

# **Palosuoja-aineiden ominaisuuksien vertailu**

**Markus Mustonen**

Opinnäytetyö

---



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Puutekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Markus Mustonen	
Työn nimi Palosuoja-aineiden ominaisuuksien vertailu	
Päiväys 3.5.2012	Sivumäärä/Liitteet 49
Ohjaaja(t) Tuntiopettaja Risto Pitkänen, projekti-insinööri Kalle Kiviranta	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) PURATE 2 -hanke	
Tiivistelmä	
<p>Tämän työn tavoitteena oli vertailla puuteollisuudessa käytettävien palosuoja-aineiden ominaisuuksia. Vertailu suoritettiin käytännön testien avulla Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratorion tiloissa. Työ on osana Tekesin PURATE 2 (puuyhdistelmä tuotteiden tutkimus, kehitys ja testaus) -hanketta.</p> <p>Tässä työssä palosuojaus tehtiin painekyllästysmenetelmällä. Palosuoja-aineiden ominaisuuksia tutkittiin ISO 5660-1 standardin mukaisen kartiokalomietrikokeen avulla. Kartiokalomietri on pienen näytteiden testaukseen suunniteltu laite, jonka avulla voidaan tutkia eri materiaalien käyttäytymistä palotilanteessa. Kartiokalomietrikokeissa tutkittiin mm. koekappaleiden syttymisaika, lämmöntuotto, massahäviö sekä savuntuotto. Palosuoja-aineilla kyllästetyille koe-erille tehtiin myös ns. kiinnipysyvyytestaus, jossa koe-erät laitettiin olosuhdesäkaappiin 2 viikon ajaksi, jotta saatiin selvitettyä kuinka palosuojaominaisuudet säilyvät vielä säärasiituksen jälkeenkin.</p> <p>Työn tuloksena saatiin selvitettyä tutkittavien palosuoja-aineiden ominaisuudet ja erot toisiinsa nähden. Molemmilla palosuoja-aineilla puun palo-ominaisuudet paranivat merkittävästi kyllästämättömään vertailuerään nähden.</p>	
Avainsanat palosuoja-aine, painekyllästys, kartiokalomietri, olosuhdesäkaappi	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Wood Engineering			
Author(s) Markus Mustonen			
Title of Thesis Comparison of the Properties of the Fire Retardant Agents			
Date	May 3, 2012	Pages/Appendices	49
Supervisor(s) Mr Risto Pitkänen, Full-time Teacher; Mr Kalle Kiviranta, Project Engineer			
Client Organisation /Partners PURATE 2 Project			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The aim of this final year project was to compare different properties of the fire retardant agents used in wood industry. Practical tests were performed in the wood laboratory of Savonia University of Applied Sciences. This project was part of the PURATE 2 (research, development and testing project of wood combination products) project of TEKES.</p> <p>In this project the fire protection was carried out by the pressure impregnation method. The properties of the fire retardant agents were examined using the cone calorimeter according to the standard ISO 5660-1. The cone calorimeter is a device used to examine the fire behavior of the specimen of different materials in small-scale tests. Properties such as time to ignition, heat release, sample mass loss and smoke production were measured. Climate resistance was also tested to find out how the tested fire retardant agents maintain their properties after sealing the specimen in a climate chamber for two weeks. After climate testing new cone calorimeter tests were performed.</p> <p>As a result of the tests the properties and the differences in the tested fire retardant agents were discovered. It was clear that both fire retardant agents significantly improved fire properties compared to non-impregnated wood.</p>			
<p><b>Keywords</b> fire retardant agent, pressure impregnation, cone calorimeter, climate chamber</p>			

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	6
2	PUUN PALAMINEN .....	8
2.1	Puun palo-ominaisuudet.....	8
2.2	Materiaalien paloluokitus .....	9
3	PUUN PALOSUOJAUS .....	11
3.1	Yleistä palosuojauksesta.....	11
3.2	Palosuojausmenetelmät .....	12
3.3	Palosuojakyllästys.....	14
4	PALO-OMINAISUUKSIEN TUTKIMISMENETELMÄT.....	15
4.1	SBI-koe .....	15
4.2	Pienenliekintesti .....	16
4.3	Säteilypaneelitesti.....	17
4.4	Kartiokalorimetrikoe.....	17
5	TESTIKAPPALEIDEN VALMISTUS JA KYLLÄSTYS .....	19
5.1	Koekappaleiden valmistus.....	19
5.2	Kyllästäminen.....	19
6	TESTIT .....	23
6.1	Palosuojaja-aineiden vaikutus ulkonäköön .....	23
6.2	Palosuojaja-aineiden imeytymä.....	23
6.3	Palosuojaja-aineiden tunkeuma .....	23
6.4	Kartiokalorimetri.....	24
6.5	Kiinnipysyvyys.....	25
7	TULOKSET.....	27
7.1	Palosuojaja-aineiden vaikutus ulkonäköön .....	27
7.2	Palosuojaja-aineiden imeytymä.....	27
7.3	Palosuojaja-aineiden tunkeuma .....	29
7.4	Kartiokalorimetrikoe.....	30
7.5	Kiinnipysyvyys.....	40
8	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	46
	LÄHTEET .....	48

## 1 JOHDANTO

Puun palokäyttäytyminen on ollut viime vuosina tutkimuskohteena eri puolilla maailmaa. Tutkimusten avulla on onnistuttu kehittämään uusia menetelmiä, jotka mahdollistavat puun laajemman käytön rakentamisessa. Puun ominaisuuksia on mahdollista muuttaa kemiallisesti tai fysikaalisesti niin, että puun palonkestävyys paranee huomattavasti. Palo-ominaisuuksista erityisesti syttymisherkkyys, palamisnopeus, lämmön- ja savuntuotto ovat keskeisempiä asioita, joihin vaikuttamalla saadaan puun paloluokitusta parannettua. Puun palosuojaus voidaan toteuttaa fysikaalisella ominaisuuksiin vaikuttamisella tai rakennusteknisillä ratkaisuilla. Kemialliseen suojaukseen voidaan käyttää puupintaan siveltäviä palosuojamaaleja ja lakkoja tai vaihtoehtoisesti palosuojaus voidaan toteuttaa painekyllästyksellä.

Tämä opinnäytetyö käsittelee teollisuudessa merkittävästi käytettävien palosuoja-aineiden ominaisuuksien vertailua. Työssä vertaillaan eri palosuoja-aineiden ominaisuuksia toisiinsa käytännön testauksista saatujen tulosten sekä kirjallisuuden antamien lähtötietojen perusteella. Tämä opinnäytetyö on osa Savonia-ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystoimintaan liittyvää PURATE 2 -hanketta. Työn tavoitteena on vertailla onnistuneesti siitä, miten palosuoja-aineet eroavat toisistaan ominaisuuksiensa ja varsinaisen palokäyttäytymisensä osalta.

Ensisijaisesti tässä työssä tutkitaan ja vertaillaan palosuojakyllästettyjen koe-erien käyttäytymistä palotilanteessa, jossa olennaisimpia tutkittavia asioita ovat mm. syttymisaika sekä savun- ja lämmöntuotto. Työssä tutkitaan kuinka paljon testattava puu imee itseensä käytettävää kyllästettä ja kuinka syvälle aineet puun sisälle tunkeutuvat. Työssä tutkitaan myös aineiden kiinnipysyvyyttä eli sitä onko kyllästyksen jälkeisellä säällytyksellä vaikutusta koe-erien palokäyttäytymiseen ja säilyttävätkö kyllästetut palosuoja ominaisuutensa säällytyksen jälkeen.

Käytännön testaukset tehdään Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratorion tiloissa ja testauksia varten käytetään erityisesti laboratorion kartiokalorimetriä sekä olosuhdesääkaappia. Varsinaisen testilaitteiston lisäksi työssä käytetään laboratorion puuntyöstökoneita sekä työkaluja. Kyllästettäväksi sahatavaraksi valitaan helpon kyllästettävyyden vuoksi männyn pintapuu. Kyllästysprosessia varten tarvittavat aineet hankitaan tunnetuilta palosuoja-aineiden toimittajilta. Kultakin yritykseltä hankitaan Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratorioon 40 litraa valittua palosuoja-ainetta.

Kyllästykset tehdään Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa. Koe-erien kyllästys tapahtuu delaminoimiseen käytettävän painesäiliön avulla. Säiliöön rakennutetaan ruostumattomasta teräksestä ns. kyllästyskaukalo, jonne koekappaleet laitetaan. Säiliön ominaisuuksia muokataan niin, että koe-erien kyllästystä varten saadaan luotua sopivat paineet ja olosuhteet.

## 2 PUUN PALAMINEN

### 2.1 Puun palo-ominaisuudet

Puu on palava materiaali, jolle tyypillinen ominaisuus on pinnan hiiltyminen. Puun syttyä alkava hiiltyminen suojaa puuta, hidastamalla lämpötilan nousua puun sisällä ja näin ollen se viivästyttää palon etenemistä. (Puun monet mahdollisuudet.) Puun palamisen kannalta merkittävimpiä tarkasteltavia asioita ovat palon syttymis- ja leviämisenopeus sekä lämmöntuotto. Puun syttyminen riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Se täytyy olla riittävän korkea, jotta palamiseen tarvittavat kemialliset reaktiot voivat syntyä. Puun syttymisherkkyteen vaikuttavat lisäksi puun ominaisuudet, kuten kosteus, paksuus, tiheys, lämmönjohtavuus ja puun ominaislämpökapasiteetti. (Hakkarainen, Mikkola, Östman, Tsantaridis, Brumer, & Piispanen 2005, 13–14.)

