

MALLINTAMINEN JA SEN KÄYTTÖ PALOTEKNIKASSA

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

Tiivistelmä

Tietotekniikan käyttö on levinnyt kaikille inhimillisen toiminnan alueille ja sen mukana mallintaminen on levinnyt myös palotekniikkaan. Esitelmässä luodaan katsaus mallintamisen sovelluksiin palotekniikan alalla ja esitetään seikkaperäisesti erään yksinkertaisen, mutta silti varsin käyttökelpoisen paloteknisen mallin perustelu ja soveltaminen käyttäen sekä *determinististä* että *stokastista* lähestymistapaa.

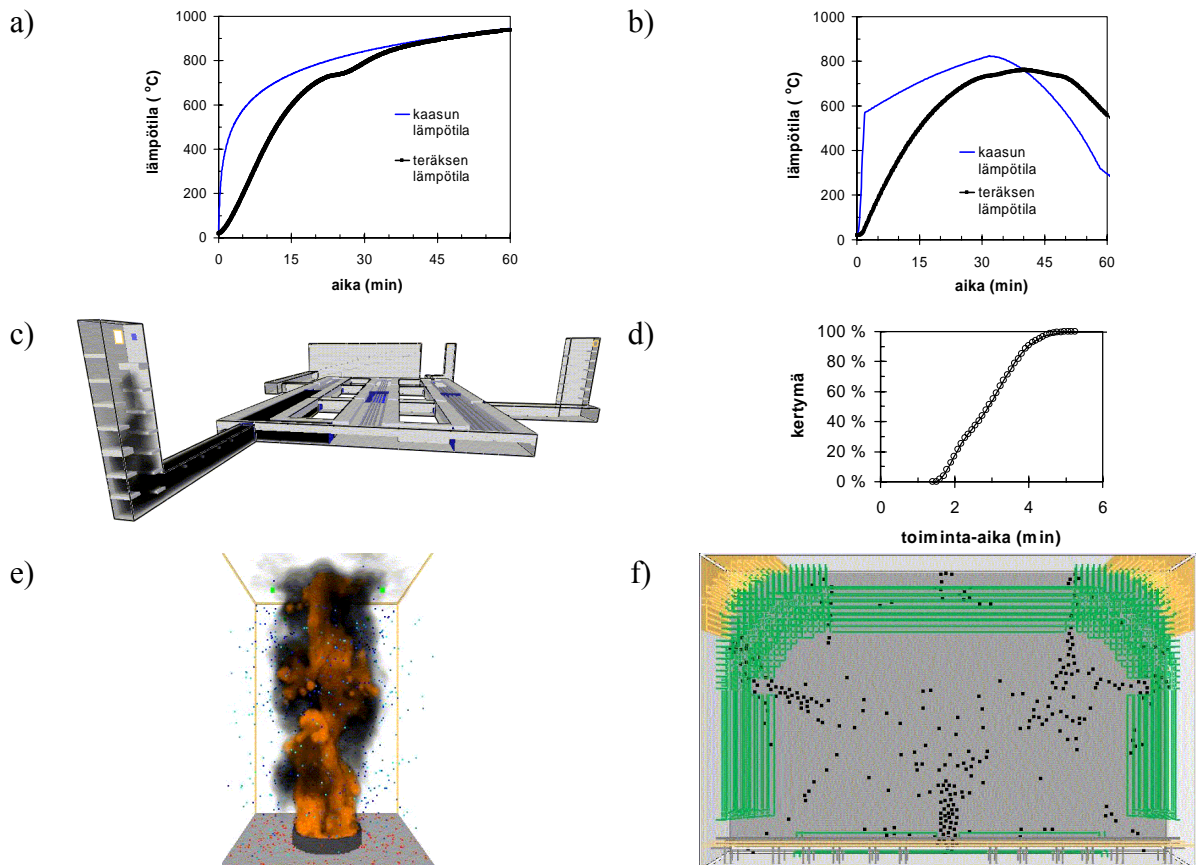
JOHDANTO

Mallintaminen on mallien luomista ja niiden käyttämistä selittämään ympäröivän todellisuuden ilmiöitä. Jonkin asian malli on kuvaus kyseisestä asiasta, kuten esimerkiksi kartta on malli todellisesta maastosta tai pienoismalli on pienennetty malli todellisesta esineestä. Filosofi Immanuel Kantin mukaan meillä ei itse asiassa voi olla tietoa maailmasta sinänsä, vaan kaikki, mitä voimme siitä tietää muodostuu havaintojemme ja kokemuksen kautta kertyneistä ajatusmalleista. Kun havaintoja ja kertynyttä kokemusta jäsennetään systemaattisesti, niistä voidaan muodostaa tieteellisiä malleja, so. malleja, jotka täyttävät tieteellisyyden vaatimukset, kuten objektiivisuuden, kriittisyyden, autonomisuuden ja yleisyyden vaatimukset. Palotekniikassa käytettyjä tieteellisiä mallilajeja ovat fysikaaliset ja abstraktit mallit, joista edellisiin kuuluvat mm. palotestit ja jälkimmäisiin matemaattiset mallit, joiden ominaispiirre on se, että niiden lopullinen muotoiltu esitetään matematiikan kielellä eli laskentakaavoina. Ne edustavat pitkälle kehittynyttä mallintamista, koska kiteyttävät monia apumalleja lähtien ns. maalaisjärjen mukaisista käsitteellisistä malleista (esim. säilymislait) aina tiukan formaalin logiikan vaatimukset täyttäviin malleihin asti. Jatkossa esitellään matemaattisen mallintamisen soveltamista palotekniikan alalla käyttäen esimerkkinä niin yksinkertaista mallia, että sen yhtälöt ja niiden soveltaminen voidaan esittää lyhyinä, esim. taskulaskimella laskettavissa olevina kaavoina. Tulipalotapahtumassa on hyvin lukuisa määrä vaikuttavia tekijöitä ja siksi, kun pyritään vähänkään tarkempaan palon kuvaamiseen, tarvittavat matemaattiset mallit eivät enää ole esimerkkinamme kaltaisia yksinkertaisesti esitettävissä olevia ja laskettavia malleja, vaan niiden ratkaiseminen vaatii tietokoneen käyttöä. Jo esimerkiksi pienessä huoneessa tapahtuvan tulipalon kuvaamisessa tarvitaan niin lukuisa määrä kytkettyjä alimalleja, että huonepalon laskennallinen mallinnus on mahdollista vain tietokonetta käyttäen. Modernit tietokone-ohjelmiksi työstetyt palotekniikan matemaattiset mallit kuvaavat tulipaloa varsin realistisesti ja usein puhutaankin palonsimuloinnista, jossa termi simulointi viittaa todellisuuden jäljittelyyn.

