

# VESISUMUUN PERUSTUVAN KAKSIFAASIJÄRJESTELMÄN MITOITTAMINEN SUURTEN KONEISTOTILOJEN TILASUOJAUKSEEN

Jukka Vaari  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
PL 1803, 02044 VTT

## Tiivistelmä

Tilasuojaukseen tarkoitetut vesisumujärjestelmät alentavat suojattavan tilan happipitoisuutta muuttamalla pienikokoisia vesipisaroita vesihöyryksi, joka syrjäyttää happea. Tähän prosessiin käytetään energiaa, joka on peräisin tilassa olevasta palosta. Mikäli tilassa oleva palo on pieni itse tilaan nähden, veden höyrystämiseen on käytössä vain vähän energiaa tilavuusyksikköä kohti, ja järjestelmän suorituskyky alenee. Yksi mahdollisuus vesisumujärjestelmän suorituskyvyn parantamiseen suurissa tilavuuksissa on syöttää suojattavaan tilaan veden ohella jotain toista sammutetta. Tässä esityksessä käsitellään kaksifaasijärjestelmää, jossa suojattavaan tilaan syötetään veden ohella typpeä. Työssä on laskennallisesti arvioitu tarvittava tyypimäärä suojattavan tilan tilavuuden funktiona, kun tavoitteena on saavuttaa sama sammutustehokkuus kaikissa tilavuuksissa. Arviointiin on käytetty termistä liekin sammutusteoriaa sekä sammutusta kuvaavaa yksivyoäykemallia.

## JOHDANTO

Nykyisten kaupallisten, tilasuojaukseen tarkoitettujen vesisumujärjestelmien toiminta perustuu pääasiassa happipitoisuuden alentamiseen kaikkialla suojattavassa tilassa[1]. Järjestelmät, jotka syöttävät suojattavaan tilaan vain vettä, muuttavat pieniä vesipisaroita vesihöyryksi käyttämällä tähän prosessiin energiaa, joka on peräisin tilassa olevasta palosta. Syntyvä vesihöyry on kaasua, joka vaatii tilaa kuten mikä tahansa muu kaasu. Jos suojattava tila olisi täysin kaasutiivis, höyryn syntyminen kasvattaisi painetta suojattavassa tilassa. Käytännössä tilat vuotavat aina sen verran, että sammutusjärjestelmän tuottamat yli- tai alipaineet tasoittuvat varsin nopeasti kaasun virratessa vuotokohtien ja aukkojen läpi. Vesihöyryn synnyttämä ylipaine johtaa tällöin kaasun virtaukseen ulos suojattavasta tilasta, ja ulosvirtauksen mukana tilasta kuljettuu pois happea.

Happipitoisuus alenee sitä enemmän, mitä enemmän vesihöyryä tilassa syntyy. Suuren vesihöyrypitoisuuden aikaansaaminen vaatii kuitenkin runsaasti energiaa. Tarvittavan energian määrää kasvattaa myös itse tilan koko, sillä tilasuojauksessa pyritään aikaansaamaan sama sammutusteho kaikkialla suojattavassa tilassa. Tällöin on selvää, että tilavuuteen nähden suuri palo on varsin helppo sammuttaa vesisumujärjestelmällä. Jonkinlaisena kynnysarvona 'suurelle' palolle voidaan pitää tehoitiheyttä  $2 \text{ kW/m}^3$ . Käytännössä on havaittu, että tätä suuremmat palot voidaan tyypillisesti sammuttaa vesisumujärjestelmien avulla alle 15 minuutissa, joka on tyypillinen kaasujärjestelmiltä vaadittu suojausaika[2]. Mikäli tilassa oleva palo on pieni itse tilaan nähden (tehoitiheys alle  $2 \text{ kW/m}^3$ ), veden höyrystämiseen on käytössä vain vähän energiaa tilavuusyksikköä kohti, ja järjestelmän suorituskyky (kyky alentaa suojattavan tilan happipitoisuutta) alenee. Tämä on tärkein rajoittava tekijä vesisumun soveltamisessa suurten tilojen tilasuojaukseen.

