan den orsaka. Blir partiklarna kvar länge kan de orsaka fibroser, emfysem och tumörer. Många fysiska egenskaper orsakar partiklars toxicitet, men några av de mer betydande är partiklarnas livslängd, löslighet och dess reaktionsbenägenhet [23].

Avsättningen (deposition) och kvarhållandet är faktorer som påverkas av hur lång tid lungvävnaderna är i kontakt med medlet. Betydelsefullt är även med vilken hastighet som materialet tas upp av lungvävnaderna. Avsättningen och kvarhållandet i lungorna beror på medlets fysiska och kemiska egenskaper. Egenskaper som löslighet, densitet och form kommer att påverka en partikels aerodynamiska egenskaper och kommer antingen att öka eller minska dess potentiella förmåga att tränga djupt ner i andningsvägarna [23].

Den faktor som är mest betydande när det gäller avsättning och kvarhållande i lungorna av gaser och ångor är den relativa vattenlösligheten [22]. Om en partikel är lättlöslig löses den upp och försvinner, men innehåller partikeln lättlösliga toxiska ämnen kan det på väldigt kort tid bli allvarliga konsekvenser. Partiklar med stor yta där ytan är skrovlig eller ojämn kommer att vara mer löslig och benägen att reagera än en partikel i samma storlek men med jämnare yta.

### 4.4 Partikelstorlekens betydelse för toxiciteten

För att kunna utvärdera aerosolers toxicitet måste det bestämmas om partiklarna kan inandas eller ej. Aerosolerna som produceras vid pyrolys av SFE har en diameter definierad som MMAD<sup>3</sup> på approximativt 3 mikrometer. Partiklar av den storleken kan tränga långt ner i andningsvägarna och nå lungblåsorna (alveolerna). Lungblåsorna är väldigt sårbara och är den delen av kroppen som skyddas minst av kroppens eget försvar. När det gäller pyrotekniskt genererade aerosoler måste hänsyn även tas till förbränningsprodukter som gaser. Det gäller kanske framförallt gaser som koldioxid och kolmonoxid som har förmågan att störa kroppens andningsfunktioner [7].

Större partiklar kommer huvudsakligen att ansamlas i de övre andningsvägarna på grund av de bromsas upp och stannar kvar när de träffar väggarna ('impaction'). Aerosolpartiklarnas storlek bestämmer till stor del var i andningsvägarna som de kommer att avlagras [22].

- 80 % av partiklarna >2,5 µm MMAD fastnar (avlagras) i näsan
- 10 % av partiklarna <2,5 µm MMAD lagras djupt nere i lungorna

### 4.5 Gasernas toxiska egenskaper

Vid pyroteknisk generering av aerosoler bildas till 60 % olika gaser som även de kan ha släckande egenskaper. Dessa gaser kan emellertid också ha toxiska egenskaper. Gasanalys vid en undersökning gjord av Smith et al [7] visar att det vid pyrolys av släckmedlet SFE bildas kolmonoxid. Kolmonoxid bildas i större utsträckning vid icke-stökiometrisk förbränning men mängden kolmonoxid som bildas beror även på sammansättningen av det aerosolbildande släckmedlet. Särskild betydelse har det om det finns något kolbaserat bindemedel i SFE.

Carboxyhemoglobin är ett ämne som bildas när kolmonoxid binds till hemoglobin. Hemoglobin transporterar syret i blodet till övriga delar av kroppen. När kolmonoxidmolekylen väl har bundit sig till hemoglobinet blockerar den på grund av dess höga bindningsaffinitet och hindrar syret från att binda sig till hemoglobinet. Denna nedsättning av syre i blodet upptäcks av kemiska receptorer som genom en negativ feedbackmekanism försöker korrigera syrets obalans genom att öka andningen. Denna ökning av andningen ger i sin tur ett ökat upptag av aerosoler genom andningen och ökar risken för skador på lungorna.

Under pyrolysering av det aerosolbildande släckmedlet producerades även koldioxid som påverkar andningsfrekvensen kraftigt och orsakar därmed en kraftig ökning av aerosolkoncentrationen. Koldioxidproduktion sker vid alla förbränningsprocesser och är ingenting unikt för förbränning av aerosolsläckmedel. Koncentrationen vid några försök visade på värden upp mot 10 %. Redan vid en koncentration på 2 % koldioxid i rummets atmosfär kommer andningen att påverkas [7].

## 4.6 Andningsvägarnas skyddsmekanismer

När partiklar väl har blivit avlagrade i vårt andningssystem finns det fem olika mekanismer för att kunna transportera bort dessa [23]:

- Upplösning.
- Fysiskt borttagande med hjälp av makrofager<sup>4</sup> i lungorna.
- Partiklar som fastnat på slemhinnan i andningsvägarna kan transporteras bort via matsmältningssystemet.
- Direkt transport till det lymfatiska systemet.
- Transport ut i blodet, oftast som upplöst material.

Stora partiklar är svårare att avlägsna från de djupare delarna av lungorna jämfört med små partiklar.

## 4.7 Aerosolsläckmedels godkännande i USA

US Environmental Protection Agency (EPA) bildades 1970 för att samla aktiviteter som syftar till att skydda miljön, såsom forskning, övervakande funktioner, utvecklingen av standarder och upprätthållande av lagar, inom ett departement. EPA's mål är att skydda människors hälsa och att säkerställa en naturlig miljö - luft, vatten och land.

EPA antog SNAP-programmet (Significant New Alternatives Policy) år 1990. Under detta program utreder EPA alternativa kemikalier och teknologier som företag vill använda istället för klass I- och klass II-ämnena. (Klass I innefattar CFC, Halon, koltetraklorid, metylkloroform, metylbromid och HBFC, och klass II innefattar ozonförstörande ämnen (HCFC).) Utredningen syftar till att säkerställa att de alternativa ämnena inte orsakar större skada på människors hälsa och på naturen än de ozonförstörande de skall ersätta. Ämnena måste provas och godkännas för varje specifikt användningsområde. EPA listar alla godkända ämnen [24]. I tabell 8 redovisas de aerosolprodukter som är listade och godkända under EPA's SNAP-program som ersättningsmedel för Halon.

<sup>4</sup> <http://www.od.mah.se/depts/oralpat/ordlista/framesplt/makfag.html>

Tabell 8 Utdrag ur listade och godkända produkter av EPA, källa: HARC<sup>5</sup> [25].

Agent	Comment	NFPA 2001
<b>4.7.1.1.1 Streaming agents</b>		
Gelled Halocarbon/Dry Chemical Suspension (PGA)	Allowable in residential applications	-
<b>4.7.1.1.2 Total flooding agents</b>		
Inert gas/Powdered aerosol Blend (FS 0140)	Unoccupied areas only. Per OSHA requirements, protective gear (SCBA) must be available in the event personnel must reenter the area.	Not applicable
Gelled Halocarbon/Dry chemical suspension (PGA)	Unoccupied areas only. Per OSHA requirements, protective gear (SCBA) must be available in the event personnel must re-enter the area.	Not applicable
Powdered Aerosol A (SFE)	Unoccupied areas only.	Not applicable
Powdered Aerosol C (PyroGen, Soyuz)	Unoccupied areas only.	Not applicable

'Total Flooding agents'; fullständig rumsfyllnad/rumsskydd, 'Streaming agents'; lokalt skydd. OSHA<sup>6</sup> = Occupational Safety & Health Administration, SCBA = Self-Contained Breathing Apparatus.

