

# PALOSUOJATTUJEN PUUTUOTTEIDEN PALOKÄYTTÄYTYMISEN ARVIOINTI

Tuula Hakkarainen ja Esko Mikkola  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
PL 1803, 02044 VTT

## Tiivistelmä

Palo-ominaisuuksia parantamalla on mahdollista kehittää puutuotteita, jotka täyttävät varsin tiukkojakin paloturvallisuusvaatimuksia ja siten entisestään laajentaa puun käyttöä rakentamisessa. Tällaisten puutuotteiden tuotekehityksen avuksi on valmisteilla arviointityökalu, johon on koottu tietoa puun eri ominaisuuksien vaikutuksista palokäyttämiseen ja mahdollisuuksista parantaa tuotteen paloluokitusta. Työkaluun kehitetään myös yksinkertaiset nyrkkisäännöt, joiden perusteella voidaan arvioida puutuotteen eurooppalainen pintakerrosluokitus pienen mittakaavan palokokeen tuloksista. Tarkempaa mallinnusta varten on käytettävissä palosuojatuille puutuotteille optimoitu matemaattinen malli, jolla voidaan ennustaa tuotteen lämmöntuottokäyrä SBI-kokeessa.

## JOHDANTO

Luonnollisten palo-ominaisuuksiensa vuoksi puu ei sovellu kaikkiin rakentamisen käyttökohteisiin. Puupohjaiset tuotteet, joiden palo-ominaisuuksia on parannettu, voivat kuitenkin täyttää varsin tiukkojakin paloturvallisuusvaatimuksia. Palo-ominaisuuksia parantamalla voidaan puun käyttöä rakennusmateriaalina entisestään laajentaa.

Palo-ominaisuuksiltaan parannettujen puutuotteiden tuotekehityksen avuksi on kehitteillä arviointityökalu. Arvioinnin lähtökohtana ovat puun palokäyttämiseen vaikuttavat materiaaliominaisuudet mukaan lukien tutkittavan tuotteen pinnan ominaisuudet. Työkalulla voidaan arvioida tuotteen eri ominaisuuksien vaikutusta palokäyttämiseen ja niihin liittyviä mahdollisuuksia parantaa tuotteen luokitusta. Suurin osa arviointityökalun sisältämästä tiedosta on yleisesti saatavilla kirjallisuudesta, mutta nyt tieto kootaan helppokäyttöiseksi kokonaisuudeksi. Työkalu helpottaa siten palo-ominaisuuksiltaan parannettujen puutuotteiden suunnittelu- ja kehitystyötä, kun tavoitteena on tuotteen loppukäytön mukaisten vaatimusten täyttäminen eri sovellutuksissa.

Eurooppalaisen pintakerrosten paloluokitusjärjestelmän keskeisin testimenetelmä palaville tuotteille on ns. SBI-koe [1]. Tuotekehitykseen soveltuu kuitenkin hyvin ns. kartiokalorimetrikoe [2]. Kartiokalorimetrikokeen näytekoke on vain  $0,01 \text{ m}^2$ , kun taas SBI-kokeeseen tarvitaan yli  $2 \text{ m}^2$  testattavaa tuotetta. Monissa tapauksissa SBI-kokeen tulosta voidaan ennakoida kartiokalorimetrikokeen tulosten perusteella. Osaksi edellä mainittua arviointityökalua kehitetään linkki kartiokalorimetri- ja SBI-kokeiden välille. Yksinkertaisten nyrkkisääntöjen perusteella voidaan kartiokalorimetrikokeen tuloksista arvioida tuotteen SBI-kokeeseen perustuva Euroluokka.

Toinen vaihtoehto palosuojattujen puutuotteiden Euroluokan ennustamiseen kartiokalorimetrikokeen pohjalta on yksiulotteinen terminen liekinleviämismalli, joka

esiteltiin Palotutkimuksen päivillä 2001 [3]. Nyt tämän mallin syöttöparametrit on optimoitu erityisesti palosuojatuille puutuotteille, mikä parantaa luokitusennusteiden luotettavuutta. Mallia käyttäen saadaan tuotteiden käyttäytymisestä SBI-kokeessa tarkempia ennusteita kuin arviointityökalun ”varman päälle” asetettujen sääntöjen perusteella. Käytännön työssä luokitusennusteet perustuvat sekä mallinnukseen että asiantuntija-arvioon kartiokalorimetritulosten ominaispiirteistä.

## ARVIINTITYÖKALUN SISÄLTÖ

Arviointityökalu sisältää tietoa puun palo-ominaisuuksista, niihin vaikuttavista materiaali-ominaisuuksista, keinoista parantaa puun palokäyttäytymistä sekä puutuotteiden kannalta keskeisistä palokoemenetelmistä. Aineistot eri aihepiireistä linkitetään toisiinsa siten, että käyttäjä voi helposti edetä työkalussa tarkoituksenmukaisella tavalla. Tarkasteltuja aihepiirejä luetellaan taulukossa 1.