Tässä esitelmässä luodaan katsaus mallintamisen sovelluksiin palotekniikan alalla ja esitetään seikkaperäisesti erään yksinkertaisen, mutta silti varsin käyttökelpoisen paloteknisen mallin perustelu ja soveltaminen käyttäen sekä *determinististä* että *stokastista* lähestymistapaa.

PALOTEKNINEN MALLINTAMINEN JA SEN KEHITYSTRENDIT

Palotekniikassa mallintamista käytetään tulipalon ja sen vaikutusten määrälliseen kuvaamiseen, joka on ennustavaa silloin, kun paloteknistä mallinnusta käytetään rakennusten tai muiden kohteiden suunnittelussa, mutta mallintamista voidaan käyttää myös palotilanteen rekonstruoinnissa esim. palosyyntutkinnassa. Esimerkkejä asioista, joita paloteknisellä mallintamisella kuvataan ovat mm. kaasun tai kiinteiden aineiden lämpötilat, tilan savuisuus, myrkyllisten kaasujen pitoisuudet, rakenteiden kestävyys, ilmaisimien ja sprinklereiden laukeamisajat, ihmisten poistumiseen kuluva aika, jne. Kuvassa 1 esitetään esimerkkejä paloteknisestä mallintamisesta.



Kuva 1. Esimerkkejä paloteknisestä mallintamisesta: a) standardilämpötila ja sille altistetun teräsrakenteen lämpötila, b) vyöhykemallilla laskettu lämpötila ja sille altistetun teräsrakenteen lämpötila, c) savun leviäminen mallintaminen maanalaisessa pysäköintitilassa, d) stokastisen mallintamisen tuloksena saatu ilmaisimen toiminta-ajan todennäköisyys, e) tulen, savun ja sprinklauksen mallintaminen ja f) ihmisten poistumisen mallintaminen.

Paloteknisen mallintamisen kyky tuottaa luotettavia tuloksia on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosien aikana lähinnä kahden tekijän vuoksi, toinen on palotekniikan tieteellisen ymmärtämisen kypsyminen yhä paremmin todellisuutta kuvaaviksi malleiksi ja toinen on laskennan tehostuminen, johon vaikuttaa tietokoneiden laskentatehon voimakas kasvu sekä paloteknisten mallien tehokas ohjelmointi tietokoneille. Tämä kehitys näkyy siinä, että toisaalta palon deterministisessä mallintamisessa (ks. alla) ollaan siirtymässä yksittäisten

tekijöiden laskennasta monta tekijää samanaikaisesti laskeviin laskennallisiin malleihin ja toisaalta stokastisen mallintaminen on korvaamassa deterministisen mallintamisen.

Käytännössä deterministisen mallintamisen kehitys näkyy selvimmin siinä, että vyöhykemallit, kuten CFAST, ovat väistymässä kenttämallien, kuten FDS, tieltä. Kun 10 vuotta sitten laskettiin tyypillisesti kahta suuretta, palotilan kuuman kerroksen lämpötilaa ja korkeutta, niin tällä hetkellä samassa ajassa saadaan laskettua tilan kaasujen lämpötilat ja vallitseva säteily, savun tiheys ja myrkyllisten kaasujen pitoisuudet ja näiden leviäminen sekä rakenteiden kuumeneminen ja lämmönsiirto ottaen huomioon mm. savunpoiston ja sprinklereiden vaikutukset. Lisäksi uusimmissa ohjelmissa voidaan samassa laskennassa suorittaa ihmisten poistumisen arviointi.

Vaihtelevuus on tulipalon olennainen piirre ja siksi palotekniikassa käytetyssä mallintamisessa ollaan siirtymässä deterministisistä, yksittäisiin piste-estimaatteihin, kuten keskiarvoihin perustuvista, malleista stokastisiin malleihin, joissa ainakin olennaisimpien tekijöiden osalta käytetään tietoa myös niiden jakaumista. Mallinnus perustuu useita kertoja toistuviin satunnaisotoksiin malliin sisältyvistä jakaumista ja se tuottaa todennäköisyys-jakauman halutulle tulokselle. Koska laskentatapaan liittyy tietojen arpomista, sitä kutsutaan usein Monte Carlo -laskennaksi. Kun tähän laskentatapaan liitetään tilastotiedoista johdettuja malleja koskien esim. tulipalojen esiintymismistäajuutta, palokunnan toimintaa, jne., näitä malleja käyttäen pystytään arvioimaan määrällisesti paloihin liittyviä riskejä.