EPA accepterar inte användandet av NOAEL- (no observed adverse effect level) och LOAEL- (the lowest observed adverse effect level) värden, som normalt används för Halonersättningsgaser, när det gäller bestämning av aerosolers toxicitet. Experter på toxikologi vid EPA rekommenderar en flerstegs sorteringsprocess för att godkänna släckmedel som innehåller små partiklar (aerosoler). Sorteringsprocessen används för att bestämma vilka delar av kroppen som påverkas av partiklarna.

För att kunna fastställa riskerna behöver man veta partiklarnas medelstorlek efter förbränning av släckmedlet. Den utredningsprocess som EPA genomför för att utreda ett släckmedel går till på följande sätt [19]:

1. Utvärdering av irritation på hud och ögon via laboratorietester. Laboratorietester sker oftast med försöksdjur som exponeras i 14 till 21 dagar.
2. Utvärdering av den akuta toxiciteten vid inandning genom exponering av försöksdjur för olika koncentrationer av släckmedlet upp till det maximalt lämpliga över en 14-dagarsperiod. Partikelstorleken bör vara den minsta som bildas vid pyroteknisk generering.
3. Utvärdering av den specifika toxiciteten för organ och olika system baserat på resultaten från punkt 2.
4. Utvärdering av ämnets långvariga toxicitet genom att utsätta de organ och system bestämda i punkt 3 hos försöksdjur för exponering under en 90-dagarsperiod.

<sup>5</sup> Halon Alternatives Research Corporation (HARC) [25] är en icke vinstdrivande organisation som bildades 1989 för att stödja och verka för utveckling och godkännandet av miljövänliga alternativ till Halon när det gäller brandbekämpning. HARC fungerar som hjälpande organisation och informationskälla för frågor rörande Halonersättningsmedel, återvinning av Halon och regler av Halonanvändning. HARC har utvecklat ett samarbetsförhållande till statliga myndigheter när det gäller frågor rörande Halon/CFC.

<sup>6</sup> <http://www.osha.gov/>

5. Bestämning av den typiska distributionen av partikelstorlekar genom ett fullskaletest.
6. Bestämning av det acceptabla värdet vid exponering.

Från de begränsade data som finns tillgängligt idag har EPA rekommenderat att pyrotekniskt genererade aerosoler endast skall tillåtas i obemannade utrymmen.

När det gäller dispersionsaerosoler som är en blandning av pulver och en gas, är det nödvändigt att inte bara utvärdera toxiciteten med ett toxicitetsprotokoll för partiklar utan även ett för gaser. För dessa föreningar föreslår US Coast Guard att den förbättrade PBPK-modellen, som beskrivs i FP 44/Inf 2, används [19].

## 4.8 Toxikologiska studier

De fysiska och kemiska egenskaperna av en gasvolym efter aktivering av pyrotekniskt genererade aerosoler, jämfördes för två olika system i en undersökning av Kimmel et al [8]. De olika systemen var en mindre inhalationskammare och ett storskaligt system avsett för att utreda aerosolens släckeffektivitet. Syftet med testet var att få fram en bas för att kunna extrapolera labresultat till fältförutsättningar. De koncentrationerna som testades var 50 och 80 g/m<sup>3</sup>. Inhalationssystemet hade en volym på 0,7 m<sup>3</sup> och det storskaliga systemet för brandsläckning var 56 m<sup>3</sup>. De faktorer som mättes var masskoncentrationen av partiklar, hur fort koncentrationen av aerosolen avtar, aerosolpartikelns storleksfördelning, partiklarnas tillväxthastighet samt de dominerande gaskomponenternas (kolmonoxid och koldioxid) koncentrationsprofiler i SFE-atmosfären. Exponeringarna i laborationerna med den högre koncentrationen av släckmedel orsakade lungödem och förhöjda COHb-värden hos råttor [8].

Tabell 4 redovisar uppmätta koncentrationer av olika ämnen efter släckning av en heptanbrand. I en studie av exponering för biprodukter av pyrolyserat SFE, som genomfördes av den amerikanska marinen, drogs slutsatsen att dessa biprodukter inte orsakade någon akut förgiftning, okulära eller hudirritationer eller histopatologiska<sup>7</sup> skador hos råttor [1]. Djuren utsattes för försök med koncentrationer av 50 och 80 g/m<sup>3</sup> under perioder på 15 eller 60 minuter. Man observerade bland annat en minskad syretransport i blodet.

Tabell 4 Uppmätta koncentrationer av olika ämnen efter släckning av en heptanbrand [1].

N <sub>2</sub>	78 – 79 %
O <sub>2</sub>	18 – 20 %
CO <sub>2</sub>	0,4 – 2,3 %
CO	0,19 – 0,56 %
C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	1-300 ppm
HCL	0,001 %
KCL	0,082 %
MgCL <sub>2</sub>	0,01 %
H <sub>2</sub> O	0,1 %

I en annan undersökning av Smith et al [7] blev råttor utsatta för produkterna från två varianter av aerosolsläckmedlet SFE, Formel A. Syftet med studien var att undersöka

<sup>7</sup> Sjukliga förändringar i vävnader

blodgaser, hemoglobin och blodets pH-värde hos djur som har utsatts för aerosolerna. De två varianterna var:

Tabell 5 Två varianter av aerosolsläckmedlet SFE och deras sammansättning [7].

Komponenter	SFE Formel A1	SFE Formel A2
Oxiderande ämne	68 %	72 %
Bindemedel och annat	32 %	28 %

Exponeringsnivåerna varierade från 50 till 240 g/m<sup>3</sup>. Exponeringen varade antingen 15 eller 60 minuter under statiska förhållanden. Försöken utfördes i en 700 liters inhalationskammare där hela kroppen utsattes för exponering. Atmosfären i kammaren analyserades med avseende på partiklarna (MMAD, storleksfördelning och koncentration) och det dominerande gasinnehållet (CO, CO<sub>2</sub> och O<sub>2</sub>).

Skillnaden i sammansättning gav stora skillnader för överlevnadsförmågan hos djuren. Den första aerosolblandningen producerade nivåer av kolmonoxid som i det närmaste var dödliga koncentrationer medan den andra blandningen knappt gav någon produktion av kolmonoxid överhuvudtaget. Frånvaron av kolmonoxidproduktion under pyrolysationen var den huvudsakliga orsaken till skillnad i toxicitet för de två olika blandningarna.

För blandningen A1 var dödligheten 100 % efter exponering av aerosolen under 60 minuter vid en koncentration på 140 g/m<sup>3</sup> [7]. Djur som utsattes för blandningen A2 överlevde koncentrationer som var 3 gånger högre än blandningen A1. Vid exponering av A1 erhöles förändrat hemoglobinvärde, gaskoncentrationer och pH-värde i blodet hos försöksdjuren. Detta skedde dock inte för djur som exponerats för SFE A2.