*Taulukko 1. Arviointityökalun aihepiirejä.*

<b>Materiaaliominaisuuksia</b>				
tiheys	paksuus	kosteus	ominaislämpökapasiteetti	lämmönjohtavuus
<b>Palo-ominaisuuksia</b>				
syttyvyys	lämmöntuotto ja palon leviäminen	savuntuotto ja myrkyllisyys	efektiivinen palamislämpö	hiiltymisnopeus
<b>Keinoja puun palo-ominaisuuksien parantamiseksi</b>				
pyrolyysireaktion muuttaminen	pinnan suojaaminen	termisten ominaisuuksien muuttaminen	palamisen ketjureaktioiden esto	pyrolyysikaasujen laimentaminen
<b>Palokoemenetelmiä</b>				
kartiokalorimetri (ISO 5660-1)	SBI-koe (EN 13823)	pienen liekin testi (EN ISO 11925-2)	säteilypaneelitestit (EN ISO 9239-1)	
<b>Muuta</b>				
kerrosrakente: pinnoitteet, pinta, rajapinnat, sisäkerrokset	kokonaisrakente: tausta (ilmarako, eriste jne.)	pitkäaikaiskestävyys		

Arviointityökalun sisällön havainnollistamiseksi esitetään seuraavassa lyhennelmät muutamista arviointityökalun aihepiirien aineistoista.

## Materiaaliominaisuudet: tiheys

### Termisesti paksut näytteet

Termisesti paksujen näytteiden syttymisaika  $t_{ig}$  on ainakin suoraan verrannollinen puun tiheyteen  $\rho$ , kuten nähdään yhtälöstä 1, jossa  $c$  ja  $k$  ovat puun ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus,  $T_{ig}$  ja  $T_0$  ovat syttymislämpötila ja ympäristön lämpötila ja  $\dot{q}_{net}''$  on pintaan kohdistuva säteilyvuon tiheyden nettoarvo [4, 5].

$$t_{ig} = \frac{\pi}{4} \rho c k \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{\dot{q}_{net}''^2} \quad (1)$$

Tämän lisäksi lämmönjohtavuus  $k$  riippuu tiheydestä seuraavasti [6]:

$$k = [a + 2\rho(1 + 2w)] \cdot 10^{-4} \text{ W/mK} \quad (2)$$

jossa  $w = (m - m_0)/m_0$  on puun kosteus ( $m$  on näytteen massa ja  $m_0$  on kuivan näytteen massa) ja  $a$  on puulajille tai -tuotteelle ominainen vakio.  $a$ :n arvo vaihtelee yleensä välillä 200–400 ja on keskimäärin 237. Yhtälö 2 pätee, kun tiheys on 300–800 kg/m<sup>3</sup>.

Yhtälön 1 muut suureet voidaan olettaa tiheydestä riippumattomiksi. Näin ollen

$$t_{ig} \propto \rho(2\rho + a) \approx 2\rho(\rho + 120) \quad (3)$$

kun käytetään keskimääräistä  $a$ :n arvoa 237. Termisesti paksun näytteen syttymisaika siis kasvaa voimakkaasti tiheyden kasvaessa.

### Termisesti ohuet näytteet

Termisesti ohuiden näytteiden syttymisaika  $t_{ig}$  on suoraan verrannollinen puun tiheyteen  $\rho$  kuten nähdään yhtälöstä

$$t_{ig} = \rho c L_0 \frac{(T_{ig} - T_0)}{\dot{q}_{net}''} \quad (4)$$

jossa  $L_0$  on näytteen paksuus. Muut suureet tässä yhtälössä voidaan olettaa tiheydestä riippumattomiksi. Termisesti ohuen näytteen syttymisajan riippuvuus tiheydestä on siten yksinkertaisesti

$$t_{ig} \propto \rho \quad (5)$$

## Palo-ominaisuudet: syttyvyys

Eripaksuisten puutuotteiden syttyminen riippuu niiden termisestä paksuudesta. Termisesti ohut näyte syttyy nopeammin kuin termisesti paksu materiaali. Kun termisesti ohut tuote altistuu lämmölle yhdeltä puolelta, vastakkainen puoli lämpenee hyvin lähelle altistuvan puolen lämpötilaa syttymisaikaan mennessä. Termisesti paksun tuotteen vastakkainen puoli ei juuri lämpene vaan on ympäristön lämpötilassa näytteen syttyessä.

Syttymisajan riippuvuus materiaaliominaisuuksista näytteen altistuessa säteilylle selviää yhtälöstä 1 termisesti paksuille näytteille ja yhtälöstä 4 termisesti ohuille näytteille. Puutuote voidaan olettaa termisesti ohueksi, jos sen paksuus ei ylitä muutamaa millimetriä ja termisesti paksuksi, jos sen paksuus on vähintään 10 mm, kun tarkastellaan tavanomaisten palotestien tyypillisiä syttymisaikoja.