ESIMERKKI ULKONA TAI SUURESSA TILASSA PALAVAN TULIPALON AIHEUTTAMAN LÄMPÖRASITUKSEN MALLINTAMISESTA

Mallin johtaminen

Eräs käytännön kannalta tärkeä kysymys on tulipalon ympäristöönsä kohdistaman lämpörasituksen määrittäminen. Tällöin voi olla kyseessä esim. helposti syttyvään kohteeseen vaadittavan turvaetäisyyden määrittämisestä tai ympäröiviltä rakenteilta vaadittavan palonkeston määrittämisestä, jne. Jos palo tapahtuu suljetussa tilassa, lämpörasituksen määrittäminen johtaa useimmiten suhteellisen monimutkaisiin laskelmiin, joissa joudutaan arvioimaan tilan yläosaan muodostuvan kuuman savukerroksen vaikutusta. Jos palo kuitenkin tapahtuu ulkona tai palon kokoon niin suuressa tilassa, että savukerroksen vaikutus voidaan arvioida hyvin pieneksi, niin tällöin palon ympäristöönsä aiheuttaman lämpörasituksen suuruus voidaan arvioida varsin yksinkertaisella mallilla. Seuraavassa esitetään tämän laskentamallin perustelut askel askeleelta (kuva 2), koska siinä tulee esille monia yleisiä mallinnuksessa käytettäviä menetelmiä:

- Ongelman määrittely (kuva 2a), joka tässä on seuraava: "Mikä on etäisyydellä L liekistä olevalle kohteelle tulevan lämpörasituksen suuruus?"
- Järjestelmää kuvaavien peruslainalaisuuksien muotoilu, mikä tässä esimerkissä on energian säilymisen laki lausuttuna palon kokonaistehon ja eri lämmönsiirto-mekanismien välityksellä siirtyvien tehokomponenttien yhtä suuruutena (kuva 2b).
- Mallinnetaan ongelman kannalta olennainen tehokomponentti eli säteilemällä siirtyvä teho \dot{Q}_r arvioimalla sen olevan vakio-osuus kokonaistehosta \dot{Q} eli $\dot{Q}_r = \chi_r \cdot \dot{Q}$ ¹ (kuva 2c).

¹ Yläpisteen käyttö juontuu luonnontieteissä yleisestä käytännöstä, jossa ajan mukana muuttuvia suureita, kuten teho, merkitään käyttäen Newtonin aikaderivaatan merkintätapaa symbolin yläpuolella olevalla pisteellä

- Mallintamisessa joudutaan useimmiten tekemään tilannetta idealisoivia oletuksia: tässä tehdään oletus, että liekkiä voidaan käsitellä pistemäisenä säteilylähteenä sekä kohdetta pistemäisenä kohteena (kuva 2d).
- Idealisoituihin käsitteisiin siirrytään useimmiten siksi, että tällöin ongelman matemaattinen ratkaisu yksinkertaistuu huomattavasti. Tässä tapauksessa pistelähdeoletus johtaa suoraan ongelman ratkaisuun: koska kaiken pistemäisen lähteen lähettämän tehon täytyy kulkea ko. piste keskipisteenä piirretyn pallonpinnan, säde R ja pinta-ala $4\pi R^2$, lävitse, on kyseisen pallonpinnan yksikköpinta-alan läpi kulkevan säteilytehon määrä² siis $\dot{q}_r'' = \dot{Q}_r / (4\pi R^2) = \chi_r \dot{Q} / (4\pi R^2)$ (kuva 2e).
- Lopulta on syytä miettiä, ottaako malli huomioon kaikki tilanteessa vaikuttavat olennaiset tekijät. Näin ei ilmeisesti ole, koska tuulen vaikutus puuttuu. Tuulen vaikutusta voidaan mallintaa yksinkertaisesti olettamalla tuulen kallistavan liekkiä tuulen suunnassa määrällä, joka riippuu palopatsaan tyypillisen virtausnopeuden ja tuulen nopeuden u_w aiheuttamien voimien suhteesta (kuva 2f). Liekin kallistuminen kulmalla ϕ puolestaan voidaan kuvata lyhentävän liekin ja kohteen etäisyyttä määrällä $(H/2) \cdot \sin\phi$. Kokeellisesti on havaittu, että liekin kallistuskulmalle pätee lauseke $\phi \approx \arccos(1/\sqrt{u})$, jossa u_w :n yksikkö on m/s^3 . Tämä lauseke pätee, kun $u_w > 1 \text{ m/s}$. Kun $u_w \leq 1 \text{ m/s}$, liekki ei kallistu ($\phi = 0$).

Lopputuloksena on siis saatu malli, joka yhdistää matemaattisesti palon voimakkuuden, joka ilmaistaan sen luovuttamana kokonaistehona (eli palotehona) \dot{Q} ja liekkien keskiakselilta mitatun etäisyyden L päässä olevalle kohteelle tulevan lämpörasituksen \dot{q}_r'' (lämpövuon)⁴:

$$\dot{q}_r'' = \begin{cases} \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi \left[\left(L - (H/2) \sin(\arccos(1/\sqrt{u_w})) \right)^2 + (H/2)^2 \right]}, & u_w > 1 \text{ m/s} \\ \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi [L^2 + (H/2)^2]}, & u_w \leq 1 \text{ m/s} \end{cases}, \quad (1)$$

missä u_w on liekkiin vaikuttavan tuulen nopeus (yksikkönä m/s).