De förändrade hemoglobinvärdena bestod av höjda carboxy- och methemoglobinvärden, och sänkta oxy- och deoxyhemoglobinvärden. Dessutom ökade pCO<sub>2</sub> (partialtryck CO<sub>2</sub>) och pO<sub>2</sub> minskade när laddningen (startkoncentrationen) och exponeringslängden ökade. Ökningen av pCO<sub>2</sub> kan förklara den observerade sänkningen av blodets pH-värde. Att carboxyhemoglobin bildas tyder på närvaro av kolmonoxid och de kliniska tecknen på andnöd, brist på koordination och dåsighet visar på trolig kolmonoxidförgiftning [7].

I en toxikologisk studie av Smith et al [26] användes en koncentration på 80 g/m<sup>3</sup> och försöksdjuren utsattes för släckmedlet under 60 minuter. Man fann trots att partiklarna agglomererade, att de var så små att de kunde inandas och att exponeringen ledde till lungödem.

## 4.9 Miljöaspekter

Tillverkning och handeln med Halon som släckmedel reglerades i och med Montreal-protokollet. Halon innehåller atomer som har mycket lång livslängd och bidrar till att bryta ned ozonlagret i atmosfären. Den ozonnedbrytande potentialen hos ett ämne mäts i ODP (Ozone Depletion Potential) och beror bland annat på dess atmosfäriska livstid.

GWP (Global Warming Potential) är ett mått på olika gasers potential att delta i växthus-effekten som också den beror på bland annat ett ämnes atmosfäriska livstid. Ett av problemen med de halogenerade gaserna är just deras långa atmosfäriska livstid, Halon 1301 har en atmosfärisk livstid på 77 - 101 år [27].



De släcksystem med pyrotekniskt genererade aerosoler som finns på marknaden idag har ODP- och GWP-värdet noll enligt tillverkarnas uppgift. Aerosolen som genereras antas då ha försumbar atmosfärisk livstid<sup>8</sup>, vilken är en av faktorerna som ingår i ODP och GWP. Aerosolsystemen producerar dock koldioxid vid förbränning, och koldioxid är en växthusgas.

---

<sup>8</sup> Detta är ett antagande som kan ifrågasättas. Partiklar som är mikrometerstora kan transporteras långa sträckor och tillbringa dagar i atmosfären. Större partiklar sedimenterar dock relativt fort [21].

## 5 Standardisering

Ett flertal standarder för pyrotekniskt genererade aerosoler finns, bland annat från en gemensam standard från Australien/Nya Zeeland [18], från International Maritime Organisation (IMO) [28] och från Ryssland [29]. Här redovisas enbart de två förstnämnda mera i detalj.

I Europa pågår standardisering inom området under CEN/TC 191/WG 6/TG 2, men några dokument finns ännu så länge inte officiellt publicerade. Den kommande standarden består av två delar, del 1 som innefattar komponentkrav och del 2 som innehåller krav på installation, dimensionering och underhåll. Den sistnämnda delen innehåller även en provningsmetod för att bestämma släckkoncentration och generatorernas täckningsyta. Standarden är begränsad till pyrotekniskt genererade aerosoler [30, 31].

### 5.1 Standard; Australien/Nya Zeeland

#### 5.1.1 Organisationerna

1931 jämnades staden Napier med marken av en jordbävning. En kommitté för byggregler tillsattes som senare föreslog att nationella regler skulle tas fram. Detta ledde år 1932 till att New Zealand Standards Institution bildades, vilken senare döptes om till Standards New Zealand. Standards New Zealand är en oberoende organisation och dess arbete består i att utveckla och applicera nationella, regionala och internationella standarder. Många utvecklas i nära samarbete med grannlandet Australien.

Standards Australia bildades 1922 och kallades från början Australian Commonwealth Engineering Standards Association. Standards Australia är ett fristående företag men vid utvecklande av standarder så krävs det ett nära samarbete med regeringen. Sedan 1988 har det funnits en informell överenskommelse mellan Standards Australia och Commonwealth Government som erkänner Standards Australia som den huvudsakliga icke-statliga standardiseringsinstansen.

#### 5.1.2 Släckmedlet

Den Australiensiska - Nya Zeeländska standarden för aerosolsläckmedel baseras på en kommersiell produkt kallad Pyrogen [18]. Pyrogen utgör ett släcksystem med en pyrotekniskt genererad aerosol.

Pyrogen består av fyra huvudbeståndsdelar; en fast aerosolbildande blandning, en kemisk kylare, en elektrisk tändare samt ett ändmunstycke. Pyrogen är godkänt för rumsskydd i obemannade utrymmen och för brandtyper av klass A, B, C, E och F, definierat i AS/NZS 1850. Hänsyn bör tas till explosionsrisk före och efter aktivering av systemet vid brännbara miljöer (atmosfärer). Systemet kan användas som rumsfyllnadsskydd där det finns möjlighet att uppnå den nödvändiga släckkoncentrationen och hålltiden, för att på så sätt säkerställa en effektiv släckning av branden.

#### 5.1.3 Begränsningar

Det finns vissa begränsningar för ett Pyrogensystem, det är inte lämpligt att använda Pyrogen vid bränder som innefattar:

- Vissa kemiska ämnen eller blandningar av kemiska ämnen, så som cellulosanitrater och krut, vilka snabbt kan oxidera vid kontakt med luft.
- Reaktiva metaller, som Natrium, Kalium, Magnesium, Titan, Zirkonium, Uran eller Plutonium.
- Metallhybrider eller metallamider
- Kemiska ämnen som är kapabla att automatiskt genomgå en termisk nedbrytning, såsom vissa organisk peroxider och hydraziner.
- Material som är antändligt i luft, t ex fosfor- eller metallorganiska föreningar.
- Oxiderande medier, salpetersyra och fluor.

#### 5.1.4 Säkerhetsaspekter

Aktivering av Pyrogensystem i de koncentrationer som krävs för att släcka en brand kan skapa allvarliga faror för personal både i det skyddade utrymmet och i utrymmen dit aerosolen kan tänkas sprida sig. Dessa faror kan handla om nedsatt sikt både före och efter aktiveringen, risk att utsättas för toxiska gaser (onödig exponering skall undvikas), brännskador på grund av aerosolflödet, generatorns höga temperaturer samt turbulens, vilket kan få lätta saker att lossna och flyga omkring.

Nedsatt sikt under och efter systemets aktivering tillsammans med potentiella risker för de toxiska egenskaperna, begränsar Pyrogens användning till rumsskydd av obemannade utrymmen. Om det finns en risk för att människor kan befinna sig i det skyddade området eller bli utsatta för släckmedlet gäller särskilda regler. I sådana utrymmen skall enligt standarden [18] följande åtgärder vidtas:

- En avstängningsbrytare för systemet skall finnas vid ingången till det skyddade utrymmet
- En planritning skall finnas vid knappen för manuell aktivering.
- Det skall finnas tillgängliga utrymningsvägar, vilka skall hållas fria vid alla tillfällen, nödbelysning och tillräcklig skyltning för att minimera gångavstånden till närmaste utgång.
- Utåtgående självstängande dörrar som kan öppnas inifrån även då de är låsta utifrån.
- Syn- och hörbara varningssignaler som kontinuerligt varnar vid ingångar och utgångar till dess att utrymmet är säkert att återigen vistas i.
- Varnings- och instruktionsskyltar skall finnas.
- Förvarningslarm för aktivering av systemet i de skyddade utrymmena, direkt vid detektion av brand.
- Möjligheter att ventileras efter aktivering av släckmedelsystemet (forcerad ventilation krävs oftast). Åtgärder bör vidtas för att oskadliggöra farlig luft och inte endast ventileras det till ett annat utrymme.
- Skriftliga instruktioner anpassade till risknivån. Instruktioner skall finnas och övningar av all berörd personal skall genomföras regelbundet.