Puumateriaalien ja -tuotteiden syttyvyyteen vaikuttavat ainakin tiheys, ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, kosteus, pinnan absorptiivisuus ja emissiivisyys, diatermisuus, paksuus, puun syiden suunta ja pinnoitteet sekä näytteeseen kohdistuva säteily ja muut koeolosuhteet [7]. Monet materiaaliominaisuuksista ovat riippuvaisia toisistaan.

## **Keinot puun palo-ominaisuuksien parantamiseksi: pyrolyysireaktion muuttaminen**

Puun pyrolyysiin vaikuttaminen on tunnetuin ja eniten käytetty puun palosuojauskeino yksinkertaisuutensa ja halpuutensa vuoksi. Olosuhteista riippuen puun pyrolyysi voi edetä pääasiassa kahdella eri tavalla: tervaa tai hiiltä muodostaen. ”Normaaliin” palamiseen liittyvässä reaktiotavassa pyrolyysi tuottaa paljon levoglukosaania sisältävää tervaa, joka lämmön vaikutuksesta hajoaa helposti palaviksi kaasuiksi. Puun pyrolyysiin vaikuttavassa palosuojauksessa puutuote käsitellään aineella, joka edistää selluloosan pyrolyysin tapahtumista pääasiassa hiilen muodostumiseen johtavaa reaktiopolkua pitkin. Ideaalisesti reaktiot etenisivät siten, että selluloosa hajoaisi vain hiileksi ja vedeksi:



Käytännössä tähän toimintaperiaatteeseen perustuvat aineet vähentävät palavien pyrolyysituotteiden määrää ja siten vähentävät tuotteesta vapautuvaa lämpöä.

Puun pyrolyysiin vaikuttavat aineet ovat tyypillisesti fosfori- tai booriyhdisteitä. Aineet lisätään yleensä esimerkiksi ammoniumsuloiloina, jotka lämmitettäessä hajoavat tuottaen fosfori- tai boorihappoa. Käsittelyaine voi myös hidastaa pyrolyysia ja stabiloida puun kemiallisia rakenteita termistä hajoamista vastaan. Esimerkiksi puuhun lisätty alumiinisulfaatti luo lämmitettäessä sidoksia selluloosamolekyylien välille ja siten estää termistä hajoamista.

## **SBI-KOKEEN TULOKSEN JA EUROLUOKAN ENNUSTAMINEN**

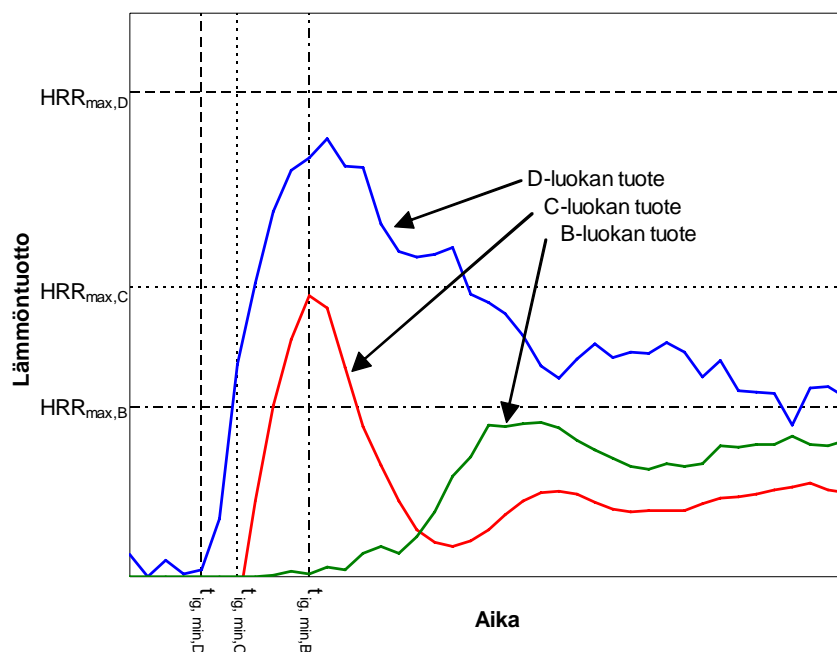
Eurooppalaisessa pintakerrosten paloluokitusjärjestelmässä rakennustuotteet jaetaan seitsemään luokkaan, jotka parhaasta huonoimpaan ovat A1, A2, B, C, D, E ja F. Palosuojaamattomat puutuotteet sijoittuvat tyypillisesti luokkaan D edellyttäen, että niiden paksuus on vähintään 9 mm ja tiheys vähintään 400 kg/m<sup>3</sup>. Palosuojauksella on mahdollista parantaa puutuotteiden palo-ominaisuuksia siten, että ne täyttävät jopa B-luokan vaatimukset. Tärkein testimenetelmä luokissa B, C ja D on SBI-koee. Sen lisäksi on virallista luokitusta varten suoritettava ns. pienen liekin testi [8], jonka tulos ei puutuotteiden tapauksessa yleensä muuta SBI-kokeen antamaa luokitusta. Jos näin ollen pystytään ennustamaan SBI-kokeen tulos, voidaan myös tuotteen Euroluokka ennakoita.