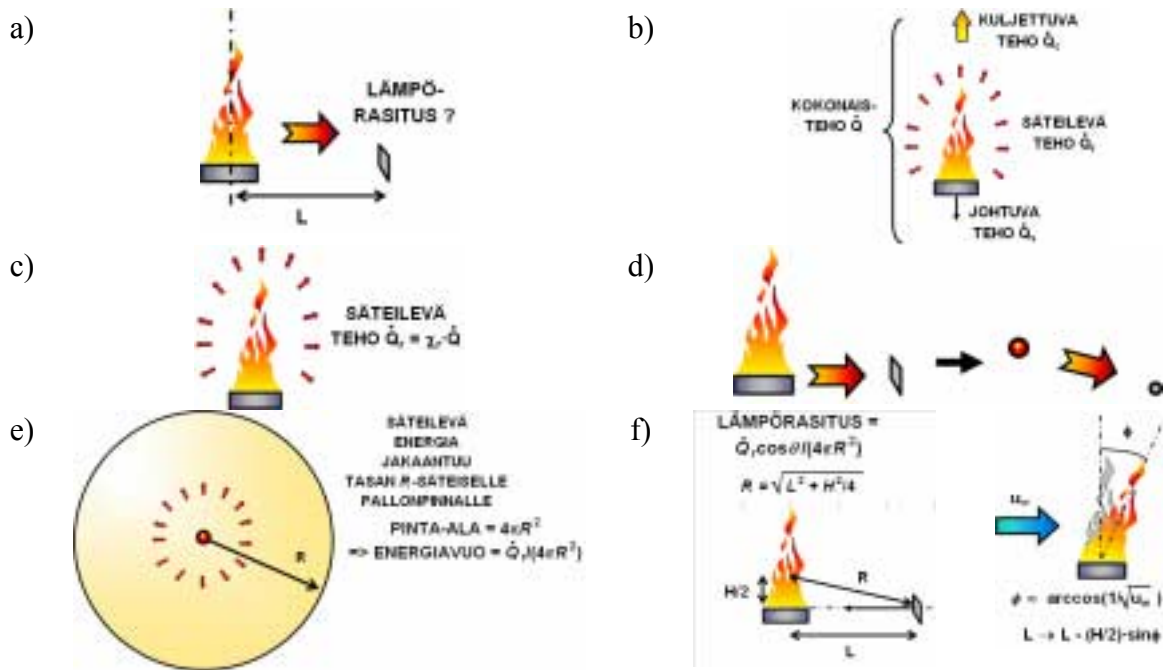
Mallin käyttäminen

Kun mallia sovelletaan käytännössä, on soveltajan selvitettävä, miten suuri paloteho \dot{Q} on, miten suuri osuus χ_r siitä siirtyy säteilemällä ja mikä on liekkien korkeus H sekä mitä tuulen nopeuden arvoa tulee soveltaa. Määrittelemme tarkasteltavan tilanteen seuraavasti: kyse on tarkemmin määrittelemättömän nestemäisen hiilivetypolttoaineen säiliön (halkaisija $D = 20 \text{ m}$ ja tilavuus 2000 m^3) paloon liittyvien vaarojen määrittämisestä alueella, jossa keskimääräinen tuulen nopeus on 3 m/s . Tuulen nopeuden tilastollinen jakauma on Weibull-jakauma, jonka muotoparametri on 2 [1].

² Tämän suhteellisen monimutkaisen merkintätavat perustelut ovat, että yläpiste kuvaa ajan mukana muuttuvaa suuretta ja yläviitteenä oleva kaksoispilkku symboloi suuretta, joka lasketaan pinta-alayksikköä kohden.

³ Tämä yksinkertainen lauseke ei ole yleispätevä, vaan se soveltuu tässä esimerkissä tarkasteltavaan tilanteeseen.

⁴ Tässä kaavassa otetaan joskus mukaan myös säteilyn suunta kohteen suuntaan nähden, mikä kohteesta riippuen saattaa pienentää lämpövuon arvoa. Tässä johdettu malli on kuitenkin riittävä tämän esityksen tarkoituksiin.



Kuva 2. Ulkona tai hyvin suuressa tilassa tapahtuvan tulipalon ympäristöönsä aiheuttaman lämpörasituksen laskentamallin johtamisen askeleet: a) ongelman asettelu, b) energian säilymisen lain soveltaminen, c) ja d) yksinkertaistavien oletusten teko (oletus, että säteilemällä siirtyvän tehon määrän on suoraan verrannollinen kokonaistehoon (c) ja oletus, että liekin lähettämän säteilyn kannalta liekkiä ja kohdetta voidaan pitää pistemäisinä (d)), e) toinen säilymlain sovellus (kaiken tehon, joka lähtee pistemäiseksi oletetusta säteilijästä tulee kulkea ko. piste keskipisteenä piirretyn pallon pinnan lävitse) ja f) mallin parantaminen luopumalla osittain liekin kuvaamisesta ideaalisena pistemäisenä säteilijänä ja ottamalla huomioon tuulen vaikutus.

Palotehoa voidaan arvioida säiliön pinnan pinta-alan $A_p = \frac{1}{4} \pi D^2$, pinta-alayksikköä kohden tapahtuvan massankulutusnopeuden \dot{m}''^5 [2] ja yhtä palanutta massayksikköä kohden vapautuvan energiamäärän $\Delta H_{c,eff}$ (polttoaineen tehollinen lämpöarvo) perusteella:

$$\dot{Q} = \Delta H_{c,eff} \cdot \dot{m}'' \cdot A_p. \quad (2)$$

Tehollinen lämpöarvo saadaan lämpöarvosta kestopalla se palamisen tehokkuudella, johon vaikuttavat tekijät voidaan Tewarsonin [3] mukaan jakaa polttoaineesta ja hapen määrästä riippuviin tekijöihin: edellinen tekijä on hiilivedyille tyypillisesti 85 %-90 % [3] ja jälkimmäisen tekijän arvo vaihtelee välillä 90 %-100 % [3], joten palamisen tehokkuus vaihtelee siis välillä 77 %-90 %. Esimerkkitapaukselle relevantteja tyypillisten hiilivetytypolttoaineiden palamis-ominaisuuksia esitetään taulukossa 1. Esitettyjä keskimääräisiä arvoja käyttäen palotehoksi saadaan 514 MW. Palotehon variaatiokertoimeksi (keskihajonnan suhde keskiarvoon) saadaan siihen vaikuttavien suureiden hajontojen perusteella 10 %. Sen tilastollinen malli on sama kuin sen tekijöiden eli normaalijakauma.