Alla komponenter i ett system skall uppfylla kraven i standarden. Varje förändring av en komponent eller material kräver ett godkännande från godkännandemyndigheten. Pyrogen skall levereras komplett med generator.

#### 5.1.5 Den kemiska sammansättningen

Enligt standarden [18] skall Pyrogens kemiska sammansättning vara:

- Plasticerad nitrocellulosa (brännbart bindemedel) -  $22 \pm 1$  %.
- Kaliumnitrat (oxidationsmedel) -  $63 \pm 1$  %.

- Kol (aktiveringsmedel för oxidationsmedlet) -  $9 \pm 1$  %.
- Additiver (för viskositet, kemisk stabilitet, mekanisk styrka och minskad extern friktion) -  $6 \pm 1$  %.

Vid antändning skall aerosolblandningen genomgå en förbränningsreaktion som producerar brandsläckande aerosoler. Under förhållanden med normal rumstemperatur och tryck i ett förslutet rum skall sammansättningen av aerosolerna vid dimensionerande koncentration vara följande:

Fast fas (största delen kaliumkarbonat): inte mindre än  $7 \text{ g/m}^3$ .

Kvävgas: får inte överstiga 70 vol-%.

Koldioxid: får inte överstiga 2 vol-%.

Kolmonoxid: får inte överstiga 0,5 vol-%.

Kväveoxider: får inte överstiga 100 ppm.

### 5.1.6 Krav på generatorns olika delar

Den aerosolbildande blandningen skall inte utgöra någon toxisk fara och antändningstemperaturen får inte vara lägre än  $75^\circ\text{C}$  för att undvika oavsiktlig antändning. Hållbarheten bör inte vara kortare än 10 år från tillverkningsdatum. Den fasta aerosolbildande blandningen vid farligt gods klassas som klass 4.1-ämne enligt United Nation's *Dangerous Goods Classification Code*.

Kylmedlet är en termoplastisk blandning med följande huvudbeståndsdelar; plasticerad nitrocellulosa, magnesiumsalter och kol. Nerkyllningen av aerosolflödet bör ske med en hastighet av  $400^\circ\text{C}$  per sekund. Kylmedlet skall inte utgöra någon toxisk fara.

Antändningsanordningen skall vara godkänd och kan vara antingen elektrisk eller termisk. Den skall kunna aktivera omedelbart och den termiska antändningen skall inte kunna aktiveras vid temperaturer lägre än  $75^\circ\text{C}$ .

Generatorerna skall vara tillverkade i ett korrosionsresistent material eller ett material som är lämpligt behandlat för att motstå korrosion. Materialet skall även vara kompatibelt med aerosolblandningen och kylmedlet. Pyrogengeneratoren har även en del funktionskrav som den skall klara av att uppfylla:

- Skall klara ett temperaturintervall från  $-50^\circ\text{C}$  till  $+50^\circ\text{C}$ .
- Skall fungera i luftfuktighet upp till 96 %.
- Livslängden skall inte vara kortare än 5 år.

### 5.1.7 Krav på släckkoncentration

Pyrogensystemet skall klara av att säkerställa en jämn dimensionerande koncentration i hela utrymmet. Testad enligt Appendix B i standarden skall fördelningen och upprätthållandet av koncentrationen uppfylla följande krav:

- Inom 60 sekunder från det att utströmningen har påbörjats skall den aktuella koncentrationen av aerosoler i delar av rummet inte skilja sig från den dimensionerande med mer än 5 %.
- Efter 10 minuter från den tidpunkt då utströmningen påbörjades skall koncentrationen vid golvnivå vara 50 % och i takhöjd inte vara lägre än 90 % av den dimensionerade koncentrationen.

Den minsta dimensionerande koncentrationen för bränder i material ur de olika klasserna (klass A – fibrösa material, klass B – brännbara vätskor, klass C – brännbara gaser, klass E – elektriska bränder och klass F – bränder i fett och matlagningsolja) bestäms genom brandförsök. Brandförsöken skall baseras på kraven i Underwriters Laboratories<sup>9</sup> UL1058 ('Standard for Safety for Halogenated Agent Extinguishing System Units') och enligt passande UL-procedur under klausul 'Fire extinguishment/area coverage fire test procedure for engineered and pre-engineered clean agent extinguishing system units' eller liknande.

### 5.1.8 Dimensioneringskrav för rumsfyllnad

Ekvationen som anges i standarden för beräkning av mängden släckmedel förutsätter en statisk volym i ett rum med alla öppningar stängda och all ventilation avstängd, innan aktivering av aerosolsystemet.

$$M = C \times V \text{ (se avsnitt 3.2.2)}$$

Den dimensionerande mängden Pyrogen kan behöva justeras och kompenseras för särskilda förhållanden, såsom icke stängbara öppningar, ventilation, höjd över eller under havsnivå, eller andra orsaker till förlust av släckverkan.

Icke stängbara öppningar skall hållas på ett minimum och öppningar i taket skall undvikas helt. Förluster av släckmedel genom öppningarna skall kompenseras med tillräckligt mängd släckmedel för att bibehålla den minsta släckkoncentrationen. Ventilationsanläggningar skall normalt stängas av eller isoleras med filter. Då det är nödvändigt att ventilationsanläggningen hålls igång, behövs det läggas särskild vikt vid dimensioneringen av mängden släckmedel och utströmningstiden.

### 5.1.9 Tryckavlastningar

För små rum kan det bli nödvändigt med tryckavlastningar för att avlasta det övertryck som bildas när släckmedlet strömmar in i ett rum. Öppningarna bör placeras så låg som möjligt i rummet. Normalt är läckage runt dörrar och andra otätheter fullt tillräckligt.

Den nödvändiga tryckavlastande arean bör enligt standarden [18] inte vara mindre än det värde  $X$  som ges av uttrycket

$$X = \frac{2.236 \cdot 10^{-2} \cdot Q \cdot S}{K \cdot (P \cdot S_1)^{0.5}}$$

där

$X$  = den fria ventilationsytan ('tryckavlastande area').

$Q$  = Utströmningshastighet av släckmedlet (Pyrogen) i kilogram per sekund.

---

<sup>9</sup> UL är en oberoende, ideell amerikansk organisation som provar och certifierar produkter. Organisationen bildades 1894 och har provat produkter för offentlig säkerhet i över ett århundrade. Varje år förses mer än 16 miljarder produkter över hela världen med UL-märken. UL har blivit ett av de mest erkända certifieringsorganen i världen. Deras service sträcker sig till att hjälpa företag att bli globalt accepterade oavsett om det gäller en elektrisk apparatur eller ett företags kvalitetssystem [9]. År 2000 fanns det 776 stycken UL standards och antalet tillverkare som producerade UL certifierade produkter var drygt 61 000 stycken. UL har 190 kontor i 72 länder. Man har inte någon provningsmetod för pyrotekniskt genererade aerosoler och har i dagsläget inte heller certifierat någon sådan produkt.