Tuotteen käyttäytymistä SBI-kokeessa voidaan arvioida säteilyvuon tiheydellä 50 kW/m<sup>2</sup> suoritettuna kartiokalorimetrikokeen tulosten perusteella. Tärkeimmät kartiokalorimetrikokeessa mitattavat suureet ovat syttyvyys ja lämmöntuotto.

## **Arviointityökalun luokitusäännöt**

Puutuotteiden SBI- ja kartiokalorimetrituloksia tarkasteltaessa on havaittu, että tiettyyn Euroluokkaan kuuluvien tuotteiden syttyvyys- ja lämmöntuotto-ominaisuuksista on löydettävissä yhtäläisyyksiä. Esimerkiksi tyypillisten B-luokan tuotteiden lämmöntuotto jää

alle  $n. 100 \text{ kW/m}^2$ :n ja niiden syttymisaika on vähintään  $n. 40$  sekuntia kartiokalorimetrikokeessa  $50 \text{ kW/m}^2$ :n säteilyrasituksella. Vastaavat raja-arvot lämmöntuotolle ja syttymisajalle ovat löydettävissä myös C- ja D-luokan tuotteille. Näiden ”luokkarajojen” löytämiseksi on koottu ja analysoitu suuri määrä puutuotteiden kartiokalorimetri-, SBI- ja mallinnustuloksia. Tätä kirjoitettaessa aineiston käsittely on kesken, joten kuvassa 1 esitetään vain arviointityökalun periaate, ei kiinteitä Euroluokkiin liittyviä raja-arvoja. Raja-arvoihin pyritään asettamaan varmuusvaraa siten, että ne täyttävä tuote erittäin suurella todennäköisyydellä täyttää myös kyseisen Euroluokan vaatimukset SBI-kokeessa. Tästä seuraa se, että tuote voi sijoittua SBI-kokeessa tiettyyn luokkaan, vaikkei se täyttäisikään ainakaan molempia arviointityökalun luokitusääntöjä. Esimerkiksi palosuojattu puutuote, jonka lämmöntuoton maksimi kartiokalorimetrikokeessa on  $130 \text{ kW/m}^2$  saattaa hyvinkin täyttää B-luokan vaatimukset SBI-kokeessa, jos sen syttymisaika on riittävän pitkä. Tämän vuoksi on joissain tapauksissa tarpeen käyttää matemaattisesti monimutkaisempaa mutta tuloksiltaan tarkempaa mallinnusta luokitusennusteita laadittaessa.



Kuva 1. Palosuojattujen puutuotteiden luokituksen arviointityökalun periaate. Kutakin Euroluokkaa varten asetetaan kartiokalorimetrikokeen tuloksille lämmöntuoton maksimiarvo ( $HRR_{max}$ ) ja syttymisajan minimiarvo ( $t_{ig,min}$ ). Raja-arvot täyttävä tuote todennäköisesti sijoittuu tarkasteltavaan Euroluokkaan.

## Liekinleviämismalliin perustuvat ennusteet

SBI-koetulosten ennustamista kartiokalorimetrikokeiden perusteella on esitelty Palotutkimuksen päivillä 2001 [3] sekä palotutkimusalan kansainvälisissä julkaisuissa [9, 10]. Mallinnuksessa sovelletaan yksilotteista termistä liekinleviämismallia [11]. Mallin syötteeksi tarvitaan vain lämmöntuottokäyrä kartiokalorimetrikokeesta  $50 \text{ kW/m}^2$ :n säteilyaltistuksella. Tuloksena saadaan ennuste SBI-kokeen lämmöntuottokäyrästä, josta voidaan määrittää luokitusennuste. Mallia on myöhemmin jatkokehitetty optimoimalla syöttöparametrit palosuojatuille puutuotteille ja siten parannettu ennustustarkkuutta erityisesti tälle tuoteriikille [12].

## Perusmalli

Laskennan lähtökohtana on liekinleviämisen perusyhtälö [13]

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = \frac{x_f(t) - x_p(t)}{t_{ig}} \quad (7)$$

jossa  $x_p$  on pyrolyysirintaman sijainti,  $x_f$  on liekin korkeus ja  $t_{ig}$  on karakteristinen syttymisaika. Liekin korkeus  $x_f$  saadaan liekin korkeuskorrelaatiosta

$$x_f(t) = k_f [\dot{Q}(t)]^n \quad (8)$$

jossa  $\dot{Q}(t)$  on polttimen ja koekappaleen yhteenlaskettu lämmöntuotto ja  $k_f$  ja  $n$  ovat testi-  
menetelmälle ominaisia vakioita. Koekappaleen lämmöntuotto on

$$\dot{Q}_{mat}(t) = x_{p0} w \dot{q}''(t) + w \int_{\tau=0}^{\tau=t} \dot{q}''(t-\tau) \frac{x_f(\tau) - x_p(\tau)}{t_{ig}} d\tau \quad (9)$$

jossa  $w$  ja  $x_{p0}$  ovat pyrolyysialueen leveys ja alkukorkeus, ja  $\dot{q}''(t)$  ja  $t_{ig}$  ovat lämmöntuotto-  
käyrä ja syttymisaika kartiokalorimetrikokeesta.