Lämpötilaan, jossa puu syttyy vaikuttaa se, kuinka kauan puu on alttiina vallitsevalle lämpötilalle. Yleisesti ottaen puun syttyminen tapahtuu n. 250–300 °C:ssa. Puun syttyä alkaa pinnan hiiltyminen n. 0,8 mm:n minuuttivauhdilla. Massiivipuussa palon eteneminen on melko hidasta, puuta suojaavan ja lämpötilan kasvua hidastavan hiilikerroksen vuoksi. Tätä puun taipumusta hiiltyä käytetään hyväksi mm. kantavien rakenteiden mitoituksissa. Yleisesti ottaen puu syttyy sitä herkemmin mitä alhaisempi on puun tiheys tai kosteusprosentti sekä mitä ohuempi puumateriaali on kyseessä. Lisäksi puussa ilmenevät viat, kuten pinnan karkeus, säröt, halkeamat ja puumateriaalissa ilmenevät terävät kulmat edesauttavat jossain määrin palamista. (Puuinfo.)

Eripaksuisissa puutuotteissa materiaalin syttyvyyden kannalta merkittävä tarkasteltava asia on materiaalin terminen paksuus. Puu, jonka terminen paksuus on ohut, syttyy nopeammin kuin vastaava termisesti paksumpi puu. Tilanteessa, jossa termisesti ohut puu joutuu lämmölle alttiiksi yhdeltä puolelta, lämpenee myös vastakkainen puoli lähelle lämmölle altistuvan puolen lämpötilaa. Termisesti paksussa puussa puolestaan vastakkainen puoli ei juuri lämpene vaan on lähellä vallitsevan ympäristön lämpötilaa. Termisesti ohuesta puusta puhutaan tapauksissa, joissa puun paksuus on vain muutamia millimetrejä. Puu on puolestaan termisesti paksu, mikäli paksuus on vähintään 10 mm. (Hakkarainen & Mikkola, 3.)



## 2.2 Materiaalien paloluokitus

Palomääräysten lähtökohtana on yleisesti ottaen rajoittaa puurakenteista ja puupinnoista johtuvaa palon kehittymistä palotilassa, jotta pystyttäisiin takaamaan ensisijaisesti ihmisten henkilöturvallisuus. Puisilla rakenteilla on palotilassa oma vaikutuksensa palon kehittymiseen ja vaarallisten olosuhteiden muodostumiseen. (Puurakentamisen asema rakentamismääräyksissä.)

Rakennuksen osien ja rakennustarvikkeiden paloteknistä käyttäytymistä koskevat luokitukset ovat paloluokitusjärjestelmiä. Jokaisen EU-maan on huolehdittava paloturvallisuusasioista omalla alueellaan. Asioiden hoitamista varten on olemassa kansalliset palomääräykset, joiden turvallisuudentasosta päätetään kansallisesti. Tärkein syy yhteisille luokitusjärjestelmille on kaupan esteiden poistaminen. (Pohjanmaanpelustuslaitos.)

Materiaalit, mukaan lukien myös puu, luokitellaan materiaalien paloluokkiin niiden palonkesto-ominaisuuksien perusteella. Materiaalit luokitellaan paloluokkiin A1, A2, B, C, D, E, F. Luokitukseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi lämmön- ja savuntuotto sekä liekin leviäminen. Taulukossa 1 on esitetty eri paloluokkien osallistuminen palamiseen.

TAULUKKO 1. Käytettävät paloluokat. (RakMK E1.)

<b>Paloluokka</b>	<b>Osallistuminen palamiseen</b>
A1	ei osallistu
A2	erittäin rajoitettu
B	hyvin rajoitettu
C	osallistuu rajoitetusti palamiseen
D	Osallistuminen hyväksyttävissä
E	Käyttäytyminen hyväksyttävissä
F	ei määritetty

Rakennustarvikkeiden savuntuotto ja palavien pizaroiden ilmeneminen ilmaistaan lisäluokilla s ja d (taulukko 2). Savuntuotto jaetaan luokkiin s1, s2 ja s3 ja palavien osien ja pizaroiden ilmeneminen luokkiin d0, d1 ja d2. (RakMK E1.)

TAULUKKO 2. Rakennusmateriaalien lisäluokitukset. (RakMK E1.)

<b>Luokka</b>	<b>Savuntuotto / palavien osien tai pizaroiden esiintyminen</b>
s1	erittäin vähäinen savuntuotto
s2	vähäinen savuntuotto
s3	ei täytä aiempien luokkien vaatimuksia
d0	palavia osia ei ilmene
d1	pisarat / muut osat sammuvat nopeasti
d2	ei yllä edellisten luokkien vaatimusten tasolle

Palosuojaamattoman puun paloluokka on yleensä D, mikäli tuotteen paksuus on vähintään 9 mm ja tiheys vähintään 400 kg/m<sup>3</sup>. Palosuojauksen avulla puun ominaisuuksia voidaan muuttaa niin, että tuote pääsee C tai jopa B-luokkaan. Savuntuotto-luokka on puolestaan yleensä s1 tai s2. Palosuojauksen vaikutus puun savuntuotto-ominaisuuksiin riippuu palosuojauksessa käytetyistä menetelmistä ja kemikaaleista. (Nurmi, Hakkarainen & Kevarinmäki 2010, 9.)

### 3 PUUN PALOSUOJAUS

#### 3.1 Yleistä palosuojauksesta

Puuta käytetään runsaasti rakennusmateriaalina ja siksi sen palo-ominaisuuksiin pyritään vaikuttamaan ja kiinnittämään erityistä huomiota. Olennaista palo-ominaisuuksiin vaikuttamisessa on palon syttymisen ja varsinaisen puun palamisen ja leviämisen vaikeuttaminen ja mahdollisimman tehokas estäminen.

Puurakenteiden palokäyttäytyminen on ollut tutkimuskohteena viimeisen 20 vuoden aikana useissa hankkeissa eri puolella maailmaa. Tutkimuksien tavoitteena on ollut saada tietoa puun turvallisesta käytöstä. Testien kautta on pystytty kehittämään palosuunnitteluun uusia menetelmiä ja malleja. Tämän päivän parantunut tietämys palosuunnittelussa ja tekniset ratkaisut, esimerkiksi automaattiset sammutusjärjestelmät, tehokkaasti varustetut palolaitokset ja savunilmaisimet mahdollistavat tänä päivänä puun laajan käytön. Paloturvallisuusmääräyksiä onkin ryhdytty uudistamaan kohti laajempaa puun käyttöä. (Fire safety in timber buildings.)

Palon syttymisen jälkeen lämpötilan suuri nousu pyrkii heikentämään kaikkien yleisesti käytettävien rakennusmateriaalien mekaanisia ominaisuuksia. Tästä syystä rakennuksessa käytettävien rakenteiden tulee olla riittävän kestäviä sortumista vastaan. Lisäksi esimerkiksi osastoivien seinien on estettävä liiallinen pintalämpötilojen nousu ja liekkien läpäiseminen. (Rakennuslaine.)

Palosuoja-aineilla käsitelty puu soveltuu käytettäväksi julkisissa tiloissa, kuten kouluissa, teattereissa ja kauppakeskuksissa niin sisä- että ulkopinnoissakin ja ylipäättään palosuojattua puuta käytetään riskialttiissa kohteissa, joissa liikkuu paljon ihmisiä ja joissa on kiinni paljon omaisuutta. Paloturvallisuutta on mahdollista parantaa erilaisien kemiallisten ja fysikaalisten menetelmien avulla, jolloin suojaus on mahdollista tehdä, jopa ilman puun ulkonäön tai ominaisuuksien merkittävää heikentymistä. Palosuojatun puun vaikutus perustuu siihen, että puu ei palaessaan tuota lämpöä samalla tavalla kuin normaali palosuojaaamaton puu. Lämmöntuotto on siis sen verran hillittyä, että se ei edistä palamista. Palosuojatun puun syttymisherkyys on myös saatu palosuojauksen kautta pienemmäksi. Puuhun aikaansaadut palosuojaominaisuudet saattavat kuitenkin kadota tapauksissa, joissa puu suojataan maalilla tai lakalla, joka peittää alleen palosuojaominaisuudet. (VTT.)

Palon syttymisherkkyden heikentäminen ja lämmöntuoton alentaminen ovat keskeisiä asioita, joihin palosuojauksella pyritään vaikuttamaan. Nämä palosuojauksen päämäärät voidaan saavuttaa seuraavasti:

- Muutetaan pyrolyysin suuntaa (pyrolyysi on reaktio, jossa puu hajoaa muodostaen hiiltä ja tervaa, jotka muodostavat lämmön vaikutuksesta palavia kaasuja).
- Suojataan pinta eristävällä kerroksella.
- Pyritään hidastamaan syttymistä ja palamista muuttamalla lämpöominaisuuksia.
- Vähennetään tai vaimennetaan palossa ilmenevien palokaasujen esiintymistä.
- Hillitään ja hallitaan palamisessa tapahtuvia ketjureaktioita. (Hakkarainen 2005, 17.)

### 3.2 Palosuojausmenetelmät

Paloturvallisuuteen liittyy yleisiä asetettuja vaatimuksia, joita huolellisella suunnittelulla pyritään jo luonnosvaiheessa asettamaan ja huomioimaan. Rakennuksen on säilytettävä kantokykynsä ja stabiliteettinsa palon ajan tai sille asetetun määräajan, niin että turvallinen poistuminen ja pelastustyö on mahdollista. Palon leviäminen muihin osiin rakennusta ja rakennuksen sisällä on estettävä. Rakennus on myös suunniteltava siten, että sen sammuttaminen olisi helppoa. (Paloturvallinen puutalo.)

Puun palosuojaus voidaan toteuttaa kemiallisin tai fysikaalisin menetelmin. Puun fysikaalisia palosuojauksia ovat esimerkiksi puurakenteiden suojaus rakenteellisilla ratkaisuihin ja palokatkoilla. Tilat voidaan varustaa palamisen varalta myös sprinkleri-järjestelmillä.

Rakennus voidaan jakaa esimerkiksi palon ja palosta syntyvän savun rajoittamiseksi erillisiin palo-osastoihin. Osastoinnilla pyritään myös turvaamaan poistumistiet, helpottamaan pelastustoimia sekä rajoittamaan palosta aiheutuvia omaisuusvahinkoja. (Puurakentamisen asema rakentamismääräyksissä.)