$S$  = den specifika gasvolymen för Pyrogen, kubikmeter per kilogram. ( $S=1/\rho$ , där  $\rho$  erhålls ur allmänna gaslagen som  $\rho=P/R_0T$ .  $R_0$  för Pyrogen är 220 J/kgK).

$K$  = flödeskoefficienten för ventilationsöppningarna (oftast lägre än 0,6 för otätheter mellan väggar och tak, dörrspringor, etc).

$P$  = maximalt tillåtet tryck för rummet, i kilopascal.

$S_1$  = specifika gasvolymen för Pyrogen/luftblandningen som ventileras ut, kubikmeter per kilogram (kan approximeras som motsvarande luftvolym).

### 5.1.10 Installationsrekommendationer

Enligt standarden [18] får generatorerna under normala förhållanden inte utsättas för temperaturer som överstiger 75°C. De skall placeras så att riskerna för värmeskador orsakade av generatorernas heta ytor eller från utströmningen av släckmedlet minimeras. Det skall inte finnas något brännbart material eller utrustning inom det avstånd som specificerats baserat på brandförsök. Generatorerna skall placeras så att de inte utsätts för skadliga väderförhållanden, mekaniska, kemiska eller andra yttre påfrestningar.

Generatorer skall placeras på sådant sätt att utströmningen inte blockeras av några hinder och att den inte påverkar någon utgång. Om det finns några icke stängbara öppningar, dörrar utgångar eller dyligt, bör aerosolstrålen riktas mot den troliga brandzonen och i riktning mot öppningarna. Om det finns några föremål eller hinder som kan påverka utströmningen, är det att föredra att installera flera mindre generatorer istället för en stor. Om detta inte är möjligt bör inte avståndet mellan munstycket och föremålet vara mindre än det som anges i listningen. I det fallet med flera hindrande föremål bör den dimensionerande koncentrationen ökas. En sådan ökning bestäms genom förberedande tester i det aktuella utrymmet.

### 5.1.11 Hälsospekter

Pyrogen är avsett att användas i normalt obemannade utrymmen. Det bildas en del biprodukter vid förbränning som är toxiska, t ex kolmonoxid och kväveoxider. Aktuell koncentration av dessa specifika toxiska biprodukter beror på den fasta materialets sammansättning och på kylmedlet, på koncentrationen av släckande mängd aerosoler och på rummets utformning.

Personsäkerhetsaspekterna beror till stor del på de biprodukter som genereras men även på exponeringstid och aktivitetsnivå. Exponering under 5 minuter för maximal släckkoncentration och i ett hermetiskt tillslutet rum anses endast utgöra en mindre risk för människor och orsakar endast lokal irritation i de övre andningsvägarna och ögonen. Exponering upp till 15 minuter kan orsaka huvudvärk, yrsel, koncentrationssvårigheter, torr hosta, andnöd och försämrade reaktioner. Den fysiologiska effekten från penetration djupt ner i lungorna av olösliga mikroskopiska partiklar är ett allvarligt problem, bland annat kan det påverka syreupptagningsförmågan.

Efter att Pyrogen har använts bör inte personal gå in i rummet förrän det har blivit ordentligt ventilerat. Om det har förekommit okända produkter i branden är det viktigt att kontrollera koncentrationen av kolmonoxid innan återinträde i rummet.

Efter en aktivering av släcksystemet bör aerosolpartiklar som har sedimenterat, städas bort enligt anvisningar från tillverkaren. Skyddskläder som inkluderar handskar och skyddsglasögon bör användas. Även andningsapparat eller mask kan behövas användas.

## 5.2 Standard; International Maritime Organisation (IMO)

### 5.2.1 Organisationen

IMO är det internationella organ under FN som ansvarar för sjöfart. IMO bildades 1948 och har idag 158 medlemsstater [32]. Under årens lopp har de utvecklat och instiftat mer än 30 konventioner och mer än 700 regelverk och rekommendationer. En av dessa är SOLAS-konventionen (International Convention for the Safety of Life at Sea) vilket är den viktigaste överenskommelsen som behandlar säkerheten inom sjöfarten. Den tillkom 1960 och är IMOs regelverk med krav på fartygskonstruktion och utrustning. I SOLAS kapitel II-2 återfinns krav och installationsregler för byggnadstekniskt brandskydd, detektion av brand och släcksystem.

Maritime Safety Committee antog i juni 2001 dokumentet IMO MSC/Circ. 1007 [28] med riktlinjer för godkännande av fasta aerosolsläcksystem. Dessa riktlinjer anses vara ekvivalenta med de riktlinjer som givits i SOLAS 74 för fasta gassläcksystem i maskinutrymmen i dokumentet IMO MSC/Circ. 848 [4].

### 5.2.2 Allmänna krav

Generellt gäller att man skall visa att ett fast aerosolsläcksystem avsett för maskinrum av kategori A, har samma tillförlitlighet som ett fast gassläcksystems godkänt under kraven i SOLAS II-2/5. Vidare skall man uppfylla kraven i en brandprovningssmetod, där systemet skall klara att släcka en rad olika typer av bränder i ett maskinrum. Riktlinjerna omfattar två skilda typer av aerosolsystem, dels aerosoler som produceras pyrotekniskt (kondensationsmetoden) dels aerosoler som bildas genom att finfördelat pulver distribueras med hjälp av en gas (dispersionsmetoden).

### 5.2.3 Dimensionering och design av system

I IMO's standard anges att minsta koncentration av släckmedel bör bestämmas och verifieras av fullskaletest enligt brandprovningssmetoden (se nedan). Utströmningstiden bör inte överstiga 120 sekunder för 85 % av den dimensionerande släckkoncentrationen. MSC/Circ. 1007 förordar en säkerhetsfaktor på 30 % för aerosolsystem installerat i utrymmen med låg grad av föremål och hinder i vägen för utströmningen. Som jämförelse kan nämnas att dimensionerande koncentrationen skall vara 20 % över släckkoncentrationen för halonersättningsgaser, enligt installationsreglerna i MSC/Circ. 848. ISO (International Standardisation Organisation) och NFPA<sup>10</sup> (National Fire Protection Association, USA) som hanterar kraven för halonersättningsgaser för landbaserade applikationer har ökat denna säkerhetsfaktor till 30 %, alltså i paritet med kraven i MSC/Circ. 1007.

För alla system bör det finnas två olika sätt att aktivera detta. I utrymmen där det normalt vistas personal eller där personal har tillträde, skall det finnas ett automatiskt system som ger en audiell varning före aktiveringen. System kan tillåtas för utrymmen där personal normalt vistas, om varken koncentrationen av partiklar eller av gas ej överstiger en 'skadlig' nivå. Vad som räknas som en 'skadlig' nivå skall bestäms genom vad man kallar 'vetenskapligt accepterad metod'.