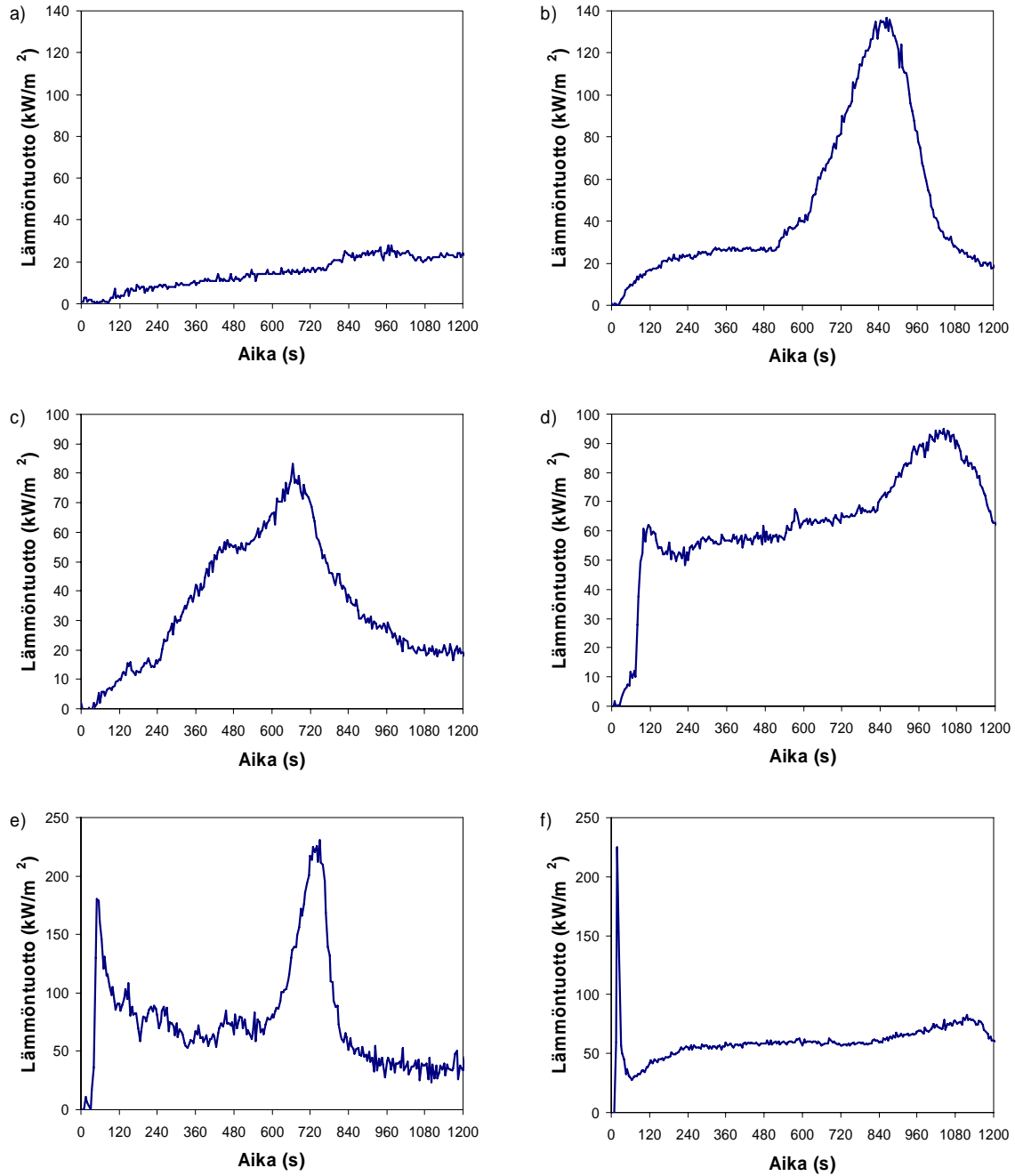
Mallin soveltamiseksi SBI-kokeen tulosten ennustamiseen määritettiin ja optimoitiin syöttöparametrit  $x_{p0}$ ,  $w$ ,  $k_f$  ja  $n$ . Lisäksi etsittiin sopiva skaalaus kartiokalorimetrikokeessa mitatulle lämmöntuotolle, aika-asteikolle ja syttymisajalle. Yksityiskohtainen kuvaus mallin kehitystyöstä esitetään viitteissä 3 ja 9. Perusmallin virityksessä käytettiin esimerkki-  
materiaalina tavallista lastulevyä, joten se toimii hyvin palosuojaamattomille puutuotteille.