Puun ominaisuuksia voidaan myös muuttaa fysikaalisilla menetelmillä, kuten puristamalla. Puristuksen avulla saadaan kasvatettua puun tiheyttä ja pintakovuutta, mutta se ei oikeastaan vaikuta merkittävästi puun palo-ominaisuuksiin. Poikkeuksena kuitenkin on erittäin suuri pinnan tiheys, joka viivästyttää palon syttymisaikaa. Puutuotteiden yhdistelmillä voidaan päästä myös parempaan lopputulokseen. Esimerkiksi jos jonkin puutuotteen pintakerros koostuu jostakin toisesta puumateriaalista, jolle suhteellisen alhainen lämmönläpäisy on ominaista, voidaan paloluokitusta saada parannettua. Syttymistä voidaan siis viivyttää käyttämällä puutuotteen pinnassa korkeatiheyksistä pintakerrosta. Esimerkki tällaisesta pintakerroksesta voi olla esimerkiksi korkeapainelaminaatti. Komposiittirakenteet tarjoavat suuren joukon erilaisia ratkaisuja käytettäväksi puutuotteissa, joissa tarvitaan hyvät palonkesto-ominaisuudet. Komposiittituotteen pinnalla voidaan käyttää ohutta puukerrosta antamaan tuotteelle puumainen ulkonäkö, vaikka itse tuote koostuukin komposiitista. Suojaava kerros palamatonta materiaalia voidaan myös sijoittaa esimerkiksi, ohuen puisen pintakerroksen ja massiivipuun väliin, jolloin tuote koostuu pääasiassa puusta. (Hakkarainen 2005, 27–28.)

Varsinaisia kemiallisia menetelmiä käytettäessä puun pinta voidaan käsitellä esimerkiksi erilaisilla palosuojamaaleilla ja lakoilla. Maalit ja lakat luovat puupintaan yleensä eristävän kerroksen, joka hidastaa alustan kuumentumista, jolloin mm. syttymisherkkyys on selkeästi alhaisempi kuin vastaavan käsittelemättömän puun. Sen lisäksi, että em. aineita käytettäessä saadaan palon syttymisherkkyyttä merkittävästi alennettua, pystytään aineiden avulla hidastamaan koko palamistapahtumaa. Maalien ja lakkojen levitys voidaan toteuttaa sivelemällä, ruiskuttamalla tai kastamalla.

Palosuojaominaisuuksien luomiseen on mahdollista käyttää myös painekyllästystä, jolloin käytettävät palosuoja-aineet pyritään saamaan tunkeutumaan puun solukoihin paineen avulla. Palosuojakyllästeet tunkeutuvat puun solukoihin hyvin. Lähinnä kylästettävä puu on männyn pintapuuta, joka ominaisuuksiensa puolesta on kyllästysprosessiin sopivaa. Palosuojakyllästys puulle suoritetaan pääpiirteissään samalla tavalla kuin puun painekyllästyskin. Kyllästettävänä aineena vaan käytetään palosuoja ominaisuuksien luontiin perustuvia kyllästysaineita.

### 3.3 Palosuojakyllästys

Painekyllästyksessä tyhjiön ja ylipaineen välisen vuorottelun avulla saadaan kyllästysliuos tunkeutumaan puun sisään. Kyllästysprosessissa puun soluseinämien sisältämä vesi korvataan kyllästysliuoksella. Kyllästys ei onnistu männyn sydänpuulle tai kuuselle niiden solurakenteesta johtuen. (Puun monet mahdollisuudet.)

Palosuojakyllästetty puu on painekyllästetty erikoiskemikaaleilla, jotka parantavat puun ominaisuuksia palotilanteessa. Palosuojakyllästys hidastaa liekin leviämistä ja samalla rajoittaa palossa syntyvien savukaasujen määrää. Kyllästys parantaa puun ominaisuuksia vähentämällä palon alkuvaiheessa syntyvän lämmön määrää. Käsitteily myös vähentää palotapahtumassa syntyvien helposti syttyvien yhdisteiden määrää. Tämä johtuu liekin leviämisenopeudessa tapahtuvasta hidastumisesta palavalla pinnalla. Liekin poistamisen jälkeen palosuojuuttu puu lakkaa hiiltymästä. Palon aikana palosuojakemikaalit alkavat reagoida, kun lämpötila saavuttaa pisteen, jossa lämpötila on hieman alle sen lämpötilan, jossa puu syttyy. Kemikaalien reagoiessa alkavat syttymättömät kaasut ja vesihöyry muodostua ja vapautua, jolloin ne muodostavat puuhun ns. eristekerroksen lämpöä vastaan, joka saisi muutoin aikaan puun syttymisen. (Canadian Wood Council.) Palosuojakyllästykseen haasteena on löytää sopivat kemikaalit, joita käyttämällä saadaan luotua hyvät palosuoja-ominaisuudet ja samalla mahdollisimman vähäinen negatiivinen vaikutus puun muihin ominaisuuksiin (Hakkarainen 2005, 21).

Varsinainen kyllästysprosessi voidaan jakaa vaiheisiin seuraavasti:

- alkutyhjiö, jonka aikana puun solukoista poistetaan ilma
- alipaine, jonka aikana palosuoja-aine lisätään kyllästyskammioon
- ylipaine, jonka aikana palosuoja-aine pakotetaan puuhun
- kammion tyhjennys ylipaineen jälkeen
- lopputyhjiö, jonka aikana poistetaan ylimääräinen kylläste. (Hakkarainen 2005, 21.)

## 4 PALO-OMINAISUUKSIEN TUTKIMISMENETELMÄT

Palo-ominaisuuksien tutkimiseen on olemassa erilaisia testausmenetelmiä. Menetelmien kautta saadaan tietoa testattavan tuotteen käyttäytymisestä palotilanteessa. Testeissä mitataan esimerkiksi koekappaleiden syttymistä, liekin leviämistä sekä lämmön- ja savuntuottoa. Merkittävimpiä palotestaus menetelmiä ovat SBI-koe, säteilypaneeli- ja pienenliekintesti sekä kartiokalorimetrikoe.

Kaikista tärkein menetelmä B, C ja D Euroluokkien määrittämiseen on SBI-koe. SBI-kokeen lisäksi virallista luokitusta varten tehdään koekappaleille pienenliekintesti, joka ei puutuotteilla yleensä muuta SBI-kokeen tulosten kautta saatua luokitusta. (Hakkarainen, 4.)

50 kW/m<sup>2</sup>:n lämpövirrantiheydellä tehtävällä kartiokalorimetrikokeella voidaan arvioida ja ennakoida tutkittavan tuotteen käyttäytymistä SBI-kokeessa. SBI- ja kartiokalorimetrikokeita tutkimalla on huomattu yhteneväisyyksiä tuotteiden syttyvyydessä ja lämmöntuotossa, kun on tarkasteltu tiettyyn Euroluokkaan kuuluneita tuotteita. Tuotteen luokitus voidaan ennustaa 50 kW/m<sup>2</sup>:n lämpövirrantiheydellä tehdyn kartiokalorimetrikokeen lämmöntuottokäyrän avulla, josta voidaan ennustaa SBI-kokeen lämmöntuottokäyrä. Tavallisesti B-luokan materiaaleissa lämmöntuotto on alle 100 kW/m<sup>2</sup> ja syttymisaika enintään n. 40 sekuntia. Paloluokan ennustamisessa kutakin luokkaa varten asetetaan koetuloksille maksimiarvo lämmöntuotolle ja minimiarvo syttymisajalle. Näin ollen mikäli tuote täyttää asetetut raja-arvot, sijoittuu se todennäköisesti tarkasteltavaan Euroluokkaan. (Hakkarainen, 4-5.)

### 4.1 SBI-koe

Standardin EN 13823, mukainen SBI-koe koostuu testihuoneesta, testilaitteesta, pakokaasujärjestelmästä ja yleisestä mittauslaitteesta. Koekappale muodostuu kahdesta siivestä, lyhyestä (495 ± 5 mm x 1 500 ± 5 mm) ja pitkästä (1 000 ± 5 mm x 1 500 ± 5 mm). Koekappaleen suurin sallittu paksuus on 200 mm. (SFS EN 13823.)

SBI-kokeessa kahdesta pystysuorasta siivestä koostuva koekappale muodostaa suorakulmaisen nurkan. Koekappale altistetaan alanurkassa sijaitsevan propaanikaasupolttimen liekille. Poltin tuottaa lämpöä 30,7 ± 2 kW. Koekappaleiden suorituskykyä arvioidaan 20 minuutin testin ajan. Kokeessa tutkitaan lämmöntuotto, liekinleviäminen, savuntuotto ja putoilevien pisaroiden ja muiden osien esiintyminen. SBI-kokeen

luokitteluparametreja ovat FIGRA (palonkehityksen kasvunopeus), LFS (sivuttainen palon leviäminen), THR<sub>600s</sub> (kokonaislämmöntuotto 600 sekunnin ajalta), SMOGRA (savuntuoton kasvunopeus) ja TSP<sub>600s</sub> (kokonaissavuntuotto 600 sekunnin ajalta). (SFS EN 13823.)

Taulukossa 3 on eritelty Euroluokan luokituskriteerit SBI-kokeessa. Luokitus kriteerejä ovat savuntuotonopeus, sivuttainen palon leviäminen ja kokonaislämmöntuotto 600 sekunnin kuluttua kokeesta.

TAULUKKO 3. Euroluokan luokituskriteerit. (Hakkarainen 2005, 34.)

Luokka	Luokitus kriteerit		
	FIGRA (W/s)	LFS	THR 600s (MJ)
A2 / B	≤ 120	< koekappaleen reuna	≤ 7,5
C	≤ 250	< koekappaleen reuna	≤ 15
D	≤ 750	–	–

#### 4.2 Pienenliekintesti

EN ISO 11925-2 standardin mukaisessa pienenliekintestissä tutkitaan koekappaleen syttymisaikaa ja liekin leviämistä. Testissä tutkitaan myös testin aikana syntyvien palavien pisaroiden ja osien muodostumista.