---

<sup>10</sup> <http://www.nfpa.org/>

Släcksystemet och dess delar skall vara utformade så att det kan motstå yttre påverkan och förändringar som normalt förekommer i ett maskinrum. Generatorerna i ett pyrotekniskt system skall klara temperaturer på upp till 250°C utan att självantända. Systemet och dess delar skall vara designade, tillverkade och installerade enligt de standarder som accepteras av IMO.

#### **5.2.4 Brandprovningmetoden enligt IMO MSC/Circ. 1007**

Brandprovningmetoden har två mål:

1. Fastställa den effektiva släckningsförmågan för ett givet släckmedel och dess koncentration.
2. Fastställa huruvida systemet klarar av att distribuera släckmedelsaerosolerna i rummet på ett sådant sätt att den erforderliga släckkoncentrationen uppnås i alla delar av rummets volym.

Brandprovningmetoden är avsedd för att bestämma släckeffektiviteten hos olika aerosolbaserade släcksystem mot spraybränder, poolbränder och klass A-bränder.

##### **5.2.4.1 Försöksrum**

Försöken skall genomföras i ett rektangulärt rum med en golvarea på 100 m<sup>2</sup> och en takhöjd om 5 m. Försöksrummet bör utrustas med en stängbar dörr på ca 4 m<sup>2</sup> och stängbara ventilationsluckor i taket med en minsta total area på ca 6 m<sup>2</sup>. Rummet skall vara helt tätt mot läckage till omgivningen när dörrar och luckor är stängda. En modell av en motor skall konstrueras av stålplåt. Dimensionerna skall vara 1 m x 3 m x 3 m (bredd x längd x höjd) och till den skall två stålrör med diametern 0,3 m och längden 3 m arrangeras för att simulera utsugningsrör. Systemets generatorer/munstycken bör placeras inom 1 m från taket. Om mer än en generator/munstycke används bör de placeras symmetriskt. Släcksystemet skall installeras enligt tillverkarens installationsanvisningar. Försökprogrammet som beskrivs i tabell 6 skall innefatta de testbränder som beskrivs i tabell 7.



Tabell 6 Försöksprogrammet enligt brandprovningmetoden i IMO MSC/Circ. 1007.

Fire	Type	Fuel	Fire size (MW)	Remarks
A	76-100 mm ID can	Heptane	0,0012-0,002	Tell tale
B	0,25 m <sup>2</sup> tray	Heptane	0,35	
C	2 m <sup>2</sup> tray	Diesel/Fuel oil	3	
D	4 m <sup>2</sup> tray	Diesel/Fuel oil	6	
E	Low pressure, low flow spray	Heptane 0,03±0,005 kg/s	1,1	
F	Wood crib	Spruce or fir	0,3	The wood crib should be substantially the same as described in ISO Standard 14520
G	0,10 m <sup>2</sup> tray	Heptane	0,14	

Med 'Tell tale' avses en mindre brand i en cylindrisk behållare med en diameter om 76 - 100 mm. Dessa mindre brandkällor används för att prova att släckmedlet distribueras i hela försöksrummet.

Försöksprogrammet omfattar enskilda testbränder eller i olika kombinationer enligt tabell 7.

Tabell 7 Brandscenarier enligt brandprovningmetoden i IMO MSC/Circ. 1007.

Test nr	Fire scenario
1	A: Tell tales, 8 corners. In upper corners of enclosure 150 mm below ceiling and 50 mm from each wall or in corners on floors 50 mm from walls
2	B: 0,25 m <sup>2</sup> heptane tray under mock-up G: 0,10 m <sup>2</sup> heptane tray on deck plate located below solid steel obstruction plate. Total fire load: 0,49 MW
3	C: 2 m <sup>2</sup> diesel/fuel oil tray on deck plate located below solid steel obstruction plate. F: Wood crib positioned as in figure 1 E: Low pressure, low flow horizontal spray – concealed – with impingement on inside of engine mock-up wall. Total fire load: 4,4 MW
4	D: 4 m <sup>2</sup> diesel tray under engine mock-up Total fire load: 6 MW

Den släckmedelskoncentration som skall användas vid de olika brandförsöken är den dimensionerande koncentrationen som tillverkaren rekommenderar, den så kallade 'design koncentrationen'. Undantaget är test 1 där endast 77 % av design koncentrationen skall användas. Mängden släckmedel som skall användas bestäms med formeln:

$$W = V \times q \text{ (g)}$$

W = släckmedlets massa (g)

V = testrummets volym (m<sup>3</sup>)

q = aerosolets brandsläckningskoncentration (g/m<sup>3</sup>)

De olika bränderna skall brinna en stund innan släcksystemet aktiveras. Den rekommenderade förbrinntiden innan aktivering är 5 till 15 sekunder för spraybranden, 2 minuter för poolbränderna och 6 minuter för träribbstapeln. Under denna tid skall försöksrummet vara välventilerat. Syrekoncentrationen får inte vara lägre än 20 volymprocent vid aktiveringen. Innan släcksystemet aktiveras skall dörrar, takluckor och andra ventilationsluckor stängas.

Utströmningstiden skall vara anpassad så att 85 % av dimensionerande koncentrationen uppnås efter 120 sekunder eller kortare. Hålltiden efter att allt släckmedel har frigjorts bör vara 15 minuter, testrummet skall hållas stängt under denna period.

#### **5.2.4.2 Acceptanskriterier**

Olika acceptanskriterier ges i IMO MSC/Circ. 1007 beroende på typ av brand och brandscenario.

Exempelvis gäller att klass B bränder skall släckas inom 30 sekunder från det att systemet har aktiverats. Efter 15 minuters hålltid får ingen återantändning ske när öppningarna till försöksrummet öppnas.

För en spraybrand (brand 'E' i tabell 6 ovan) gäller att sprayen skall stängas av 15 sekunder efter släckning. Vid hålltidens slut sätts sprayen igång igen, samtidigt som öppningarna till testrummet öppnas. Återantändning får då inte ske.

För träribbstaplarna (brand 'F' i tabell 6 ovan) får viktförlusten som följd av branden inte överstiga 60 %.

## 6 Marknadsöversikt

I detta kapitel beskrivs några tillverkare och deras produkter, för att ge en marknadsöversikt. Det är svårt att hitta information om alla tillverkare av släckmedel och utrustning för tekniken med pyrotekniskt genererade aerosoler varför informationen är relativt kortfattad. Några tillverkare och deras produkter som inte beskrivs, därför att det varit svårt att finna information är:

- Kaskad (Ryssland) med produkten SOT.
- Spectronix (Spectrex) (USA, Israel) med produkten SFE.
- Federal Centre (Ryssland) med produkterna Soyuz och MAG.
- Fireban (Ryssland) med produkten Purga.
- Granit-Salamandra (Ryssland).
- LPG Fire Fighting Technology & Engineering med produkten EcoFoc.

### 6.1 Pyrogen Ltd (Pyrogen)

Pyrogen är utformat för att användas i obemannade utrymmen som datarum, maskinrum och lagringsutrymmen. Vid en koncentration på  $100 \text{ g/m}^3$  är Pyrogen viktmässigt ungefär 3 gånger effektivare än Halon 1301. Pyrogensystemet kan användas i temperaturintervallet  $-50^\circ\text{C}$  till  $+60^\circ\text{C}$  och i en luftfuktighet upp till 96 %. Släckmedlet kan användas vid bränder av klass A, B, C, E och F [33].