## Palosuojuatulle puulle sovellettu malli

Palosuojuatun puun mallinnustutkimuksessa oli mukana noin 20 erilaista tuotetta: painekyllästettyjä ja pintakäsitteltyjä puutuotteita sekä palosuojuatuja erikoisvanereita. Tuotevalikoimasta löytyi erityyppisiä kartiokalorimetrikokeiden lämmöntuottokäyriä, jotka esitellään kuvassa 2.

Voimakkaasti palonsuoja-aineella kyllästetyistä tuotteista vapautuu vain vähän lämpöä, eivätkä ne syty (2a) tai syttyvät vasta pitkän säteilyaltistuksen jälkeen (2b). Kolmas tällaisille tuotteille tyypillinen käyttäytymismalli on hitaasti kasvava lämmöntuotto, joka pysyy suhteellisen matalalla tasolla (2c). Lievemät kyllästykset ja pintakäsittelyt antavat tulokseksi tavallisesti tasaisen lämmöntuoton kohtuullisella tasolla (2d) tai käyrän, jossa on kaksi lämmöntuottomaksimia ja niiden välinen tasanne (2e). Joillakin tuotteilla on terävä lämmöntuottopiikki aivan kokeen alussa, ja sen jälkeen tasainen lämmöntuotto (2f) tai palosuojaamattomillekin puutuotteille tyypillinen kaksihuippuinen lämmöntuottokäyrä.

Mallinnuksessa kuvan 2 tapaukset a ja b sekä joskus c voidaan sisällyttää perusmalliin erityis-  
tapauksina. Jos lämmöntuotto ei saavuta  $50 \text{ kW/m}^2$ :a 570 sekunnin kuluessa säteilyrasituksen  
alusta, luokitusennuste on B.



*Kuva 2. Palosuojattujen puutuotteiden erilaisia lämmöntuottokäyriä kartiokalorimetrikokeissa säteilyvuon tiheydellä 50 kW/m<sup>2</sup>: a) matala lämmöntuotto koko kokeen ajan, ei syttymistä, b) matala lämmöntuotto kokeen alussa, syttyminen pitkän säteilyaltistuksen jälkeen, c) hitaasti kasvava, matala tai kohtuullinen lämmöntuotto, d) tasainen lämmöntuotto kohtuullisella tasolla syttymisen jälkeen, e) kaksi lämmöntuottomaksimia, joiden välissä tasanne, ja f) terävä lämmöntuottopiikki, jota seuraa tasaisehko lämmöntuotto.*

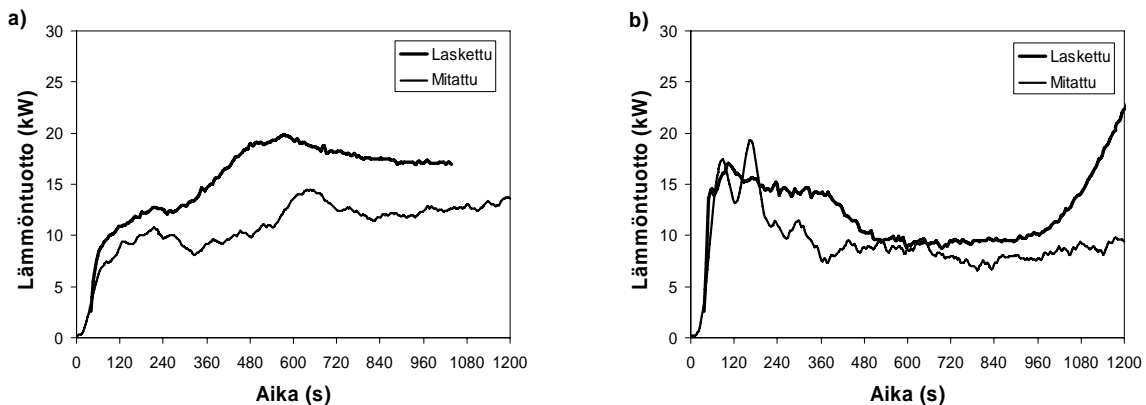
Palosuojuille puutuotteille, joiden lämmöntuottokäyrä oli kuvan 2 muotoa c, d, e tai f suoritettiin mallin syöttöparametrien optimointi. Tulos poikkeaa perusmallista vain pyrolyysi-alueen leveyden ja lämmöntuottotason skaalauksen suhteen. Mallinnuksen vaiheet esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2. Luokituksen ennustaminen palosuojatuille puutuotteille.