Pienenliekintestissä koekappale (250 mm x 90 mm) altistetaan suoralle kosketukselle propaanikaasuliekin kanssa. Koekappale asetetaan testissä pystysuoraan U-kirjaimen muotoiseen kappaleenpidikkeeseen ja 20 mm korkea liekki tuodaan 45°:n kulmassa kosketukseen koekappaleen kanssa. Liekinkohdistuspiste riippuu siitä käytetäänkö testissä pinta- vai reunasytytystä. Pintasytytystä käytettäessä liekki asetetaan 40 mm pinnan keskiviivan alareunan yläpuolelle ja reunasytytyksessä keskelle alareunaa. Testin aikana tarkkaillaan palavia ja putoilevia roskia asettamalla suodatinpaperi kappaleenpidikkeen alapuolelle. (SFS EN ISO 11925-2.)

Testissä käytetään kahta erilaista liekille altistusaikaa sekä testinkestoaikaa riippuen testattavan tuotteen paloluokasta. E-luokassa liekille altistusaika on 15 sekuntia ja testi päätetään 20 sekuntia liekin poistamisen jälkeen. Vastaavasti luokkien B, C ja D tuotteille käytetään 30 sekunnin liekille altistusaikaa ja testin pituudeksi on asetettu



60 sekuntia liekin poistamisen jälkeen. Testi voidaan päättää aikaisemmin tapauksissa, joissa syttymistä ei havaita liekin poistamisen jälkeen, näyte lakkaa palamasta tai jos liekinärki ulottuu näytteen yläreunaan. (SFS EN ISO 11925-2.)

#### 4.3 Säteilypaneelitestit

Standardin EN ISO 9239-1 mukaisen säteilypaneelitestin avulla voidaan tutkia mm. koekappaleiden syttymisnopeutta, liekin leviämisenopeutta ja savuntuottoa.

Säteilypaneelitestissä testattava koekappale (1 050 mm x 230 mm) asetetaan vaakatasoon kaasukäyttöisen säteilypaneelin alapuolelle. Säteilypaneeli kohdistaa säteilyä koekappaleeseen 30°:n kulmassa. Koekappale altistetaan lämpövirralle, joka on asetettu 1 kW/m<sup>2</sup>:n–15 kW/m<sup>2</sup>:n suuruiseksi. Testissä koekappale sytytetään pilottiliekillä säteilypaneelin puoleisesta päästä. Liekin eteneminen pitkin koekappaleen pintaa talletetaan ajankohtana, joka liekeiltä kuluu tietyn etenemän saavuttamiseen. Säteilypaneelitestin kesto on standardissa 30 minuuttia. Tulokset ilmaistaan liekin leviämismatkana suhteessa aikaan, kriittisenä lämpövirrantiheytenä palon sammuesssa sekä savun tiheytenä ajan suhteen. (SFS EN ISO 9239-1.)

#### 4.4 Kartiokalorimetrikoe

Standardin ISO 5660-1 mukainen kartiokalorimetrikoe on palotesti, jolla voidaan tutkia koekappaleiden lämmöntuoton kehittymistä säteilyrasitukselle altistuksen aikana. Itse testilaitteisto koostuu kartiomaisesta lämmönsäteilijästä, kappaleenpidikkeestä, vaa'asta, säteilykilvestä, kipinäsytyttimestä ja savukaasujen poisto- ja keräysjärjestelmästä. Kokeen avulla voidaan tutkia syttymisaika, lämmöntuotto, massahäviö ja savuntuotto. (SFS ISO 5660-1.)

Kartiokalorimetrikoe perustuu siihen, että lämmöntuoton ja palamisen aikana kuluvan hapen määrän välillä on suhde. Lämpöä vapautuu n. 13,1 x 10<sup>3</sup> kJ yhtä kulutettua happi kilogrammaan kohti. Testissä koekappaleeseen kohdistetaan 0 kW/m<sup>2</sup>:n–100 kW/m<sup>2</sup>:n suuruinen lämpövirrantiheys. Testi voidaan suorittaa koekappaleen ollessa vaakatai pystytasossa. (SFS ISO 5660-1.)

Kartiokalorimetrikokeessa testattava tuote on tasomainen, kooltaan 100 x 100 mm. Testattavan tuotteen paksuus voi olla korkeintaan 50 mm. Ennen testausta, tutkitta-

vat koekappaleet tasaannutetaan standardin ISO 554 mukaisesti  $23 \pm 2$  °C:ssa, suhteellisen kosteuden ollessa  $50 \pm 5$  %. Tutkittava koekappale suojataan alumiinifoliolla niin, että folion kirkas puoli tulee koekappaleeseen päin ja niin, että koekappaleen reunat ja pohja tulevat suojatuksi foliolla. Tämän jälkeen koekappale laitetaan kappaleenpidikkeeseen. (SFS ISO 5660-1.)

Kokeen alussa kartiokalorimetrin säteilykilpi suljetaan ja koekappale ja kappaleenpidin asetetaan vaa'alle, jolloin koekappale sijoittuu lämpösäteilijän alapuolelle. Tämän jälkeen asetetaan kipinäsytytin koekappaleen päälle ja avataan säteilykilpi, jolloin testi alkaa. Seuraavaksi tarkastellaan koekappaletta, kunnes sen huomataan syttyvän. koekappaleen syttyä voidaan kipinäsytytin siirtää pois koekappaleen päältä. Mikäli liekit sammuvat kipinäsytyttimen pois ottamisen jälkeen, asetetaan sytytin uudelleen koekappaleen päälle 5 sekunnin kuluessa sammumisesta ja pidetään sitä päällä koko loppu testauksen ajan. Testi voidaan lopettaa tapauksissa, joissa palon syttymisestä on kulunut 32 minuuttia, koekappale ei ole syttynyt 30 minuuttiin mennessä tai jos koekappaleen massa putoaa nolnaan. Yleisesti ottaen testin kesto tulisi olla kuitenkin vähintään 5 minuuttia. Testin aikana tarkastellaan ja kirjataan mahdolliset havaittavat muutokset koekappaleessa, kuten turpoaminen, halkeilu tai sulaminen. Standardin mukaisessa kokeessa testataan 3 koekappaletta, joiden 180 sekunnin keskiarvoisia lämmöntuotto arvoja vertaillaan. Mikäli jonkin koekappaleen vertailtava arvo 180 sekunnin kohdalla eroaa 10 %, tulee testata uusi 3 näytteen sarja. (SFS ISO 5660-1.)

## 5 TESTIKAPPALEIDEN VALMISTUS JA KYLLÄSTYS

### 5.1 Koekappaleiden valmistus

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin kahden erilaisen palosuoja-aineen ominaisuuksia ja eroavaisuuksia toisiinsa nähden. Jokaista työssä verrattavaa palosuoja-ainetta kohden valmistettiin reilusti rinnakkaiskappaleita tulosten tarkkuuden ja luotettavuuden maksimoimiseksi. Tämän lisäksi valmistettiin yksi vertailuerä, jota ei kyllästetty lainkaan vaan sitä verrattiin sellaisenaan eri palosuoja-aineilla kyllästettyihin koekappaleisiin.

Varsinainen työn käytännön suoritus alkoi kyllästettävien koekappaleiden valmistuksella. Männyn 50x125 sahatavarasta sahattiin laboratorion tarkistuspyörösaahalla 900 mm:n pituisia koekappaleita, jolloin ne juuri mahtuivat kyllästysprosessissa käytettyyn kyllästyskaukaloon, jonka mitat olivat 270 mm x 390 mm x 1 000 mm.

Koekappaleita valmistettiin tulevaa kyllästysvaihetta varten 8 kutakin palosuoja-ainetta kohti. Tämän jälkeen sahatut koekappaleet vielä halkaistiin, jolloin sahatavarasta saatiin eroteltua kyllästämiseen soveltuva pintapuu. Koekappaleet merkittiin ja numeroitiin myöhempää tunnistamista varten.

### 5.2 Kyllästäminen

Tätä työtä varten hankittiin puulaboratorioon kultakin palosuoja-aineiden toimittajalta 40 litraa palosuoja-ainetta. Tutkimuskohteiksi valittiin seuraavat palosuoja-aineet:

- HCA 40, Flameguard
- Vital Protect.

Koekappaleet punnittiin ennen kyllästystä, jotta kyllästyksen jälkeen voitiin tutkia, paljonko koekappaleiden massa oli lisääntynyt. Käytännössä siis määritettiin, paljonko kukin koekappale imi itseensä ainetta.

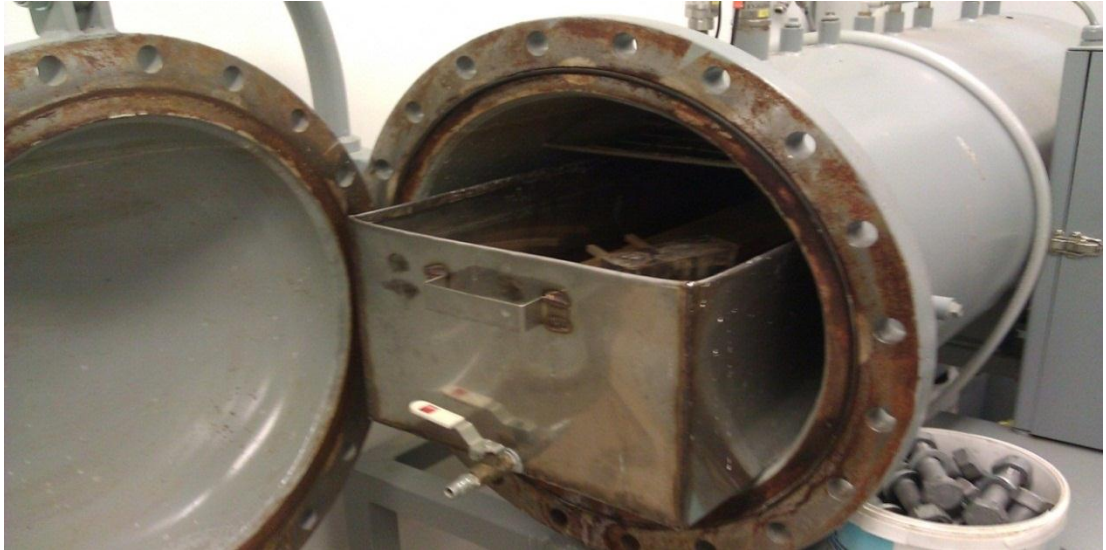
Varsinainen koe-erien kyllästäminen aloitettiin Vital Protect -palosuoja-aineella. Koekappaleet kyllästettiin 900 mm:n pituisina lautoina. Koekappaleet ladottiin päällekkäin välirimojen päälle teräksiseen kyllästyskaukaloon. Tämän jälkeen kaukalo (kuva1) asetettiin delaminointikammioon, jossa koekappaleet kyllästettiin. Kaukaloon kaadet-

tiin 40 l valittua suoja-ainetta, jolloin kaikki koekappaleet peittyivät aineeseen. Koekappaleiden nouseminen pinnalle estettiin asettamalla metallisia painoja koekappaleiden päälle. Tämän jälkeen kammio suljettiin ja aloitettiin kyllästäminen.