⁵ Edellä tehosuureisiin liittyviä merkintöjä koskevien huomautuksien perusteella tässä yksikköpinta-alaa kohden tapahtuvalle massan (symboli m) kulutukselle käytetty merkintä on yksiselitteinen ja havainnollinen.

Taulukko 1. Hiilivetypolttoaineiden palamisominaisuuksia.

Polttoaine	tiheys (kg/m ³)	tehollinen lämpöarvo $\Delta H_{c,eff}$ (MJ/kg) (palamisen tehokkuus 0,72-0,81)	massan kulutusnopeus yksikköpinta-alaa kohden \dot{m}'' (kgm ⁻² -s ⁻¹)
moottoribensiini [2]	740	34-39	0,055 ($\pm 0,002$) ^{a)}
keroseeni [2]	820	33-39	0,039 ($\pm 0,003$)
polttoöljy [2]	940-1000	31-36	0,035 ($\pm 0,003$)
raakaöljy [2]	830-880	33-38	0,022-0,045 ^{b)}
dieselöljy	825 [4]	34-39 [4]	0,067 [5] ^{c)}
keskimääräinen arvo ^{d)}	820 (120)	35,6 (3,2)	0,046 (0,0015)

a) Viitteessä [2] ei ilmaista, mitä \pm :lla merkitty epävarmuus tarkoittaa; tässä esityksessä oletamme sen vastaavan normaalijakautuneeksi oletetun suureen keskihajontaa.

b) Tässä oletamme esitetyn epävarmuuden vastaavan suureen pienintä ja suurinta raportoitua arvoa, jotka tulkitsemme edelleen normaalijakauman 1 %:n ja 99 %:n fraktiileiksi, jolloin ko. normaalijakauman keskiarvo on 0,034 kgm⁻²s⁻¹ ja keskihajonta on 0,005 kgm⁻²s⁻¹.

c) Hajonta oletettu yhtä suureksi yllä \pm :lla merkittyjen suureiden suhteellisten hajonta-arvojen keskiarvo eli 4 %.

d) Suluissa oleva hajonta vastaa normaalijakautuneeksi oletetun suureen keskihajontaa.

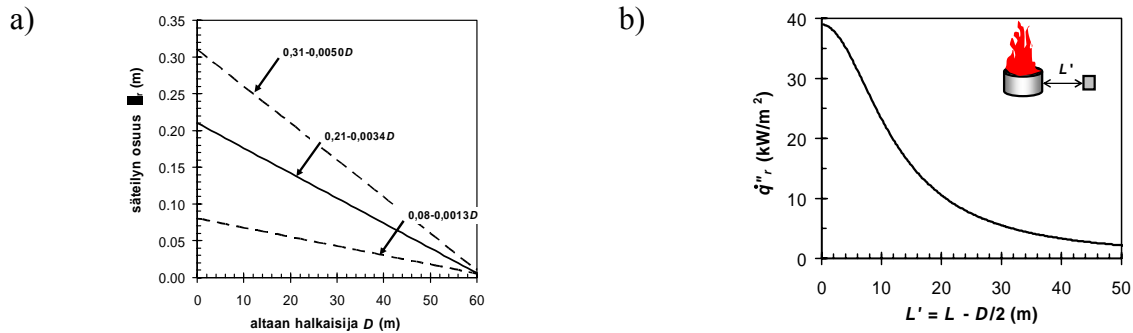
Säteilyn välityksellä siirtyvän tehon osuus χ_r voidaan laskea perustuen kuvassa 3a esitettyyn χ_r :n riippuvuuteen altaan halkaisijasta D . Halkaisijaltaan 20 m:n suuruiselle altaalle χ_r :n keskiarvo on 14,2 % ja sen kuvasta 3a luettavissa oleva vaihteluväli on 5,5 %-21,0 %. Oletamme näiden vaihteluvälin ääriarvojen vastaavan hyvin harvinaisia tapauksia, mikä määrällisesti ilmaistuna vastaa sitä, että kyseiset arvot ovat suureen jakauman 0,1 %:n ja 99,5 %:n fraktiileja. Tällöin 20 m:n halkaisijan omaavalle altaalle χ_r :n voidaan tulkita olevan normaalijakautunut suure, jonka keskiarvo on 14,2 % ja keskihajonta 2,5 %.

Kolmas suure, jolle pitää määrittää arvo ennen kuin malliamme voidaan soveltaa, on liekin korkeus H , voidaan laskea käyttäen seuraavaa Heskestadin esittämää kaavaa [6]:

$$H = 15,6 \cdot \left[\frac{C_p T_\infty}{g \rho_\infty^2 (\Delta H_c / s)^3} \right]^{1/5} \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \cdot D, \quad (3)$$

missä T_∞ on ympäristön lämpötila, $C_p \approx 1,01 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ja ρ_∞ ovat ilman ominaislämpö ja tiheys lämpötilassa T_∞ sekä $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ on putoamiskiihtyvyyys. Palavan aineen lämpöarvon ΔH_c ja palamisessa kuluvan ilman ja polttoaineen massojen suhteen s suhde $\Delta H_c/s$ vaihtelee välillä 2,9-3,2 MJ/kg [6]. Kun oletetaan, että tarkastelu koskee aikaa, jolloin lämpötilana voidaan pitää 20 °C (293 K, $\rho_\infty = 1,2 \text{ kgm}^{-3}$), palotehotermin kertoja on 0,226-0,240 $\text{mkW}^{-2/5}$. Sen jakaumana voidaan pitää tasajakaumaa, jonka keskiarvo on 0,233 $\text{m}\cdot\text{kW}^{-2/5}$. Tällöin liekin korkeus on keskimäärin $H = 24,4 \text{ m}$. Sen jakauma on normaali ja keskihajonta on 2 m.

Mallimme tulos tarkastellun halkaisijaltaan 20 m:n suuruisen altaan ympäristöönsä tuottamalle lämpörasitukselle tietyllä etäisyydellä altaan reunasta esitetään kuvassa 3b.