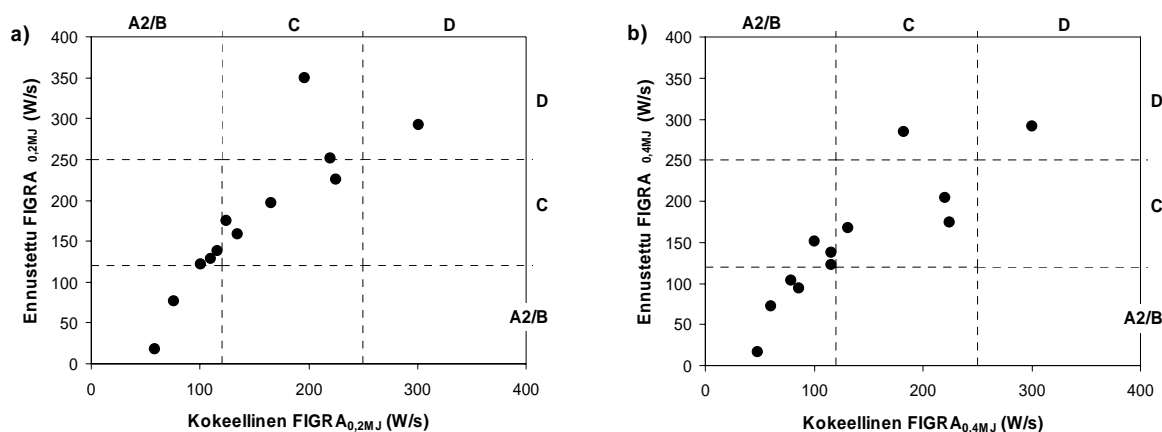
<p>1. Suoritetaan kartiokalorimetrikoe <math>50 \text{ kW/m}^2</math>:n säteilyrasituksella.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Määritetään lämmöntuoton maksimiarvo <math>\text{HRR}_{\text{max}}</math> (monihuippuisesta käyrästä ensimmäinen maksimi). Jos <math>\text{HRR}_{\text{max}} &lt; 75 \text{ kW/m}^2</math>, luokitusennuste on B.</li> <li>– Määritetään syttymisaika <math>t_{ig,50}</math> ajanhetkenä, jolloin lämmöntuotto saavuttaa <math>50 \text{ kW/m}^2</math>. Jos <math>t_{ig,50} &gt; 570 \text{ s}</math>, luokitusennuste on B.</li> </ul>
<p>2. Lasketaan ennuste SBI-kokeen lämmöntuottokäyrästä yhtälöiden 7, 8 ja 9 perusteella seuraavin syöttöparametrein ja skaalauksin:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <math>x_{p0} = 0,26 \text{ m}</math></li> <li>– <math>w = 0,20 \text{ m}</math></li> <li>– <math>k_f = 0,048</math></li> <li>– <math>n = 0,77</math></li> <li>– syttymisaika skaalattuna <math>30 \text{ kW/m}^2</math>:n tasolle seuraavasti (kriittiselle säteilyvuon tiheydelle <math>\dot{q}_{cr}''</math> käytetään arvoa <math>12 \text{ kW/m}^2</math> tai tuotteelle tunnettua muuta arvoa):</li> </ul> $t_{ig,30} = t_{ig,50} \cdot (50 - \dot{q}_{cr}'') / (30 - \dot{q}_{cr}'')$ <ul style="list-style-type: none"> <li>– aika-asteikko skaalattuna <math>25 \text{ kW/m}^2</math>:n tasolle: kerrotaan 3/2:lla</li> <li>– lämmöntuottoarvot skaalattuna <math>25 \text{ kW/m}^2</math>:n tasolle: kerrotaan 2/3:lla</li> </ul>
<p>3. Suoritetaan lasketulle SBI-kokeen lämmöntuottokäyrälle <math>t_{ig,50}</math>:n suuruinen aikasiirto syttymisviiveen huomioimiseksi.</p>
<p>4. Lasketaan luokitusluokitus ja määritetään luokitusennuste.</p>

Esimerkit mitatuista ja ennustetuista lämmöntuottokäyristä SBI-kokeessa palosuojattujen puutuotteiden mallia käyttäen esitetään kuvassa 3. Mitattuja ja ennustettuja FIGRA-arvoja vertaillaan kuvassa 4 (FIGRA = lämmöntuoton kasvunopeus, yksi luokitusluokitus SBI-kokeessa). Kuten kuvista 3 ja 4 nähdään, mallinnetut lämmöntuottokäyrät ja FIGRA-arvot vastaavat hyvin kokeellisesti määritettyjä.

On huomattava, että kehitetty mallinnusmenettely on matemaattinen malli, joka sisältää lukuisia likiarvoistuksia ja yksinkertaistuksia. Se soveltuu kuitenkin käytännön työkaluksi tuotekehitykseen, koska sen käyttöön tarvitaan vain pienikokoinen näyte ja yksi pienen mittakaavan palokoe.



Kuva 3. Mitattujen ja laskettujen SBI-kokeen lämmöntuottokäyrien vertailu: a) palonsuoja-aineella pintakäsitelty mäntylauta ja b) palosuojattu erikoisvaneri.