Vesisumujärjestelmän suorituskyvyn tehostamiseksi on olemassa keinoja, joista jotkut on toistaiseksi todennettu vain laboratoriomittakaavassa, toisia taas voidaan soveltaa käytäntöön suuressa mittakaavassa. Laboratoriomittakaavassa voidaan suhteellisen helposti saada aikaan niin suuria vesipisarakonsentraatioita, että ne itsessään (ilman happipitoisuuden alentamista) saavat aikaan liekin sammumisen [3]. Vesipisarat toimivat tällöin samaan tapaan kuten sammuteaerosolit, jäädyttäen suoraan liekkiä. Näiden ratkaisujen siirtäminen suureen mittakaavaan on kuitenkin tekninen ongelma (ja myös kustannuskysymys), jota toistaiseksi ei ole ratkaistu. Jos ongelma voitaisiin ratkaista, vesisumujen suorituskyky ei enää riippuisi suojattavan tilan tilavuudesta tai sammutettavan palon koosta yhtä voimakkaasti kuin tällä hetkellä.

Suureen mittakaavaan tällä hetkellä sovellettavissa ratkaisuissa käytetään usein veden ohella jotain toista sammutetta. Tämä voi olla esim. veteen lisättävä kalvovaahtoneste, jolloin pyritään ennenkaikkea lisäämään suorituskykyä pienikokoisia lammikkopaloja vastaan. Yhdysvaltain laivasto on tutkinut ratkaisua, jossa vettä syöttävän sammutusjärjestelmän ohella suojattavaan tilaan syötetään kemiallista kaasusammutetta[4]. Tässä veden tehtävänä on ennenkaikkea jäädyttää suojattavaa tilaa, jotta kemiallisen sammutteen vahingollisia hajoamistuotteita (etupäässä fluorivetyhappoa) syntyisi mahdollisimman vähän. Tässä esityksessä tarkastellaan ratkaisua, jossa vesisumun ohella suojattavaan tilaan syötetään inerttiä kaasusammutetta, tyypeä. Tällaisen ratkaisun suorituskyky on äskettäin osoitettu suuren mittakaavan sammutuskokeissa (3300 m<sup>3</sup>:n tilavuus).

## **KAKSIFAASIJÄRJESTELMÄ**

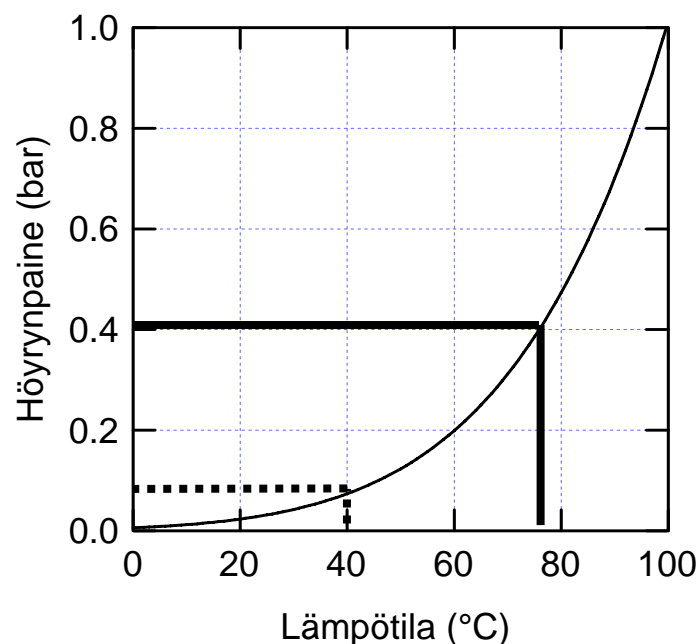
### **Toimintaperiaate**

Tässä työssä tarkasteltavaa kaksifaasijärjestelmää (Marioff Corporation Oy, HI-FOG MT3) voidaan ajatella kahtena erillisenä sammutusjärjestelmänä, joista toinen on pelkkään veteen perustuva vesisumujärjestelmä, ja toinen sumujärjestelmän suorituskykyä tehostava, tyypeä purkava inerttikaasujärjestelmä. Jälkimmäisellä on kuitenkin merkittäviä eroja esim. ISO 14520-13:2000 -standardin mukaan suunniteltuun tyyppijärjestelmään, sillä kaksifaasijärjestelmän inerttikaasuosan suunnittelukonsentraatio riippuu suojattavasta tilavuudesta (ja on inerttikaasujärjestelmän suunnittelukonsentraatiota pienempi), ja purkausaika on pitempi kuin varsinaisella inerttikaasujärjestelmällä.