Pyrogen är godkänd av Maritime and Coastguard Agency (MCA) i Storbritannien efter att ha uppfyllt och klarat kraven enligt deras *Small Boat Machinery Testing Protocol*. Pyrogen har även provats och erhållit certifikat från European Certification Bureau i Nederländerna för användning som fast släcksystem ombord på fritidsbåtar. Pyrogen uppfyller även kraven i European *Recreational Craft Directive 94/25/EC* från 16/6 1994 [34] (fritidsbåt direktivet). Scientific Services Laboratory (SSL) har testat Pyrogen enligt den Australiska/Nya Zeeländska standarderna AZ/NZS 4478 och AZ/NZS 1851.16 och godkänt systemet. Pyrogen är listat av Environmental Protection Agency (EPA) i USA under deras *Significant New Alternatives Programme* (SNAP) [35].

### 6.2 Dynamit-Nobel (Dynameco)

Produkten Dynameco tillverkas av företaget Dynamit Nobel. Dynamit Nobel radar upp en del förutsättningar för att deras aerosolsystem effektivt skall släcka en brand. Bland annat bör jetstrålen av aerosoler riktas in mot flammen. Branden bör bekämpas under dess inledningsskede då aerosolerna ej har någon kylande effekt och därmed ingen inerterande effekt på upphettat material eller föremål som har utsatts för flammen. För att fullständigt släcka branden måste koncentrationen av kaliumkarbonat vara mer än  $20 \text{ g/m}^3$ . Dynameco har en servicelivstid på 5 år räknat från produktionsdatum. Själva generatorhöljet har en livstid på upp till 10 år beroende på dess placering.

Tester utförda av European Standard Safety Authorities (TÜV) har visat att aerosolen även stoppar explosioner i gasblandningar. I en studie utförd av Hygiene Institut des Ruhrgebietes i Gelsenkirchen konstaterades att det inte föreligger några toxiska eller medicinska anmärkningar under de testade förhållandena vilket var en effektiv laddning på 40 g i generatorm, vilket i sin tur medförde en koncentration av aerosoler i luften på

13,7 g/m<sup>3</sup>. Dock fastslås att den kraftigt försämrade sikten tillsammans med halten kolmonoxid utgör en fara.

Rumsfyllnads-applicering av systemet är endast tillåtet då alla människor har kommit i säkerhet. Dynameco kan användas under operativa förhållanden (vibrationer under lång tid, temperaturväxlingar mellan -40°C och +85°C, fuktigt) i 5 år. Initieringsanordningen för Dynameco har blivit godkänd för EMC (electromagnetic compatibility) av TÜV. [36].

### 6.3 Ansul (Micro-K)

Micro-K saluförs av Ansul Incorporated och är tidigare känt under namnet SFE, "Powdered Aerosol A" och är godkänt av EPA under SNAP-programmet för att användas för obemannade utrymmen. SFE producerar finfördelade aerosolpartiklar via en förbränningsreaktion av ett oxiderande ämne och ett fast bränsle. Micro-K (SFE) är provat enligt UL 2127 och IMO MSC/Circ. 668. Designkoncentrationen för systemet uppges vara 100 g/m<sup>3</sup> för bränder av klass B och C och ett system klarar av att skydda upp till 110 m<sup>3</sup> med totalt 10 generatorer.

Micro-K är ej elektriskt ledande och har låg korrosivitet. Vidare är ODP och GWP-värdena (**O**zone **D**epletion **P**otential respektive **G**lobal **W**arming **P**otential) lika med noll. Micro-K har även blivit godkänt av UL Canada, MCA UK, Danmark och ECB Holland [37].

### 6.4 Celanova (FirePro)

Celanovas produkt FirePro är baserad på kaliumföreningar. Släckande koncentrationen är +25 g/m<sup>3</sup>, erforderlig koncentration beror dock på det skyddade rummets utformning och på graden av ventilation. Under ideala förhållanden har det räckt med en koncentration på 20 g/m<sup>3</sup>. Användningsområdena för deras aerosolsystem är rumsfyllnadsskydd, punktskydd och portabla släcksystem.

Områden där systemet kan användas är, enligt Celanova, inom marin, transport, kontor, datarum, elektrisk utrustning, garage, restauranger och industriella tillämpningar. Livslängden för systemen uppges vara 15 år. Aerosolgeneratorerna uppges klara temperaturer på mellan -60°C och +60°C, relativ luftfuktighet upp till 98 % och bränder i material av klass A, B och C. Systemen kan aktiveras automatiskt (termiskt), manuellt eller elektriskt via ett detektionssystem [38].

### 6.5 Powsus Inc (Envirogel)

Envirogel tidigare känt under namnet PGA är godkänt av EPA under SNAP-programmet för användning i obemannade utrymmen. Detta gäller användningsområden inom industriella och bostadsapplikationer. Envirogel är ett gel som består av en kombination av pulver och gas. Powsus tillhandahåller flera olika varianter av Envirogel anpassat för det specifika ändamålet eller brandscenariot. En kombination godkänd av EPA består av ett gel innehållande en blandning av ammoniumpolyfosfat och Halonersättningsgasen FE-36 tillverkad av DuPont. Blandningen har enligt tillverkaren, visat sig vara lika bra eller bättre än Halon 1211 i flera olika tillämpningar [39].

## 6.6 Firecom (FPG)

Aerosolsläckmedlet FPG tillverkas av det Italienska företaget Firecom. FPG producerar aerosoler där partiklarna med diametrar kring 3  $\mu\text{m}$ , till största delen består av kaliumnitrat. Den teoretiska släckkoncentrationen vid rumsfyllnadsapplikationer är angivet till 50  $\text{g}/\text{m}^3$ , för de typer av generatorer som inte är försedda med en kylare. För den kylda varianten är den teoretiska släckkoncentrationen 100  $\text{g}/\text{m}^3$ . Koncentrationen vid dimensionering av systemet inkluderar en säkerhetsfaktor på mellan 20 % till 100 % som skall ta hänsyn till rummets geometri och även andra faktorer som t ex ventilation. Dessa värden är applicerbara för rum där takhöjden inte överstiger 5 m.

Vid beräkning av släckmedelsmängden används samma enkla formel som återfinns i den Australiensiska/Nya Zeeländska standarden ( $M = C \times V$ ). Aerosolgeneratorerna har en garanterad livslängd på 5 år. Aerosolgeneratorerna kan användas i ett temperaturintervall mellan  $-60^\circ\text{C}$  och  $+60^\circ\text{C}$ , i luftfuktighet upp till 98 % och för brandscenarier som inkluderar material från klass A, B och C. Företaget erbjuder produkten både för fasta installationer i t ex industribyggnader och i olika transportfordon, och för portabla släckutrustningar. Produkten har testats av det kemiska laboratoriet på Universitetet i Rom "La Sapienza" [40].