KUVA 1. Koekappaleet kyllästyskaukalossa. Kuva Markus Mustonen 2012

Tässä työssä kammioon (kuva 2) luotiin 6 baarin ylipaine, jossa koekappaleita pidettiin n. vuorokauden verran. Kyllästysprosessia ohjattiin kammion delaminatori-tietokoneohjelman avulla.



KUVA 2. Kyllästämisissä käytetty kammio. Kuva Markus Mustonen 2012

Koekappaleiden kyllästyttyä vuorokauden verran 6 baarin ylipaineessa, kammiosta poistettiin paineet ja kyllästysaine laskettiin pois kaukalosta. Lopuksi koekappaleet poistettiin kaukalosta, punnittiin ja asetettiin kuivaustelineeseen kuivumaan (kuva 3).



KUVA 3. Koekappaleet kuivumassa kyllästyksen jälkeen. Kuva Markus Mustonen 2012

Vital Protectin jälkeen tehtiin kyllästyksset Flameguardin toimittamalle HCA 40 - palosuoja-aineelle. Kyllästysprosessi suoritettiin samalla tavalla kuin aikaisemminkin, mutta tällä kertaa kyllästyskaukaloön kaadettiin Vital Protectin sijaan 40 l Flameguardin toimittamaa HCA 40 -palosuoja-ainetta.

## 6 TESTIT

### 6.1 Palosuoja-aineiden vaikutus ulkonäköön

Ensimmäisenä tutkimuksena tarkasteltiin eri palosuoja-aineilla kyllästettyjen koeerien ulkonäköä, mahdollisten kyllästämistä aiheutuvien muutosten varalta. Koeerien ulkonäköä arvioitiin visuaalisesti kyllästysprosessin päätyttyä. Visuaalinen tarkastelu koekappaleiden ulkonäköön suoritettiin heti kyllästyksen jälkeen ja lopuksi koeerien kuivuttua.

### 6.2 Palosuoja-aineiden imeytymä

Tässä työssä tutkituille palosuoja-aineille määritettiin aineiden imeytyminen kyllästettävään pintapuuhun. Aineiden imeytymisen selvittämiseksi koekappaleiden massa punnittiin ennen kyllästysprosessia ja heti sen jälkeen.

Koekappaleiden imeytyminen saatiin selvitettyä vähentämällä kyllästyksen jälkeen mitatusta massasta ennen kyllästystä mitattu kuivamassa. Massassa tapahtuneesta muutoksesta saatiin selvitettyä pintapuuhun imeytyneen palosuoja-aineen massa, josta koekappaleen kuutiolavuuteen suhteuttamalla saatiin määriteltyä koekappaleisiin imeytyneen palosuoja-aineen massa  $\text{kg/m}^3$ .

### 6.3 Palosuoja-aineiden tunkeuma

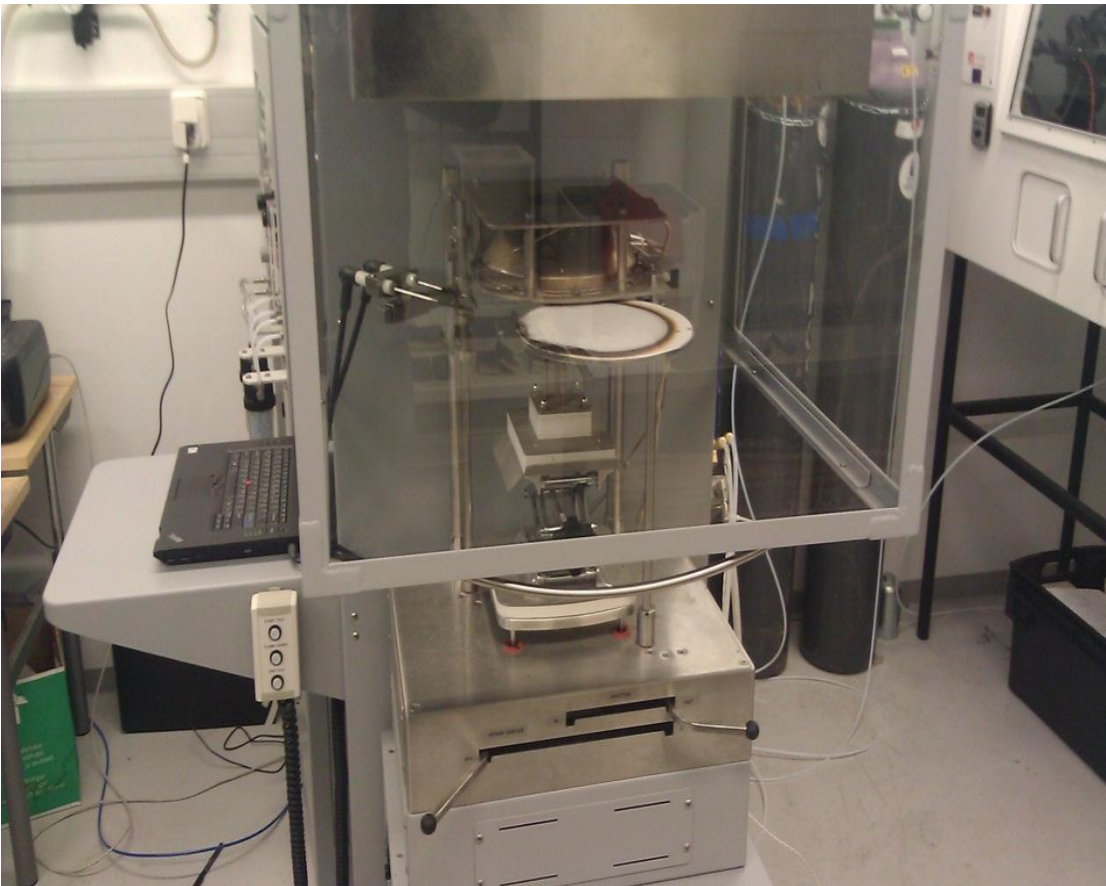
Palosuoja-aineen tunkeuma kyllästettävään pintapuuhun saatiin Vital Protect -palosuoja-aineelle selvitettyä Etax A-etanoli-kurkuma -seoksella. Kyllästetystä koeerästä valittiin satunnaisotannalla 8 näytettä, 1 kustakin kyllästetystä laudasta.

koekappaleiden sahapinnat kostutettiin vedellä märäksi, jonka jälkeen niiden annettiin tekeytyä n. puolen tunnin ajan. Tämän jälkeen pinnat käsiteltiin Etax A-etanoli-kurkuma -seoksella. Edellä mainittu seos reagoi Vital Protectin sisältämän boorin kanssa ja värjäsi kyllästyneen puun oranssiksi jättäen kyllästymättömän kohdan keltäväksi, jolloin visuaalisesti tarkastelemalla voitiin arvioida aineen tunkeuma pintapuuhun. Edellä mainittu tunkeuman selvittämiseksi käytetty seos reagoi vain booripohjaisiin aineisiin, minkä vuoksi tunkeumaa ei määritetty Flameguardin HCA 40 -palosuoja-aineelle.



#### 6.4 Kartiokalorimetri

Tässä opinnäytetyössä koe-erien palo-ominaisuuksien tutkimiseen käytettiin standardin ISO 5660-1 mukaista Kartiokalorimetriä (kuva 4). Kokeita varten kyllästetyistä laudoista valmistettiin 100 x 100 mm:n koekappaleita. Standardista poiketen kokeeseen päätettiin ottaa testattavaksi 25 koekappaleita eri palosuoja-aineella kyllästettyä koe-erää kohden. Kokeiden avulla pystyttiin koekappaleille määrittämään lämmöntuotto, syttymisnopeus, massahäviö ja savuntuotto.



KUVA 4. Polttokokeissa käytetty kartiokalorimetri. Kuva Markus Mustonen 2012

Kartiokalorimetrikokeessa testattavat koekappaleet päätettiin testata lämpövirrantiheydellä  $50 \text{ kW/m}^2$ . Koekappaleiden palamista seurattiin liekin sammumiseen saakka ja kokeen aikana pyrittiin tarkkailemaan ja arvioimaan koekappaleissa tapahtuneita muutoksia. Mikäli koekappaleet eivät näyttäneet syttyvän, niiden mahdollista syttymistä odotettiin 10 minuutin ajan, jonka jälkeen testi katsottiin päättyneeksi.



## 6.5 Kiinnipysyvyys

Eri palosuoja-aineilla käsitellyt koe-erät jaettiin puoliksi kahteen osaan, joista toiselle puolikkaalle tehtiin kartiokalorimetritestaus suoraan kyllästyksen jälkeen ja toiselle puolikkaalle sääkaappitestauksen jälkeen.