Työn tarkoituksena on saada selville, mikä minimimäärä tyypeä suojattavaan tilaan on syötettävä, jotta saavutettaisiin sama sammutusteho kaikissa tilavuuksissa. Jotta kvalitatiivisesti ymmärrettäisiin, miksi tyyppien määrä riippuu tilavuudesta, tarkastellaan veden höyrynpainekäyrää, joka on esitetty kuvassa 1. Kuvaan merkitty ehyt viiva edustaa tyyppillisiä olosuhteita suojattavassa tilassa sammutuksen aikana, kun tehotehoisuus on suuri. Vesisumun suuri jäädytysteho aiheuttaa sen, että kaasulämpötila (liekkialueen ja palopatsaan ulkopuolella) pysyy veden kiehumislämpötilan alapuolella. Veden höyrynpainekäyrästä nähdään, että jo alle 80 °C:n kaasulämpötilassa vesihöyryn konsentraatio kaasussa voi kasvaa maksimissaan 40 tilavuusprosenttiin. Tämä on riittävän suuri konsentraatio, että sille altistuva liekki sammuu [5]. Välttämätön edellytys maksimikonsentraation saavuttamiselle on kuitenkin, että kaasussa olevien pisaroiden kokonaispinta-ala (ja siten höyrystymisnopeus) on riittävän suuri. Jos sammutusjärjestelmä käyttää vähän vettä purkaen sen suurina pisaroina,

maksimikonsentraatiota ei todennäköisesti saavuteta. Hienojakoisen vesisumun tapauksessa höyry on useimmiten kylläistä.

Kuvaan 1 merkitty katkoviiva edustaa tyypillistä pienen tehottiheyden tapausta. Tehottiheyden ollessa pieni vesisumun suuri jäähdystysteho aiheuttaa sen, että kaasulämpötila putoaa alas. Jos kaasulämpötila jää 40 °C:n tuntumaan, vesihöyryn konsentraatio kaasussa jää alle kymmenen prosentin, mikä on liian vähän sammuttamaan liekkejä. Suurten tilavuuksien kokeissa on kuitenkin mitattu tätäkin alhaisempia kaasulämpötiloja sammutuksen aikana. Ehyen ja katkoviivan välinen ero kuvaa (kvalitatiivisesti) puuttuvaa sammutustehoa, joka on tuotettava typen syöttämällä. Tarvittavaa typpikonsentraatiota ei kuitenkaan voi lukea suoraan tällaisesta kuvasta, sillä typen ja vesihöyryn sammutusteho (kyky sitoa lämpöenergiaa) poikkeaa hiukan toisistaan, ja useat muut tekijät kaasulämpötilan ohella vaikuttavat tarvittavaan typpimäärään.



Kuva 1. Veden höyrynpainekäyrä, ja tyypilliset olosuhteet sammutustilanteessa suurella (ehyt viiva) ja pienellä (katkoviiva) tehottiheydellä.

## Suorituskyky

Tässä työssä käsiteltävä kaksifaasijärjestelmä on suunniteltu koneistotiloja varten. Tällaisissa tiloissa pääasiallisen paloriskin muodostavat palavia nesteitä sisältävät laitteet (esim. turbiinit, moottorit ja hydraulikkakoneikot) ja prosessit (esim. pinnoitus ja maalaus). Tyypilliset palot ovat suihkuavien nesteiden paloja (spraypalot) tai lammikkopaloja. Tällaisia paloja varten suunnitellun tilasuojausjärjestelmän testaamiseksi maalaitoksia varten on olemassa FM Global -vakuutusyhtiön käyttämä testausmenetelmä [6], joka on tarkoitettu tilavuudeltaan yli 260 m<sup>3</sup>:n koneistotiloihin. Se pohjautuu suurelta osin laivojen konehuoneisiin ja lastipumpputiloihin tarkoitettuun testausmenetelmään [7].

Taulukko 1. FM Global-vakuutusyhtiön käyttämän koneistotilojen sammutusjärjestelmien palotestimenetelmän testipalot.