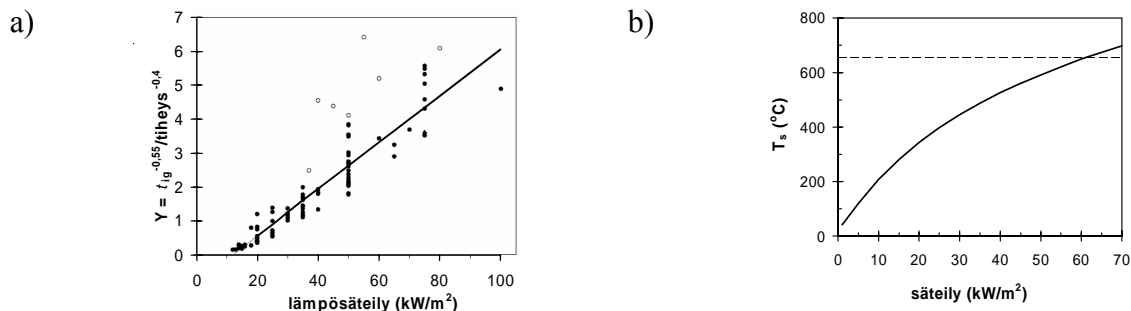


Kuva 3. a) Säteilyn välityksellä siirtyvän tehon riippuvuus altaan halkaisijasta D [7]. Katkoiviivalla esitetyt epävarmuuden arviointiin käytetyt suorat ovat kirjoittajien laatimia. b) Palavan polttoaineen aiheuttaman lämpörasituksen voimakkuuden riippuvuus etäisyydestä $L' = L - D/2$ säiliön reunasta tarkastellussa tilanteessa (lopputulos).

Mallin soveltaminen tulipalon aiheuttamien vaarojen arviointiin

Tulipalon mallintamisen päämäärä on useimmiten tulipalon aiheuttamien vaarojen arvioimiseen ennakolta. Nyt käsillä olevassa säiliön palon liittyvässä esimerkissämme paloon liittyviä uhkia voi olla monenlaisia, esimerkiksi seuraavia:

- Palon leviäminen sen ympäristössä olevien materiaalien syttymisen vuoksi, jonka estämiseksi pitää tuntea lyhin etäisyys altaasta, jonka sisällä ei palonleviämisvaaran vuoksi saa olla syttyviä materiaaleja eli materiaalien turvaetäisyys?
- Toinen käytännössä esille tuleva kysymys voi olla, että miten altaan tulipalo vaikuttaa sen välittömässä läheisyydessä mahdollisesti olevien rakenteiden kestävyteen ja pitääkö niiden palonkestävyyttä tästä syystä mahdollisesti parantaa.



Kuva 4. a) Puun syttymisen kriittisen lämpövuon arviointiin viitteessä [8] käytetty aineisto. b) teräspilarin lämpötilan riippuvuus siihen kohdistuvasta lämpövuosta ($\eta = 37,5\%$).

Me tarkastelemme näitä kysymyksiä lyhyesti yksinkertaisten esimerkkien kautta. Materiaalien syttymisongelman oletetaan olevan puupintojen syttyminen, jota voidaan arvioida käyttämällä lämpövuokriteeriota, jonka mukaan syttyminen katsotaan mahdolliseksi, jos lämpövuio ylittää tietyn raja-arvon \dot{q}''_{cr} . Babrauskasin [8] tekemän katsauksen mukaan $\dot{q}''_{cr} = 11 \text{ kW/m}^2$ ja kuvassa 4a esitettyjen tietojen perusteella epävarmuus \dot{q}''_{cr} :n määrittämisessä on noin 30 % (variaatiokerroin). Arvoa 11 kW/m^2 vastaava kriittinen etäisyys on 19 m säiliön kyljestä. Tätä arvoa ei voida suoraan käyttää turvaetäisyytenä, vaan siihen pitää lisätä varmuus-marginaali, jotta voidaan olla varmoja siitä, että syttymisiä ei tapahdu. Paremman tiedon puutteessa usein

käytetty turvallisuusmarginaali on 100 % eli lopullinen arviomme turvaetäisyydestä on 40 m. Tämä vastaa pinta-alaltaan noin 5000 m²:n suuruista ympyrää, joka esim. teollisuusalueella on varsin suuri (ja kallis) tilantarve.

Rakenteiden kuumenemisiongelmassa tarkastelemme teräspilareita, joiden kestävyyttä arvioidaan sen mukaan ylittää teräksen lämpötila T_s kriittisen lämpötilan. Olkoon pilareiden kuormitusaste $\mu = 20\%$, jolloin kriittinen lämpötila on normin B7 mukaan $T_{cr} = 20\text{ °C} + (580\text{ °C}) \cdot [-\ln \mu / 1,3]^{1/2,3} = 655\text{ °C}$. Kriittisen lämpötilan epävarmuutta voidaan arvioida esim. seuraavasti: jos teräs on 355-laatua, niin JCCS:n todennäköisyysperustaisen mallinormin [9] mukaan myötöraja on logaritmisesti normaalijakautunut suure, jonka odotusarvo on 390 MPa ja variaatiokerroin 7 %. Tällöin 20 %:n kuormitusastetta voidaan tulkita vastaavan rakenteen jännityksen, jonka odotusarvo on 76 MPa ja variaatiokerroin 7 % ja vastaavaksi kriittisen lämpötilan jakaumaksi saadaan logaritminen normaalijakauma, jonka odotusarvo on 655 °C ja variaatiokerroin 1,8 %. Teräksen kuumenemisen kannalta on olennaista tulipalon ajallinen kesto, joka täyden säiliön palaessa on 31 tuntia. Näin pitkään jatkuvassa palossa teräs saavuttaa tasapainolämpötilansa ja lämpötilan T_s riippuvuus säteilystä voidaan määrittää ratkaisemalla ajasta riippumaton yhtälö