## **7 Fortsatta insatser**

Fortsatta insatser bör fokuseras inom två områden:

- 1) Fördelning av aerosoler i ett utrymme, släcktider och hålltid (upprätthållande av släckande koncentration i punkt i det skyddade utrymmet) samt tryckökning i rum. Detta kräver experimentella försök.
- 2) Hälsospekter. För att undersöka hälsospekterna av släckningsaerosoler bör dels aerosolen (ev. flera olika fabrikat) karakteriseras experimentellt med avseende på sammansättning och storleksfördelning, dels bör en litteratursökning göras med inriktning mot de specifika ämnen man finner i aerosolen. Det kan vara lämpligt att samarbeta med de svenska forskargrupper (t.ex. vid Karolinska sjukhuset) som är verksamma inom aerosolhälsoforskningen.

## 8 Referenser

- [1] C. J. Kibert och D. Dierdorf. *Solid particulate aerosol fire suppressants*, Fire Technology, Volume 30 number 4, 1994. National Fire Protection Association
- [2] E. Jacobson, *Powdered aerosols performance in various fire protection applicants*, HOTWC 96, NMERI
- [3] Personlig kommunikation med personal från US Coast Guard
- [4] MSC/Circ.848, "Revised Guidelines for the Approval of Equivalent Fixed Gas Fire-Extinguishing Systems, as Referred to in SOLAS 74, for Machinery Spaces and Cargo Pump-rooms", International Maritime Organization, June 8, 1998
- [5] J. Vitali, C. Kibert och J. Akers, *Pyrogenic aerosol fire suppressants: Engineering of delivery systems and corrosion analysis*, HOTWC 96, NMERI
- [6] Personlig kommunikation med Boris Voronov, Russian Maritime Register of Shipping
- [7] E A Smith, E C Kimmel, J E Reboulet, S Prues, K Zepp, HMC S Bulger, HM2 J L Cassell och R L Carpenter, *Toxicological evaluation of exposure to two formulation of pyrotechnically-generated aerosol: range finding and multiple dose*, HOTWC 1996, NMERI
- [8] E. C. Kimmel, E. A. Smith, J. E Reboulet and R. L Carpenter, *The physicochemical properties of SFE fire suppressant atmospheres in toxicity vs fire extinguishment tests: Implications for aerosol deposition and toxicity*, HOTWC 96, NMERI
- [9] E C Kimmel, E A Smith, S Prues, K Zepp, J H English och R L Carpenter, *Pulmonary Edemagenesis in F-344 Rats Exposed to SFE (formulation A) Atmospheres*, HOTWC 96, NMERI
- [10] D. N. Ball och M. S. Russell, *Pyrotechnic aerosol extinguishing for AFV engine bays*, HOTWC 94, NMERI
- [11] Informationsblad från Nordiska Instrument Försäljning AB om Soyus Aerosol Brandsläckning, Dynamit Nobel AG
- [12] E Jacobson, G Muira och V Neishtot, *The relationship between particulate aerosol cooling process and its effectiveness as a fire extinguishing agent*, HOTWC 97, NMERI
- [13] E. Jacobson, *Particulate aerosols – update on performance and engineering*, HOTWC 95, NMERI

- [14] C.T. Ewing, F. R. Faith, J.T. Hughes och H. W. Carhart, *Evidence for Flame Extinguishment by Thermal Mechanisms*, *Fire Technology*, 1989, pp. 195 - 212
- [15] C. T. Ewing, F. R. Faith, J. T. Hughes och H.W. Carhart, *Flame Extinguishment Properties of Dry Chemicals: Extinction Concentrations for Small Diffusion Pan Fires*, 1989, pp. 134 - 149
- [16] C.T. Ewing *et al.*, *Extinguishing Class A Fires with Multipurpose Chemicals*, *Fire technology*, 1995, pp. 195 - 211
- [17] *Fire-fighting systems in machinery and other spaces*, Sub-committee on fire protection 43rd session Agenda item 8, 24 July 1998, IMO, International Maritime Organisation
- [18] *Pyrogen fire extinguishing systems*, Australian/New Zealand Standard AS/NZS 4487:1997 ISBN 0 7337 1315 7
- [19] *US response to circular # 1*, E-mail från Randall Eberly vid US Coast Guard till Sören Isaksson vid SP Brandteknik, daterat 2000-06-16
- [20] R. L. Carpenter, E. C. Kimmel och E A Smith, *Determinants of SFE toxicity: Interaction of atmospheric, dynamic and physiological responses*, HOTWC 96, NMERI.
- [21] T. Hertzberg, *Partiklar från bränder, Förstudie*, Rapport Räddningsverket, P21-377/01, 2001
- [22] E. C. Kimmel och R. L. Carpenter, *Concepts in the inhalation toxicity of fire suppressants: Pneumotoxicity*. HOTWC 1997, NMERI
- [23] G. M. Rusch, *The determination of risk factors for acute exposure to powdered aerosols*. HOTWC 1997, NMERI
- [24] <http://www.epa.gov/ozone/title6/snap>,
- [25] <http://www.harc.org/harcnews.html>,
- [26] E. A. Smith, E. C. Kimmel, J. H. English och R. L. Carpenter, *The assessment of toxicity after exposure to a pyrotechnically-generated aerosol*, HOTWC 95, NMERI
- [27] G. Holmstedt, *Kompendium i släckmedel och släckverkan*, Brandteknik LTH, mars 2000
- [28] MSC/Circ. 1007, *Guidelines for the approval of fixed aerosol fire-extinguishing system equivalent to fixed gas fire-extinguishing systems, as referred to in SOLAS 74, for machinery spaces*, International Maritime Organisation, June 26, 2001
- [29] OKP 48 5433, *Fire Engineering Generators of Extinguishing Aerosols. Generator Technical Requirements. Test methods*, 1997



- [30] *Condensed Aerosol extinguishing systems. Part 1: Component for Condensed Aerosol extinguishing systems*, prEN XXXXX-1, CEN/TC 191/WG 6/TG 2 N 4rev
- [31] *Condensed Aerosol extinguishing systems. Part 2: Design installation and maintenance of Condensed Aerosol extinguishing systems*, prEN XXXXX-2, CEN/TC 191/WG 6/TG 2 N 4rev
- [32] <http://www.imo.org/>
- [33] Reklambroschyr från Pyrogen, *A revolution in fire suppression technology*, Pyrogen Ltd.
- [34] <http://www.pyrogen.com>.
- [35] J. Berezovsky, Pyrogen Ltd, *Pyrogen – a revolution in fire suppression technology?* Fire Safety Engineering, Vol., No. 5, October 1998
- [36] Informationsmaterial från Dr Michael Haerig på Dynamit Nobel AG.  
[Michael.Haerig@dynamit-nobel.com](mailto:Michael.Haerig@dynamit-nobel.com)
- [37] E-post korrespondens med Guobi Zhang, Senior Engineer, R&D Department, Ansul Incorporated, Tyco International Ltd, [gzhang@tycoint.com](mailto:gzhang@tycoint.com), [www.ansul.com](http://www.ansul.com)
- [38] Reklambroschyr från Celanova, <http://firepro-celanova.com/index/mainindex.htm>, Celanova Limited
- [39] [www.powsus.com](http://www.powsus.com).
- [40] Informationsmaterial från företaget Fireco, beställt via deras Internetadress [www.firecom.it](http://www.firecom.it).