Sääkaappitestiin (kuva 5) päätettiin ottaa mukaan 25 koekappaletta eri palosuoja-aineilla kyllästettyä koe-erää kohden. Sääkaappitestillä pyrittiin selvittämään palosuoja-aineiden kiinnipysyvyys eli kuinka hyvin aineet säilyttävät palominaisuutensa sääkaappitestin jälkeen.

Sääkaappitestin kestoksi asetettiin 2 viikkoa, jonka aikana koekappaleet altistettiin säärasitukselle. Säärasitusohjelma sisälsi olosuhteita aina kuivasta pakkasilmasta kosteaan lämpimään ilmaan. Ohjelma sisälsi myös sadetuksen.

Sääkaappitestin oletettiin muuttavan koe-erien kosteuden kostemmaksi kuin aikaisemmin poltetuissa koekappaleissa, joten sääkaappitestin koekappaleet tasaannutettiin vastaamaan samaa kosteutta kuin aikaisemmin poltetut koekappaleet. Molemmista koe-eristä valittiin satunnaisotannalla koekappaleet, joille tehtiin uunikuivaus absoluuttisen kuivamassan selvittämiseksi. Kuivauslämpötilana käytettiin  $103 \pm 2$  °C. Uunikuivauksessa 24 tunnin aikana tehtyjen peräkkäisten mittausten välinen muutos painossa tuli olla  $\leq 0,1$  %, jolloin koekappaleiden katsottiin saavuttaneen absoluuttinen kuivamassa. Koe-erien kuivamassasta saatiin määritettyä tavoite kosteus, johon sääkaappitestin koekappaleet pyrittiin tasaannuttamaan ennen kartiokalorimetrikokeita.



KUVA 5. Vital Protect ja HCA 40 -koe-erät sääkaapissa.

Kuva Markus Mustonen 2012

## 7 TULOKSET

### 7.1 Palosuoja-aineiden vaikutus ulkonäköön

Koe-erien pinnoissa ei näkynyt välittömiä muutoksia kyllästyksen jälkeen. Koe-erien kuivuttua, Vital Protectilla kyllästetyissä koekappaleissa ei edelleenkään havaittu mainittavia muutoksia ulkonäössä. Flameguardin HCA 40 -palosuoja-aineella kyllästettyjen koekappaleiden pinnoissa sen sijaan oli selvästi havaittavissa runsasta valkeaa suolakerrostumaa. Suolakerros poistettiin koekappaleiden pinnoista harjaamalla ennen testejä.

### 7.2 Palosuoja-aineiden imeytymä

Kyllästämisessä kyllästyskaukaloon kaadettiin 40 l palosuoja-ainetta ja kyllästysprosessin päätyttyä jäljelle jäänyt palosuoja-aine poistettiin kaukalosta. Vital Protect -palosuoja-ainetta poistettiin kaukalosta 32 l ja Flameguardin HCA 40 -palosuoja-ainetta 30 l. Tästä voitiin jo todeta HCA 40 -palosuoja-aineella kyllästetyn koe-erän imeneen enemmän palosuoja-ainetta, koska varsinaista kyllästysliuosta oli hävinnyt n. 10 l ja vastaavasti Vital Protectin kohdalla n. 8 l.

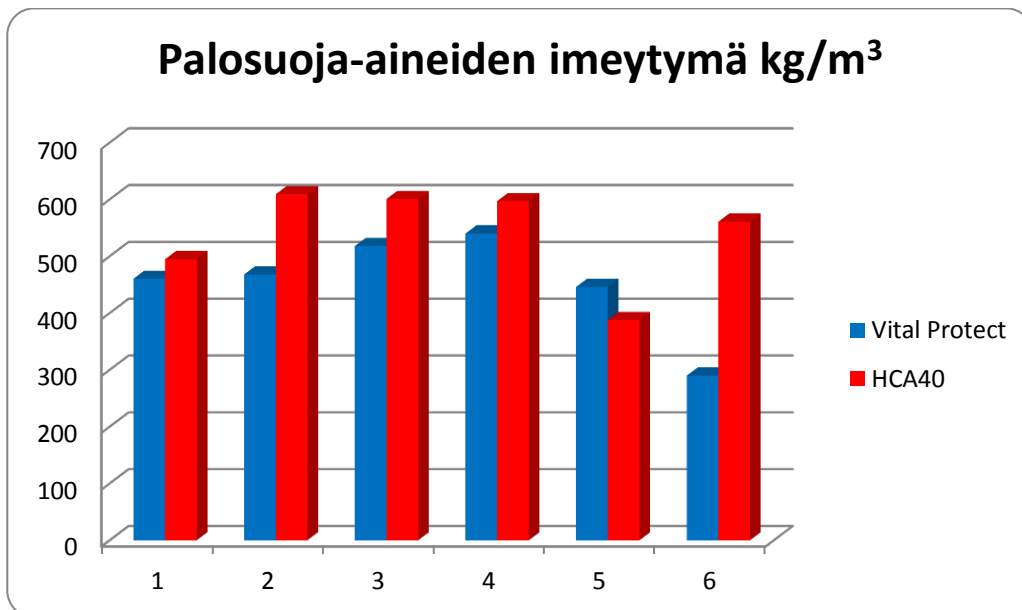
HCA 40 -koe-erässä huomattiin, että kyllästysliuoksen pinta oli laskenut kyllästysprosessin aikana sen verran, että kyllästyskaukalossa päällimmäisinä olleet koekappaleet olivat pois otettaessa nestepinnan yläpuolella. Tästä syystä kyseisten koekappaleiden imeytymä oli selvästi muuta koe-erää alhaisempi ja ne jouduttiin ottamaan vertailusta pois, keskiarvoa väärentävän vaikutuksen vuoksi. Nestepinnan lasku johtui suuresta palosuoja-aineen imeytymisestä kyllästettävään pintapuuhun.

Vital Protectilla kyllästetyt koekappaleet imivät palosuoja-ainetta keskimäärin 454 kg/m<sup>3</sup>. Flameguardin HCA 40 -palosuoja-aineella vastaava palosuoja-aineiden imeytymä oli puolestaan keskimäärin 542 kg/m<sup>3</sup>. Käytännössä HCA 40 -palosuoja-ainetta saatiin siis imeytettyä kyllästettävään pintapuuhun n. 90 kg/m<sup>3</sup> enemmän kuin Vital Protectilla kyllästettyyn koe-erään. Yksittäisten koekappaleiden painonnousu käy ilmi taulukosta 4 ja imeytymä kuviosta 1.

TAULUKKO 4. Koe-erien punnitustulokset.

Palosuoja-aine	koekappale	paino g ennen kylästystä	tiheys kg/m <sup>3</sup>	paino g kyllästykseen jälkeen	painon muutos g	imeytymä kg/m <sup>3</sup>
<b>Vital Protect</b>	1.1	1091,9	422	2282,8	1190,9	460,3
	1.2	1482,3	553	2735,4	1253,1	467,9
	1.3	1499,1	584	2828,5	1329,4	517,9
	1.4	1391,3	538	2789,0	1397,7	540,2
	1.5	1387,5	532	2550,9	1163,4	446,1
	1.6	1332,4	543	2044,2	711,8	289,9
	<b>KA</b>	<b>1364,1</b>	<b>529</b>	<b>2538,5</b>	<b>1174,4</b>	<b>454</b>
<b>HCA 40</b>	2.1	1163,7	474	2378,4	1214,7	494,7
	2.2	1386,5	522	3005,0	1618,5	609,2
	2.3	1287,1	481	2896,1	1609,0	600,7
	2.4	1155,3	471	2621,2	1465,9	597,1
	2.5	1088,2	443	2039,6	951,4	387,5
	2.6	1197,2	488	2574,4	1377,2	560,9
	<b>KA</b>	<b>1213,0</b>	<b>480</b>	<b>2585,5</b>	<b>1372,8</b>	<b>542</b>

Koe-eriä pidettiin kyllästyskammiossa n. vuorokauden verran 6 baarin ylipaineessa, jolloin palosuoja-aineet imeytyivät pintapuuhun erittäin hyvin. Vital Protect -koeerässä koekappaleiden paino kasvoi n. 90 % ja vastaavasti HCA 40 -koeerän koekappaleiden paino kasvoi yli kaksinkertaiseksi.

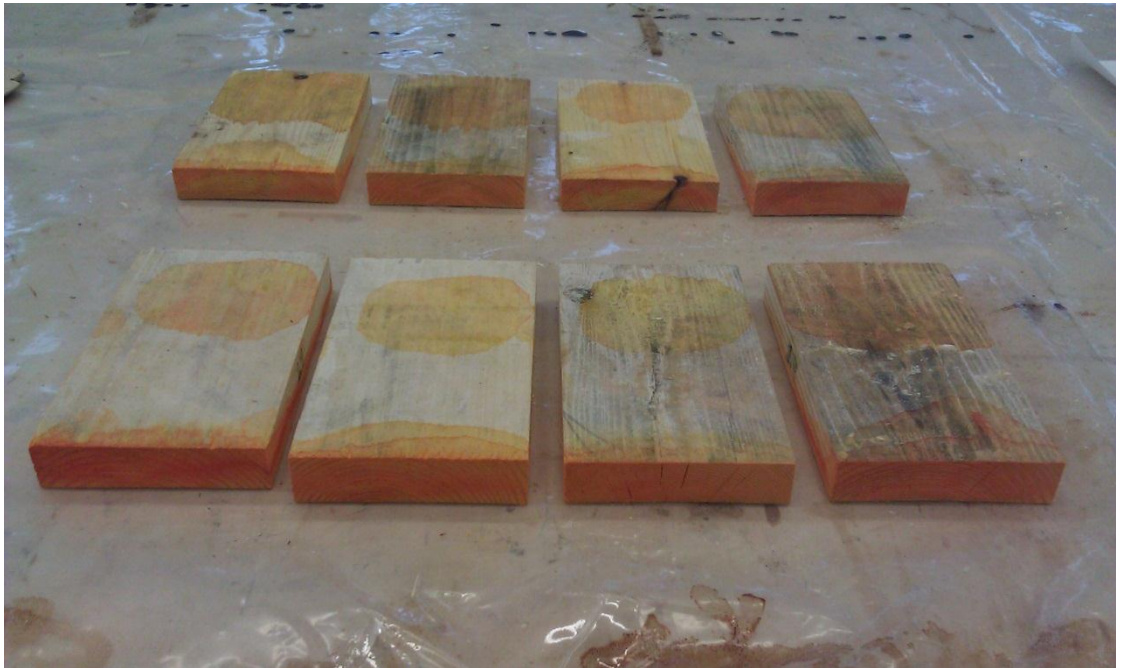
KUVIO 1. Palosuoja-aineiden imeytymä kg/m<sup>3</sup>

### 7.3 Palosuoja-aineiden tunkeuma

Vital Protectilla kyllästetyissä koekappaleissa (kuva 7) oli selkeästi havaittavissa kyllästyneen ja kyllästymättömän puun osuus värierona. Kyllästynyt puu värjäytyi tumman oranssiksi, kun taas puu, johon aineet eivät olleet tunkeutuneet jäi selvästi vaaleammaksi.