$$\eta \cdot \dot{q}_r'' - (1 - \eta)h(T_s - T_\infty) - (1 - \eta)\epsilon_r \sigma(T_s^4 - T_\infty^4) = 0, \quad (4)$$

missä lämmönsiirtokerroin $h = 25\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, resultoiva emissiviteetti $\epsilon_r \approx 0,5$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ja tekijä $\eta = 25\% - 50\%$ (tasajakauma) on säteilylle altistuvan pinta-alan suhde kokonaispinta-alaan (4b). Kriittistä lämpötilaa vastaava lämpövuon arvo on noin 60 kW/m², mutta kuvasta 3b nähdään, että lämpövuon on säiliön reunallakin on tätä alempi (noin 40 kW/m²), joten teräsrakenteet voidaan toteuttaa suojaamattomina aivan säiliön välittömässä läheisyydessäkin eli niille lämpösäteilyn vaikutukseen liittyvä turvaetäisyys on 0 m.

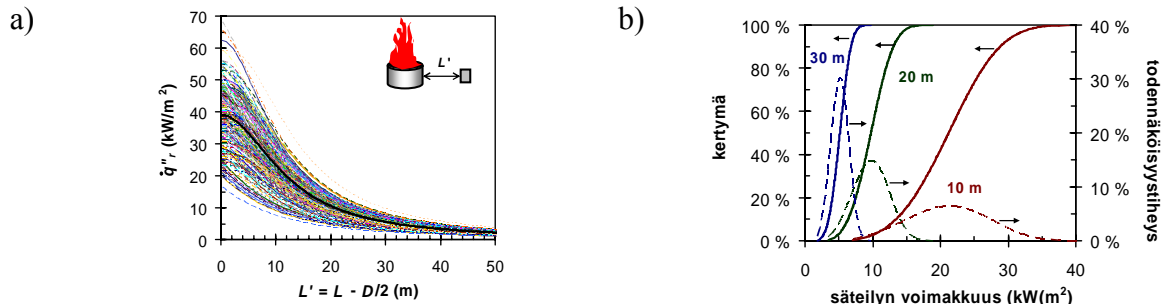
Deterministisestä mallista stokastiseen malliin

Edellä esitetty mallintaminen ja laskenta on determinististä, jota kuvaa se, että laskenta suoritetaan käyttäen kullekin suurelle jotain tiettyä arvoa. Kuten edellä kävi esille, eri suureiden hajonnat ovat varsin suuria ja siksi tyypillisen arvon valinta ei ole helppoa. Lisäksi saadun tuloksen turvallisuudesta ei ole määrällistä tietoa, mikä voidaan joutua kompensoimaan valitsemalla suhteellisen suuri turvamarginaali.

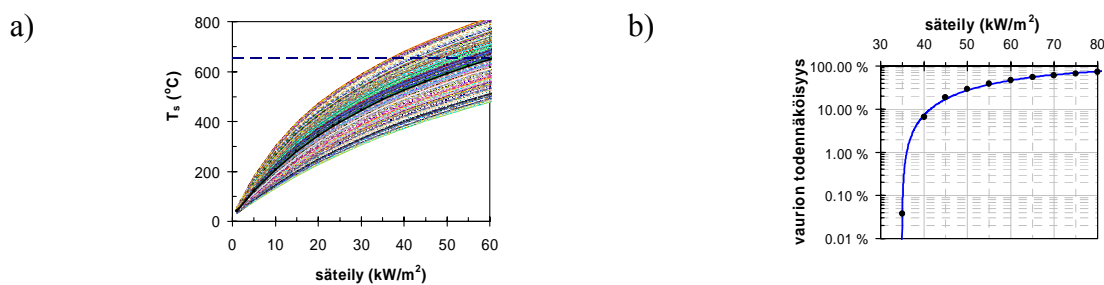
Stokastisessa mallintamisessa käytetään suureiden jakaumaa, jolloin tyypillisen arvon valintaongelma poistuu ja lisäksi mallista saadaan määrällinen arvio eri tuloksiin liittyvistä vahinkotodennäköisyyksistä. Stokastisen mallintamisen tarpeita silmälläpitäen edellä olevassa esityksessä on arvioitu eri suureiden keskimääräisen arvon lisäksi hajonta (hajonnan määrä ja laatu eli suureen jakauma). Kun mallin (1) laskenta toistetaan useita kertoja eri parametrien jakaumista satunnaisotoksilla valituilla arvoilla, saadaan lämpörasituksen voimakkuudelle kuvassa 5a esitetty tulos. Nyt tuloksena ei saada yhtä käyrää, vaan niin monta käyrää kuin satunnaisotoksia suoritetaan (tässä 1000 kpl). Tietyllä etäisyydellä lämpörasitusta ei kuvaa yksi arvo, vaan jakauma, niin kuin kuvassa 5b esitetään: esim. 10 m:n etäisyydellä lämpörasitus vaihtelle välillä 7-35 kW/m² (0,5 %:n ja 99,5 %:n fraktiilit).