	Palon kuvaus	Nimellinen paloteho (MW)	Vaatus
1	Avoin vaakasuora matalapaineinen dieselspray	6	sammutus
2	Avoin ylöspäin suunnattu matalapaineinen dieselspray	6	sammutus
3	Piilotettu vaakasuora dieselspray	6	sammutus
4	Avoin vaakasuora korkeapainespray	2	sammutus
5	Piilotettu vaakasuora dieselspray ja piilotettu dieselallas	1 (spray) 0.2 (allas)	spray: sammutus allas: hallinta
6	Piilotettu heptaaniallas	2.4	hallinta
7	Valuva heptaanipalo	28	sammutus
8	Puutapuli heptaanialtaassa	7.5	sammutus

FMG:n menetelmässä käytetyt testipalot on esitetty taulukossa 1. Taulukossa esiintyvät nimelliset palotehot nestealtaille ja valuvalle palolle ovat suurempia kuin todelliset keskimääräiset palotehot, sillä sammutusjärjestelmän toiminta vaikuttaa näiden palojen palotehoon huomattavasti. Joidenkin allaspalojen kohdalla vaatimuksena menetelmässä on sammutuksen sijasta hallinta. Nestealtaalle tällainen käsite on kuitenkin varsin hatarasti määriteltävissä, ja niinpä kakasifaasijärjestelmän palotesteissä tavoitteeksi asetettiin yksinkertaisesti kaikkien testipalojen sammuttaminen. Testit suoritettiin 3300 m<sup>3</sup>:n testitilassa (kattokorkeus 10 m), jossa oli 2m x 2m avoin oviaukko. Kaikki palot saatiin sammutetuksi 15 minuutin kuluessa järjestelmän aktivoinnista.

## KAASUMÄÄRÄN MITOITTAMINEN

### Mitoituspalon valinta

Testisarjan yksittäisissä kokeissa käytetty typpimäärä vaihteli siten, että suurimmat palot saatiin pääsääntöisesti sammutettua ilman typen käyttöä (pelkän vesisumun avulla), kun taas pienimmät palot vaativat suurimman typpimäärän (vrt. kuva 1). Näinollen kaasumäärän mitoituksen kannalta mitoituspaloksi on valittava testisarjan pienin palo. Taulukon 1 perusteella tämä on testipalo 5, jossa nimellinen kokonaispaloteho on 1.2 MW. Kuitenkin, koska spraypalossa polttoaineen höyrystymisnopeus ei riipu palosta itsestään, sammutusjärjestelmän toiminta vaikuttaa spraypalon palotehoon varsin vähän. Sitä vastoin allaspalossa, jossa takaisinkytkentä liekkiä ja nestepinnan välillä vaikuttaa palotehoon, sammutusjärjestelmän liekkiä jäähdyttävä vaikutus alentaa palotehoa nimelliseen, vapaata paloa vastaavaan palotehoon nähden. Suuren mittakaavan kokein on osoitettu [8], että allaspalon paloteho voi pudota jopa alle puoleen vesisumujärjestelmän toimiessa, ennenkuin varsinainen sammuminen tapahtuu. Näinollen on oletettavaa, että testipalon 6 paloteho sammumishetkellä on samaa luokkaa testipalon 5 palotehon kanssa tai hieman pienempi. Testimenetelmä määrittelee testipalon 5 esipaloajaksi (aika sytytyksen ja sammutusjärjestelmän aktivoinnin välillä) 15 sekuntia, kun taas testipalon 6 esipaloaika oli 120 sekuntia (millä varmistetaan, että allaspalo on täysin kehittynyt). Esipalon aikana testitilaan kertyy lämpöä, ja tilan happipitoisuus pienenee hiukan. Pitkä esipalo siis helpottaa

vesisumusammutusjärjestelmän toimintaa. Näiden tarkastelujen perusteella kaasumäärää mitoittavaksi paloksi laskentaa varten valittiin 1.2 MW:n vakiopaloteho.

## Termisten sammutteiden toiminta

Työssä tarkasteltava kaksifaasijärjestelmä syöttää suojattavaan tilaan vettä ja typpeä. Yhteistä näille sammutteille on, että ne ovat sammutusvaikutukseltaan fysikaalisia. Fysikaaliset (termiset) sammutteet toimivat liekkialueessa siten, että ne sitovat palamisessa vapautuvaa lämpöenergiaa, jolloin liekin lämpötila laskee. Palaville pinnoille joutuessaan ne jäädyttävät pintaa ja siten alentavat palamiskelpoisten kaasujen tuottonopeutta.

Pelkän liekin sammuttamisen tarkastelu kuvaa täsmällisesti vain kaasupalojen sammuttamista. Palavien nesteiden, ja palavien nesteytyvien tai hiiltyvien aineiden tapauksessa myös palavan pinnan sammuttavuudella on merkitystä. Tässä työssä suoritettavaan laskentaan riittää kuitenkin varsin hyvin liekin sammuttamisen tarkastelu. Tämä johtuu siitä, että testissä käytetyt polttoaineet ovat helposti palavia nesteitä, ja erityisesti testipalon 6 polttoaineella, heptaanilla, on alhainen kiehumislämpötila ja alhainen leimahduspiste. Tällaisten aineitten paloissa palavan pinnan jäädyttämällä on vain pieni merkitys.