Palosuoja-aine näytti tunkeutuneen puuhun melko lailla kauttaaltaan kahta koekappaletta lukuun ottamatta, joissa oli havaittavissa keskellä koekappaletta puuta, johon palosuoja-aine ei ollut päässyt tunkeutumaan. Muutamassa muussakin koekappaleessa oli havaittavissa pieniä vaaleita juovia, joihin palosuoja-aineen voidaan olettaa jääneen tunkeutumatta.

Mikäli tilannetta katsotaan kokonaisuutena, voidaan olettaa, että Vital Protect -palosuoja-aine oli saatu tunkeutumaan melko lailla kauttaaltaan kyllästettyyn koerään.



KUVA 7. Vital Protect -suoja-aineella kyllästettyjen näytteiden tunkeuma. Kuva Markus Mustonen 2012

## 7.4 Kartiokalorimetrikoe

Koe-erien tulosten taulukoinnissa on käytetty seuraavanlaisia lyhenteitä:

$t_{ig}$  = syttymisaika

$HRR_{60s}$  = lämmöntuotto 60 sekunnin kohdalla testiä

$HRR_{180s}$  = lämmöntuotto 180 sekunnin kohdalla testiä

$HRR_{300s}$  = lämmöntuotto 300 sekunnin kohdalla testiä

$HRR_{max}$  = lämmöntuoton huippuarvo

THR = kokonaislämmöntuotto

EHC = lämpöarvo

SEA = savun muodostama ominaispinta-ala palaneen kappaleen massayksikköä kohti.

Koe-erien kartiokalorimetrikokeissa ensimmäisenä tehtiin kokeet kyllästämättömälle vertailuerälle (taulukko 5). Vertailuerän tulosten perusteella saatiin käsitys palosuojaamattoman puun palo-ominaisuuksista, joihin vertaamalla nähtiin käytännössä se, miten palosuoja-aineet muuttivat puun palo-ominaisuuksia ja käyttäytymistä palotilanteessa.

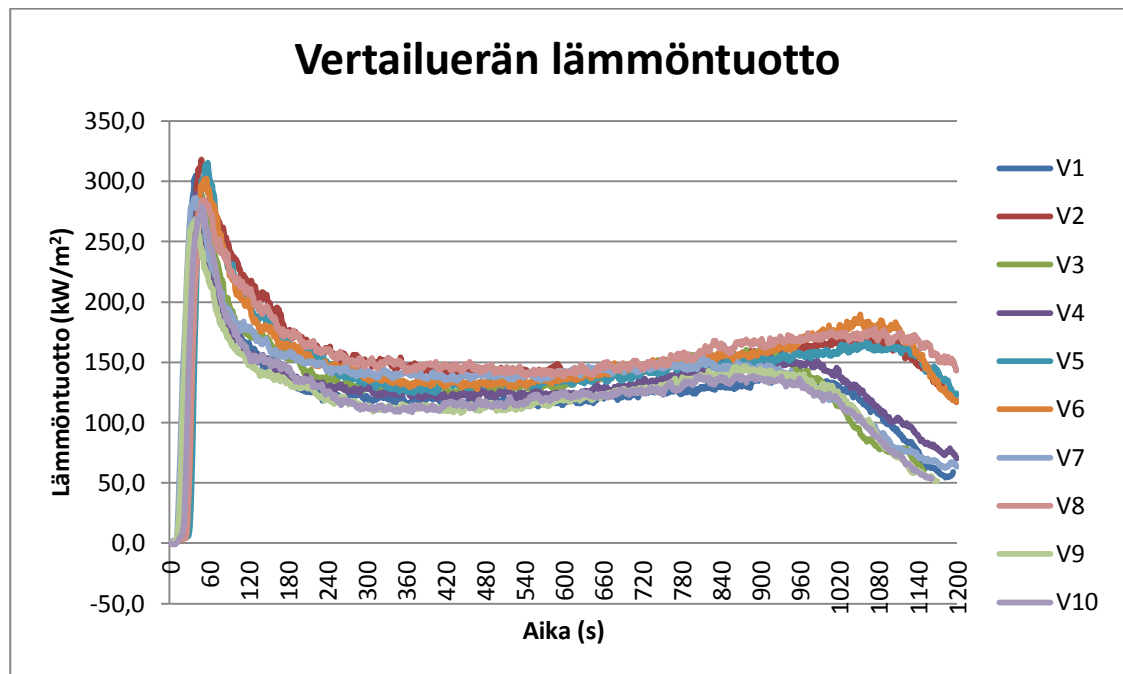
TAULUKKO 5. Kyllästämättömän vertailuerän kartiokalorimetrikokeen tulokset

näyte	$t_{ig}$ s	$HRR_{60s}$ kW/m <sup>2</sup>	$HRR_{180s}$ kW/m <sup>2</sup>	$HRR_{300s}$ kW/m <sup>2</sup>	$HRR_{max}$ kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	massa häviö g/m <sup>2</sup>	SEA m <sup>2</sup> /kg
V1	11,9	210,3	176,6	155,1	305,0	151,1	17,8	8470	38,3
V2	15,0	222,8	213,8	191,0	317,9	201,0	17,4	11550	48,3
V3	10,9	218,8	190,6	168,6	289,5	159,7	18,2	8760	101,4
V4	7,9	202,4	174,0	156,6	289,4	166,5	18,7	8930	58,6
V5	22,4	213,6	197,4	175,7	315,3	190,6	17,0	11200	18,9
V6	18,6	212,6	195,8	175,7	302,2	193,1	17,7	10900	21,2
V7	7,1	208,6	186,8	170,4	286,1	168,8	19,5	8640	104,2
V8	18,4	198,7	198,4	181,4	284,9	213,1	18,4	11560	47,2
V9	7,8	192,8	165,5	147,6	268,7	145,2	18,0	8070	35,9
V10	14,8	200,2	173,0	152,6	279,4	144,6	17,4	8310	21,5
<b>KA</b>	<b>13,5</b>	<b>208,1</b>	<b>187,2</b>	<b>167,5</b>	<b>293,8</b>	<b>173,4</b>	<b>18,0</b>	<b>9639</b>	<b>49,6</b>

Kyllästämätön koe-erä syttyi keskimäärin 13,5 sekunnin kuluttua testin käynnistämisestä. Vaihteluväli kokeen aikana poltetuissa koekappaleissa oli 7,1–22,4 sekuntia. Vastaavasti koe-erän lämmöntuoton maksimiarvo oli keskimäärin n. 294 kW/m<sup>2</sup>, vaih-

teluvälin ollessa  $268,7 \text{ kW/m}^2$ – $317,9 \text{ kW/m}^2$ . Lämmöntuoton kehittyminen kokeen edetessä on esitetty kuviossa 2.

Kuten kuviosta on havaittavissa, vertailuerän käyttäytyminen kokonaisuudessaan kartiokalorimetrikokeessa on melko yhdenmukainen. Koekappaleet saavuttavat huipunsa ensimmäisen 2 minuutin aikana, jolloin saavutetaan n.  $300 \text{ kW/m}^2$ :n lämmöntuotto. Tämän jälkeen lämmöntuotto putoaa ja tasaantuu  $110 \text{ kW/m}^2$ :n– $150 \text{ kW/m}^2$ :n tuntumaan. Vertailuerälle on havaittavissa vielä pieni lämmöntuoton kasvu ennen koekappaleiden varsinaista sammumista, jolloin lämmöntuotto lähtee pysyvästi laskemaan.



KUVIO 2. Vertailuerän lämmöntuoton kehittyminen suhteessa kuluneeseen aikaan

Kartiokalorimetrikokeessa mitattiin myös kokeen aikana, koekappaleesta hävinnyt massa eli massahäviö  $\text{g/m}^2$ . Koe-erän keskimääräinen massahäviö oli  $9\,639 \text{ g/m}^2$ , vaihteluvälin ollessa  $8\,070 \text{ g/m}^2$ – $11\,560 \text{ g/m}^2$ . Vertailuerä muodosti testin aikana keskimäärin  $49,6 \text{ m}^2/\text{kg}$  savua suhteessa palaneeseen koekappaleen massayksikköön.

Vital Protect -koe-erille (taulukko 6) tehdyssä kartiokalorimetrikokeessa kaikkien koekappaleiden keskimääräinen syttymisaika oli 67,2 sekuntia, joka on melkein viisinkertainen kyllästämättömään vertailuerään verrattuna. Koe-erässä syttymisaikojen vaihtelevuus tosin oli melko suuri, sillä vaihteluväli syttymisajoissa oli 14–201,8 sekuntia. Suuri vaihtelevuus johtuu luultavasti siitä, että testattujen koekappaleiden joukossa on ollut koekappaleita, jotka eivät ole imeneet aineita samalla tavalla kuin koekappa-

leet, joissa imeytymä on ollut varsin suuri. Tapauksessa, jossa koe-erien tuloksissa ei oteta huomioon huippuarvoja niin, Vital Protect -palosuoja-aineella syttymisaika on silti yli kolminkertainen verrattaessa kyllästämättömään vertailuerään.