Stokastisessa mallintamisessa myös palovaarojen arviointi tehdään jakaumien pohjalta. Puun syttymisen kannalta kriittisen lämpörasituksen jakaumaksi saatiin normaalijakauma (keskiarvo 11 kW/m² ja -hajonta 3,3 kW/m²). Kun tämä tieto yhdistetään kuvassa 5

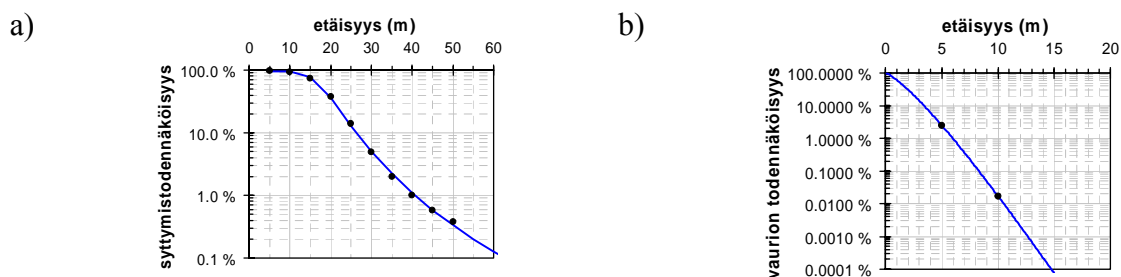
esitettyihin lämpörasituksen jakaumiin, saadaan kuvassa 7a esitetty tulos syttymis-
todennäköisyyden riippuvuudelle etäisyydestä säiliön reunasta. Teräspilarien vaurioitumis-
todennäköisyyden laskennassa määritetään ensin lämpötilan T_s riippuvuus lämpösäteilyn
voimakkuudesta (kuva 6a), jonka perusteella voidaan määrittää vaurioitumistodennäköisyyden
riippuvuus lämpösäteilyn voimakkuudesta (kuva 6b), mikä antaa kuvassa 7b esitetyn tuloksen.



Kuva 5. a) Stokastisen mallin tulos palavan polttoaineen aiheuttaman lämpörasituksen
voimakkuuden riippuvuudelle etäisyydestä $L' = L - D/2$ säiliön reunasta. b) Lämpörasituksen
voimakkuuden todennäköisyysjakaumia eri etäisyyksillä.



Kuva 6. a) Teräksen lämpötilan stokastinen riippuvuus lämpösäteilyn voimakkuudesta ja
b) vaurioitumistodennäköisyyden riippuvuus lämpösäteilyn voimakkuudesta.



Kuva 7. Stokastisen mallintamisen tulokset: a) puun syttymistodennäköisyyden ja b)
teräspilarien vaurioitumistodennäköisyyden riippuvuus etäisyydestä säiliön reunasta.
Todennäköisyydet ovat yhtä tulipaloa kohden.

Teollisuuslaitoksessa tässä työssä tarkasteltujen palojen seuraamukset ovat tyypillisesti
rahallisia, eivät henkilövahinkoja, jolloin turvaetäisyyden määrittäminen on päätöksenteko-
ongelma, jossa toisaalta halutaan minimoida palovahingot (puoltaa pitkän turvaetäisyyden
valintaa) ja toisaalta rajoittaa maankäytön kustannuksia (puoltaa lyhyen turvaetäisyyden
valintaa). Kun kuvassa 7 esitettyjen tulosten lisäksi on käytettävissä arvio säiliöpalon

esiintymistaajuudesta, noin 1 per 1000 säiliötä per vuosi [10, s. 4-16]. Jos laitoksella on yksi säiliö, niin kuvan 7 tulokset saadaan muunnettua vuotuisiksi todennäköisyyksiksi jakamalla ne tuhannella. Jos hyväksyttävissä olevana vuotuisena vauriotodennäköisyytenä pidetään enintään arvoa 1 per 10 000, niin kuvan 7 esittämien todennäköisyyksien suurin hyväksyttävissä oleva taso on 10 %. Tätä arvoa vastaavat turvaetäisyydet (sopivasti pyöristettynä) ovat syttymisvaaran suhteen 25 m ja teräsrakenteiden kantavuuden takaamisen suhteen 5 m. Havaitaan siis, että syttymisvaaran suhteen stokastinen mallintaminen pienensi turvaetäisyyttä 40 m:stä 25 m:iin (pinta-alasäästö 60 %) kun taas teräsrakenteiden turvallisuuden suhteen deterministisen mallin antama säteilyyn liittyvä turvaetäisyys kasvoi 5 metriksi.

YHTEENVETO

Esitelmässä luodaan katsaus mallintamisen sovelluksiin palotekniikan alalla ja esitetään seikkaperäisesti erään yksinkertaisen, mutta silti varsin käyttökelpoisen paloteknisen mallin perustelu ja soveltaminen käyttäen sekä determinististä että stokastista lähestymistapaa.

LÄHDELUETTELO

1. Tammelin, B. Suomen Tuuliatlas. Helsinki: Ilmatieteen laitos. 1991. 355 s.
2. Babrauskas, V. Heat Release Rates. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2002. S. 3-1 – 3-37. ISBN 087765-451-4.
3. Tewarson, A. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2002. S. 3-82 – 3-161. ISBN 087765-451-4.
4. Petroleum-Based Fuels Property Database [verkkodokumentti]. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory. [Viitattu 23.5.2005]. Saatavissa: http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-properties-9_839qframed.html
5. McGrattan, K. B.; Baum, H. R.; Walton, W. D.; Trelles, J. J. 1997. Smoke Plume Trajectory From In Situ Burning of Crude Oil in Alaska: Field Experiments and Modeling of Complex Terrain. 137 s. (NISTIR 5958)
6. Heskestad, G. Fire Plumes, Flame Height and Air Entrainment. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2002. S. 2-1 – 2-17. ISBN 087765-451-4.
7. Beyler, C. L. Fire hazard calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires. Teoksessa: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2002. S. 3-268 – 3-314. ISBN 087765-451-4.
8. Babrauskas, V., Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Teoksessa: Interflam 2001. Lontoo: Interscience Communications Ltd. 2001. S. 71-88
9. Joint Committee on Structural Safety. Probabilistic Model Code. Internet Publication 2001. [verkkodokumentti, viitattu 23.5.2005]. Saatavissa: <http://www.jcss.ethz.ch/>
10. Barry, T. F. Risk-Informed, Performance-Based Industrial Fire Protection. Knoxville, Tennessee: Tennessee Valley Publishing. 2002. ISBN 1-882194-09-8