Kokeellisesti on osoitettu, että mikäli liekin lämpötila laskee tietyn (polttoaineesta riippuvan) rajan alapuolelle, palamisessa vapautuva lämpö ei enää riitä kohottamaan polttoaineen ja hapetteen seoksen lämpötilaa niin korkealle, että palamisreaktio etenisi nopeasti; tällöin liekki sammuu. Jos oletetaan, että liekin ja sen ympäristön välillä ei tapahdu lämmönvaihtoa (adiabaattinen approksimaatio), kyseistä rajalämpötilaa kutsutaan liekin adiabaattiseksi rajalämpötilaksi. Todellinen liekki ei ole adiabaattinen, sillä se menettää osan energiastaan säteilynä. Adiabaattinen approksimaatio on kuitenkin laskennallisesti käyttökelpoinen yksinkertaisuutensa vuoksi. Useimmille hiilivedyille adiabaattinen rajalämpötila on  $(1600 \pm 100)$  K [9].

Jos jätetään vesipisaroiden vaikutus huomioimatta, ja oletetaan, että kaasujen lämmönsitomiskyky ei riipu lämpötilasta, adiabaattinen liekin lämpötila saadaan laskettua lausekkeesta

$$T_{FL} = T_0 + \frac{\dot{Q}}{\sum \dot{\rho}_i c_{p,i}},$$

missä  $T_0$  on ympäristön lämpötila,  $\dot{Q}$  on paloteho,  $\dot{\rho}_i$  on kaasun  $i$  tuottonopeus (kg/s tai mol/s), ja  $c_{p,i}$  on kaasun  $i$  ominaislämpökapasiteetti (J/(kg K) tai J/(mol K)). Alaindeksi  $i$  viittaa sekä palamistuotteina syntyviin kaasuihin että niihin reagoimattomiin kaasuihin, jotka kulkevat liekin läpi ja näinollen lämpenevät liekin lämpötilaan. Näitä ovat mm. vesipisaroista syntynyt vesihöyry, ja ilmassa luonnostaan oleva tyyppi. Lausekkeesta nähdään, että kaasun lämmönsitomiskyky määrää liekin lämpötilan. Lämmönsitomiskyky puolestaan riippuu molekyylin rakenteesta siten, että monimutkaisemmat molekyylit sitovat enemmän lämpöä. Lämmönsitomiskyky ei kuitenkaan riipu molekyylin massasta. Näinollen esimerkiksi kolmiatomiset vesi ja hiilidioksidi sitovat enemmän lämpöä molekyyliä kohti kuin kaksiatominen tyyppi, vaikka vesihöyry on tyypeä kevyempää. Lämmönsitomiskyvyltään heikoimpia ovat yksiatomiset jalokaasut, esim. argon. Taulukkoon 2 on koottu joidenkin kaasujen ominaislämpökapasiteetteja huoneenlämpötilassa ja 1000 K:n lämpötilassa. Taulukosta nähdään, että jalokaasuja lukuunottamatta kaasujen lämmönsitomiskyky kasvaa

lämpötilan kasvaessa. Jos lasketaan adiabaattista liekin lämpötilaa ylläolevalla kaavalla, laskennassa tulisi soveltaa 1000 K:ssa päteviä arvoja.

*Taulukko 2. Eräiden kaasujen ominaislämpökapasiteetteja huoneenlämpötilassa ja 1000 K:n lämpötilassa ainemäärä- ja massayksikköä kohti.*

Kaasu	$c_p$ (298 K) J / (mol K)	$c_p$ (1000 K) J / (mol K)	$c_p$ (298 K) J / (kg K)	$c_p$ (1000 K) J / (kg K)
N <sub>2</sub>	29,1	32,7	1039	1168
O <sub>2</sub>	29,4	34,9	919	1091
CO <sub>2</sub>	37,1	54,3	843	1234
H <sub>2</sub> O	33,6	41,2	1867	2289
Ar	20,8	20,8	520	520