Kuva 4. Kokeellisten ja ennustettujen FIGRA-arvojen vertailu: a)  $FIGRA_{0,2MJ}$  ja b)  $FIGRA_{0,4MJ}$ . (Alaindeksit viittaavat FIGRA-laskennassa käytettävään kynnyksiarvoon, joka on 0,2 MJ luokissa A2 ja B sekä 0,4 MJ luokissa C ja D.) Euroluokkarajat esitetään katkoviivoin.

## YHTEENVETO

Palo-ominaisuuksiltaan parannettujen puutuotteiden tuotekehityksen avuksi on kehitteillä arviointityökalu. Työkaluun kootaan helppokäyttöiseksi kokonaisuudeksi tietoa puutuotteen eri ominaisuuksien vaikutuksesta sen palokäyttäytymiseen ja mahdollisuuksista parantaa tuotteen luokitusta. Työkalu helpottaa siten tuotteiden suunnittelu- ja kehitystyötä, kun tavoitteena on tuotteen loppukäytön mukaisten vaatimusten täyttäminen eri sovellutuksissa.

Tiettyyn Euroluokkaan kuuluvien puutuotteiden syttyvyys- ja lämmöntuotto-ominaisuuksissa on havaittu merkittäviä yhtäläisyyksiä. Eri luokille on palokoetuloja analysoimalla löydettävissä raja-arvot lämmöntuotolle ja syttymisajalle kartiokalorimetrikokeessa. Joissain tapauksissa on kuitenkin tarpeen käyttää matemaattisesti monimutkaisempaa mutta tuloksiltaan tarkempaa mallinnusta puutuotteiden luokitusennusteita laadittaessa. Tähän tarkoitukseen on käytettävissä palosuojatuille puutuotteille optimoitu versio yksiulotteisesta termisestä liekinleviämismallista. Myös tämä malli soveltuu hyvin työkaluksi tuotekehitykseen, koska sen avulla voidaan ennustaa tuotteen eurooppalainen paloluokitus pienen mittakaavan palokokeen tulosten perusteella.

## KIITOKSET

Kiitämme InnoFireWood-projektin rahoituksesta Tekesiä (päättös nro 40047/04), Wood Focus Oy:tä ja Presso Center Oy:tä.

## LÄHDELUETTELO

1. EN 13823. Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. Brussels: European Committee for Standardization, 2002. 95 s.

2. ISO 5660-1. Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). Geneve: International Organization for Standardization, 2002. 39 s.
3. Hakkarainen, T. & Kokkala, M. SBI-testin lämmöntuoton mallinnus. Palontorjuntatekniikka, 2001. Vol. 31, nro 3-4, s. 83-87. ISSN 0031-0476.
4. Mikkola, E. & Wichmann, I. S. On the thermal ignition of combustible materials. Fire and Materials, 1989. Vol. 14, nro 3, s. 87-96. ISSN 0308-0501.
5. Mikkola, E. Puupinnan syttyminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1989. 48 s. (VTT Tiedotteita 1057.) ISBN 951-38-3589-8.
6. MacLean, J. D. Thermal conductivity of wood. Heating, Piping and Air Conditioning, 1941. Vol. 13, s. 380-391.
7. Janssens, M. Piloted ignition of wood: A review. Fire and Materials, 1991. Vol. 15, nro 4, s. 151-167. ISSN 0308-0501.
8. EN ISO 11925-2. Reaction to fire tests – Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame – Part 2: Single-flame source test (ISO 11925-2:2002). Brussels: European Committee for Standardization, 2002. 28 s.
9. Hakkarainen, T. & Kokkala, M. A. Application of a one-dimensional thermal flame spread model on predicting the rate of heat release in the SBI test. Fire and Materials, 2001. Vol. 25, nro 2, s. 61-70. ISSN 0308-0501.
10. Hakkarainen, T. Correlation studies of SBI and cone calorimeter test results. Teoksessa: Interflam 2001 – Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference (Vol. 1). Edinburgh, 17-19 September 2001. London: Interscience Communications, 2001. S. 519-530. ISBN 0-9532312-8-3.
11. Kokkala, M., Baroudi, D. & Parker, W. J. Upward flame spread on wooden surface products: Experiments and numerical modelling. Teoksessa: Hasemi, Y. (toim.). Fire Safety Science – Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium. Melbourne, 3-7 March 1997. International Association for Fire Safety Science, 1997. S. 309-320. ISBN 4-9900625-5-5.
12. Hietaniemi, J., Hakkarainen, T. & Mikkola, E. Modern tools for estimating fire performance of wood based products. COST Action E29: International Symposium of Advanced Timber and Timber-Composite Elements for Buildings. Florence, 27-29 October 2004.
13. Saito, K., Quintiere, J. G & Williams, F. A. Upward turbulent flame spread. Teoksessa: Grant, C. E. & Pagni, P. J. (toim.). Fire Safety Science – Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium. Gaithersburg, 7-11 October 1985. Washington: Hemisphere, 1986. S. 75-86. ISBN 0-89116-456-1.