### Mitoituksessa käytetty laskentamalli

Jotta adiabaattista liekin lämpötilan käsitettä päästään hyödyntämään mitoituspalon sammumisen ennustamisessa, on pystyttävä laskemaan ajan funktiona sen kaasuseoksen koostumus ja lämpötila, joka liekkiin kulkeutuu. Käytännössä tämä edellyttää olosuhteiden laskemista koko suojattavassa tilassa, huomioiden myös ilmanvaihto tilassa mahdollisesti olevien aukkojen läpi. Käyttökelpoinen approksimaatio on tällöin yksivyöhykemalli. Koko suojattavan tilan kuvaaminen vain yhdellä vyöhykkeellä perustuu siihen, että katosta lattiaan suunnatut sammutussuihkut kaappaavat mukaansa savupatjassa olevaa kaasua ja kuljettavat sen kylmään kerrokseen, jolloin kerrokset oleellisesti sekoittuvat.

Yksivyöhykemalli on yksityiskohtaisesti kuvattu viitteessä [1]. Mallin antamista tuloksista on myös pidetty esitys Palotutkimuksen päivillä 2001, johon liittyvä suomenkielinen artikkeli on julkaistu viitteessä [10]. Tätä työtä varten malliin lisättiin ominaisuus, jolla voidaan kuvata inerttikaasun syöttöä suojattavaan tilaan. Lähtökohtana on kaasusuuttimien luona mitattu kaasupaine. Malli ei siis pyri ennustamaan kaasun purkautumisnopeutta kaasusäiliöistä putkiston ja suutinten kautta suojattavaan tilaan. Mitattu kaasupaine normitetaan siten, että sen (laaduttomaksi) maksimiarvoksi tulee 1. Normitettuun kaasupaineeseen sovitetaan analyyttinen funktio  $\hat{p}_{\text{disch}}(t)$  siten, että painekäyrän aikaderivaatta saadaan pehmeäksi. Tilaan purkautuvan kaasun  $i$  lähde-termi (tuottonopeus) yksikössä mol/s saadaan tällöin lausekkeesta

$$\dot{\rho}_i^{\text{DISCH}} = A \frac{d(\hat{p}_{\text{disch}}(t))}{dt},$$

missä vakio  $A$  määritellään kaavalla

$$A = \frac{p_{\text{cyl}} N_{\text{cyl}} V_{\text{cyl}} X_i}{RT_{\text{cyl}}}$$

ja missä  $N_{\text{cyl}}$  on kaasusäiliöiden lukumäärä,  $V_{\text{cyl}}$  on säiliön tilavuus,  $X$  on kaasun  $x$  tilavuusosuus,  $p_{\text{cyl}}$  on säiliön täyttöpaine ja  $T_{\text{cyl}}$  on säiliön täyttölämpötila.

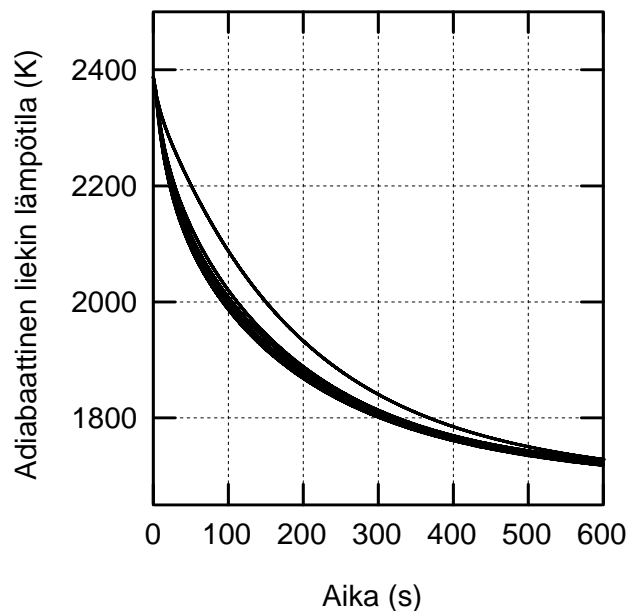
Lisätyn ominaisuuden oikeellisuus osoitettiin vertaamalla 121 m<sup>3</sup>:n tilavuudessa suoritettujen argon- ja inergen- järjestelmien kylmälaukaisuissa [11] mitattuja kaasulämpötiloja, happipitoisuuksia ja kaasupaineita simuloinnin antamiin tuloksiin. Lisäksi verrattiin mitoituspaloa vastaavassa sammutuskokeessa (testipalo 5) mitattuja kaasulämpötiloja sekä happipitoisuutta simuloinnin antamiin tuloksiin. Kaikissa tapauksissa simuloinnin antamat tulokset olivat sopusoinnussa koetulosten kanssa. Testipalon 5 kokeellisesti mitatussa sammumisajassa simuloinnin antamaksi adiabaattiseksi liekin lämpötilaksi saatiin 1720 K.

## Kaasumäärän mitoittaminen vaihtuvaan tilavuuteen

Varsinainen mitoituskalkulaatio suojaavan tilavuuden funktiona suoritettiin seuraavasti.

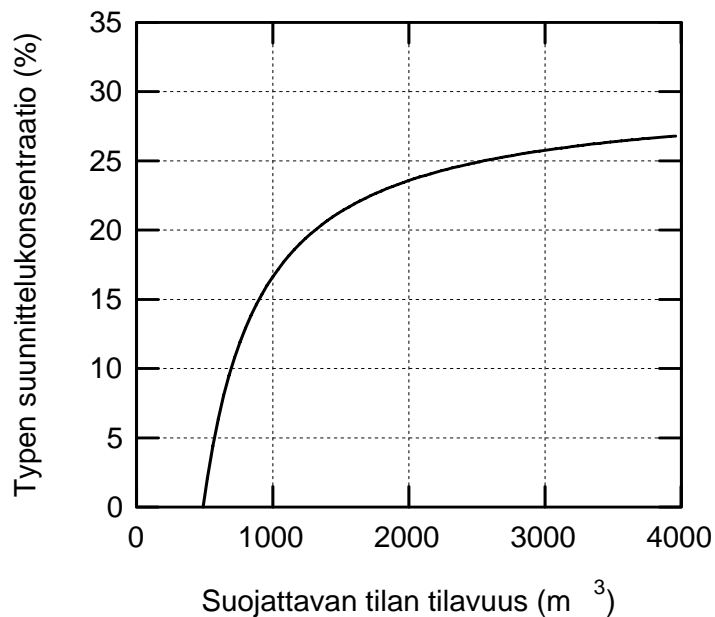
1. Vesisumujärjestelmän purkaman vesivirtaaman arvoksi asetettiin valmistajan ohjearvon pohjalta 0.13 l/min/m<sup>3</sup>. Vesisumun Sauterin keskihalkaisijana käytettiin arvoa 100 µm.
2. Kaasun purkausnopeus perustui testipalossa 5 mitattuun kaasupaineeseen kaasusuutinten luona
3. Purettavalle typpimäärälle asetettiin alkuarvaus
4. Simulointeja ajettiin 600 sekuntiin asti, ja tällöin saavutettu adiabaattinen liekin lämpötila merkittiin muistiin
5. Purettavaa typpimäärää muutettiin simuloitujen adiabaattisten liekin lämpötilan perusteella
6. Askeleita 4 ja 5 toistettiin, kunnes liekin adiabaattinen lämpötila 600 sekunnin kohdalla oli 1710 ja 1730 K:n välillä.

Simuloinneissa saadut adiabaattiset liekin lämpötilat ajan funktiona on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Simuloitu adiabaattinen liekin lämpötila ajan funktiona tilavuuksilla 500, 1200, 1900, 2600, 3300 ja 4000 m<sup>3</sup>, kun paloteholle on asetettu vakioarvo 1,2 MW.

Simuloinneissa käytettyjen kaasumäärien avulla voidaan piirtää typen suunnittelukonsentraatio suojattavan tilavuuden funktiona. Tämä kuvaaja on esitetty kuvassa 3.



*Kuva 3. Kaksifaasijärjestelmän purkaman typen suunnittelukonsentraatio suojattavan tilan tilavuuden funktiona.*

Kuvan 3 mukaan tilavuudeltaan alle 500 kuutiometrin suojattavissa tiloissa typpeä ei tarvita lainkaan FMG:n testipalojen sammuttamiseen kymmenen minuutin kuluessa järjestelmän aktivoinnista. Mitoituspalon palotehon 1,2 MW avulla tätä vastaavaksi tehotiheydeksi saadaan 2,4 kW/m<sup>3</sup>. Tilavuuden kasvaessa suunnittelukonsentraatio kasvaa siten, että sen asymptoottinen arvo ääretöntä tilavuutta kohti kuljettaessa on 30,0 %. Robinin ja Rowlandin mukaan [12] sammuttavat pitoisuudet typelle ovat pienessä polttimessa 30,9 %, suuressa polttimessa 35,6 % ja huonepalossa 36,6 %. Varsinaisten inerttikaasujärjestelmien suunnittelukonsentraatiot ovat kuitenkin miehitetyissä tiloissa näitä arvoja korkeampia (tyypillisesti 43 - 52 %, vastaten happipitoisuutta 10 - 12 %). Sammuttavaa pitoisuutta suuremmilla suunnittelupitoisuuksilla pyritään varmistamaan palojen sammuminen siinäkin tapauksessa, että tilassa olisi vuotoja, joiden läpi sammutetta pääsisi virtaamaan ulos suojattavasta tilasta enemmän kuin etukäteen on ajateltu. Kaksifaasijärjestelmän etuina inerttikaasujärjestelmään voidaan pienemmän kaasumäärän ohella pitää vesisumun tuomaa jäähdysvaikutusta, jota kaasujärjestelmillä ei ole. Lisäksi jatkuvatoimiset vesisuihkut estävät tehokkaasti palon uudelleensyttymistä ja leviämistä tapauksissa, joissa sammutus ei mahdollisesti täysin onnistu.

## KIITOKSET

Tekijä kiittää Marioff Corporation Oy:tä mitoituslaskennan suorittamisessa saamastaan tuesta.

## LÄHDELUETTELO

1. Vaari, J. Transient One-Zone Computer Model for Total Flooding Water Mist Fire Suppression in Ventilated Enclosures. *Fire Safety Journal*, 2002. Vol. 37, nro 3, s. 229-257.
2. Back, G. G., Beyler, C. L. ja Hansen, R. Capabilities and Limitations of Total Flooding, Water Mist Fire Suppression Systems in Machinery Space Applications. *Fire Technology*, 2000. Vol. 36, nro 1, s. 8-23.
3. Ogawa, Y., Liao, C., Tsuruda, T. ja Saito, N. Extinguishing efficiency of water mist for diffusion flames. Teoksessa: Second NRIFD Symposium, Proceedings, Mitaka, Tokyo, Japan 17.-19.7.2002. National Research Institute of Fire and Disaster, Tokyo, 2002.
4. Maranghides, A., Sheinson, R. S., Williams, B. A. ja Black, B. H. Water Spray Cooling System: A Gaseous Suppression System Enhancer. Interflam '99. International Interflam Conference, 8th Proceedings. Volume 1. June 29-July 1, 1999, Edinburgh, Scotland. Interscience Communications Ltd., London, England, 1999. S. 627-637.
5. Dlugogorski, B.Z., Hichens, R.K., Kennedy, E.M. ja Bozzelli, J.W. Water Vapor as an Inerting Agent. HOTWC 1997. Halon Options Technical Working Conference Proceedings, May 6-8, 1997. Albuquerque, NM, 1997. S. 7-18.
6. Draft performance requirements for fine water spray systems for the protection of combustion turbines, machinery spaces and special hazard machinery spaces with volumes exceeding 9175 ft<sup>3</sup> (260 m<sup>3</sup>). Factory Mutual Global, January, 1998.
7. IMO MSC/Circ.668, ANNEX, APPENDIX B. Interim test method for fire testing equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of Category A and cargo pump-rooms. International Maritime Organization, London, December 1994; IMO MSC/Circ.728, ANNEX. Amendments to the test method for equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of Category A and cargo pump-rooms contained in MSC/Circ.668, ANNEX, APPENDIX B. International Maritime Organization, London, June 1996.
8. Arvidson, M. ja Hertzberg, T. Water mist and water spray protection of machinery spaces on board ships. Tests in a simulated 500 m<sup>3</sup> machinery space. Julkaisematon. SP, Borås, 2002.
9. Drysdale, D.D. An introduction to fire dynamics, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, Chichester, 1999.
10. Vaari, J. Teoreettinen laskentamalli vesisumuihin perustuvalle koneistotilojen palosuojaukselle. *Palontorjuntatekniikka*, 2001. Vol. 31, nro 3-4, s. 56-59.
11. Su, J. Z., Kim, A. K., Crampton, G. P. ja Liu, Z. Fire Suppression With Inert Gas Agents. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2001. Vol. 11, nro 2, s. 72-87.
12. Robin, M. L. ja Rowland, T. F. Development of a Standard Cup-Burner Apparatus: NFPA and IOS Standard Methods. HOTWC 1999. Halon Options Technical Working Conference, Proceedings, April 27-29, 1999. Albuquerque, NM, 1999. S. 284-292.