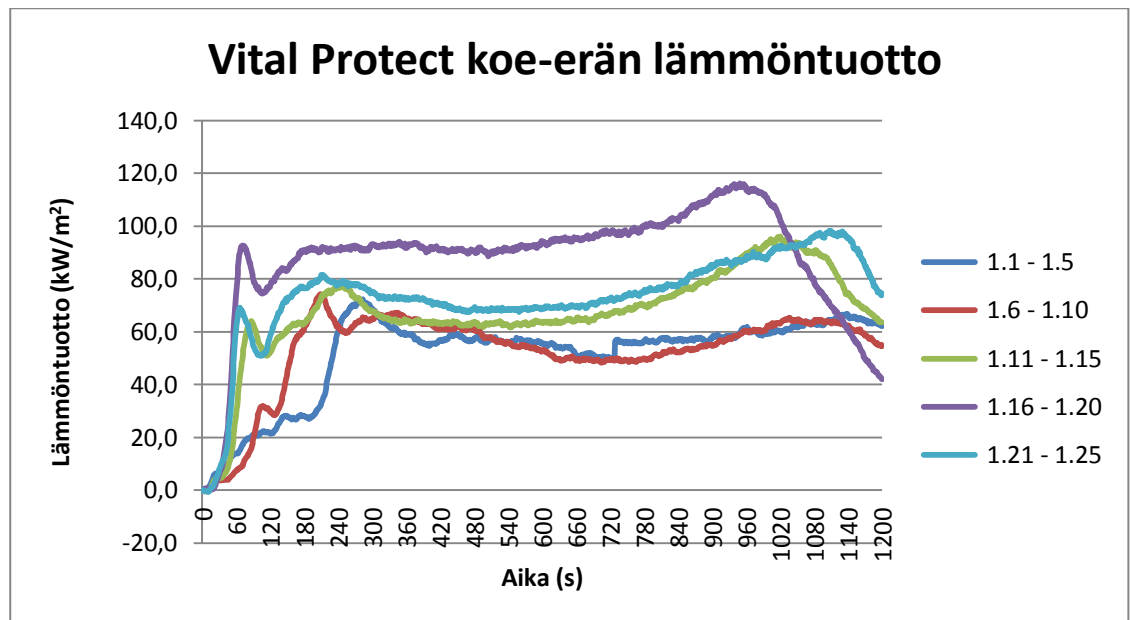
TAULUKKO 6. Vital Protect -koe-erän kartiokalorimetrikokeen tulokset

näyte	$t_{ig}$ s	HRR <sub>60s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>180s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>300s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>max</sub> kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	massa häviö g/m <sup>2</sup>	SEA m <sup>2</sup> /kg
1.1	166,7	6,0	36,6	38,6	58,3	20,9	5,4	3900	53,1
1.2	97,3	14,4	37,5	45,7	75,6	62,5	8,7	7150	38,2
1.3	167,0	11,9	50,9	53,0	87,9	66,9	9,3	7150	43,3
1.4	35,3	42,0	65,1	65,9	84,1	88,8	10,0	8880	26,7
1.5	108,5	17,1	37,7	53,3	101,3	83,3	9,7	8590	27,4
1.6	201,8	8,0	54,4	62,1	95,6	91,4	10,0	9160	59,1
1.7	107,6	33,2	67,1	64,4	110,3	66,4	8,3	8000	39,8
1.8	68,2	24,3	53,5	62,1	107,7	80,8	9,6	8400	33,9
1.9	51,5	27,2	51,8	56,8	92,9	66,9	8,4	7930	16,0
1.10	65,6	39,0	61,0	58,1	87,0	67,7	8,9	7650	20,3
1.11	51,9	40,5	57,9	56,6	82,9	64,8	8,6	7520	15,8
1.12	38,3	60,7	69,0	67,3	95,0	92,3	11,2	8240	5,3
1.13	46,6	34,0	52,5	60,8	113,9	84,9	11,1	7680	3,5
1.14	141,1	16,3	60,3	63,7	122,4	90,2	11,5	7850	20,5
1.15	31,0	63,5	80,6	80,1	110,6	107,1	12,4	8620	21,9
1.16	15,4	54,5	83,8	87,7	130,1	124,3	14,6	8530	81,1
1.17	26,4	69,7	88,7	92,7	130,6	128,3	15,1	8510	116,2
1.18	36,1	67,7	87,1	94,1	134,2	113,5	13,8	8220	52,9
1.19	39,7	60,8	73,1	76,4	109,3	91,2	11,5	7960	7,3
1.20	36,2	39,2	48,2	60,7	94,0	79,6	10,3	7700	1,7
1.21	22,2	28,2	32,0	45,6	121,7	78,5	9,7	8070	33,4
1.22	14,0	43,3	67,8	78,0	124,1	122,4	13,5	9100	43,8
1.23	39,2	50,6	62,2	67,1	117,7	99,0	11,7	8450	7,4
1.24	32,7	57,3	77,1	81,1	109,5	103,8	12,2	8550	4,5
1.25	39,4	48,2	62,5	62,3	83,6	75,3	9,2	8220	3,0
<b>KA</b>	<b>67,2</b>	<b>38,3</b>	<b>60,7</b>	<b>65,4</b>	<b>103,2</b>	<b>86,0</b>	<b>10,6</b>	<b>8001</b>	<b>31,0</b>

Vital Protect -palosuoja-aineella kyllästetyssä koe-erässä lämmöntuoton maksimi arvo oli puolestaan keskimäärin 103,2 kW/m<sup>2</sup>, vaihteluvälin ollessa 58,3 kW/m<sup>2</sup>–134,2 kW/m<sup>2</sup>. Vaihteluvälin suuruus selittyy tässäkin tapauksessa erona aineen imeytyneisyydessä. Joka tapauksessa Vital protect -palosuoja-aineella kyllästetty koe-erä tuottaa lämpöä n. 3 kertaa vähemmän kuin kyllästämätön vertailuerä. Lämmöntuoton kehittyminen suhteessa kuluneeseen aikaan on esitetty kuviossa 3.



Kuvaajaan ei ole otettu selkeyden vuoksi mukaan suoraan kaikkia 25 koekappaleita. Kaikista koekappaleista on sen sijaan laskettu lämmöntuoton keskiarvo jokaiselta sekunnilta, 5 koekappaleen ryhmissä. Kuten kuvaajasta huomataan, koe-erälle näyttäisi olevan ominaista kaksihuippuinen lämmöntuottokäyrä. Koekappaleet saavuttavat ensimmäisen huippunsa n. 1–5 minuutin välillä, jonka jälkeen lämmöntuotto tasaantuu useaksi minuutiksi, ennen kuin se saavuttaa toisen huippunsa, joka osassa tapauksista on lämmöntuoton maksimikohta. Yleisesti ottaen koekappaleiden keskiarvoiset lämmöntuottokäyrät jäävät alle sataan kilowattiin yhtä käyrää lukuun ottamatta, jossa käyrän toinen huippu lähentelee 120 kW:n lämmöntuottoa. Nämä keskiarvoiset lämmöntuottokäyrät osoittavat, että suurella osalla tämän koe-erän koekappaleista on edellytykset täyttää Euroluokan B vaatimukset.



KUVIO 3. Vital Protect -koe-erien keskiarvoinen lämmöntuoton kehittyminen ajan suhteen

Vital Protect -koe-erän massahäviö oli keskimäärin n. 8 000 g/m<sup>2</sup>. Suhteuttamalla Vital Protect -koe-erien keskimääräinen massahäviö vertailuerän vastaavaan, huomataan Vertailuerän menettäneen massaansa n. 17 % enemmän kuin Vital Protect -palosuoja-aineella kyllästetyssä koe-erässä. Vaihteluväli Vital Protect -koe-erän massahäviössä oli 3 900 g/m<sup>2</sup>–9 160 g/m<sup>2</sup>.

Vital protect -koe-erä muodosti savua palanutta kappaleen massayksikköä kohden keskimäärin 31 m<sup>2</sup>/kg. Vertailuerään verrattessa tämä tarkoittaa käytännössä n. 37 % pienempää savunmuodostumista.

Flameguardin HCA 40 -koe-erän kartiokalorimetrikokeessa huomattiin heti testien alussa koekappaleiden poikkeava käyttäytyminen muihin testattaviin koe-eriin verrattuna.

Puolet testatuista koekappaleista ei syttynyt kokeen aikana laisinkaan. HCA 40 -palosuoja-aineella kyllästettyjen koekappaleiden pinta alkoi heti testin alussa kuplia voimakkaasti. Kuplimisen seurauksena koekappaleiden pintaan muodostui eräänlainen eristekerros, joka esti koekappaleiden syttymisen n. puolelta testatuista koekappaleista. Syttyneille koekappaleille oli ominaista se, että koekappaleiden pinnalle ei muodostunut yhtä paksua eristekerrosta kuin niille koekappaleille, jotka eivät syttyneet ollenkaan.

HCA 40 -palosuoja-aineella kyllästetystä (taulukko 7) koe-erästä poltettiin 15 ensimmäistä koekappaletta samalla  $50 \text{ kW/m}^2$ :n lämpövirrantiheydellä kuin muissakin koeerissä. Loppujen kymmenen koekappaleen testaamista varten päätettiin lämpövirrantiheyttä hieman nostaa, jolloin päädyttiin  $65 \text{ kW/m}^2$ :n lämpövirrantiheyteen. Lämpövirrantiheyden nostolla ei näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta koekappaleiden syttävyyteen, sillä 4 koekappaletta 10:stä ei syttynyt. Lämpövirrantiheyden nostamisella huomattiin olevan vaikutusta kuitenkin koekappaleiden syttymisaikaan ja lämmöntuottoon, sillä syttyneiden koekappaleiden syttymisajat olivat pienempiä ja lämmöntuottoarvot kasvoivat.

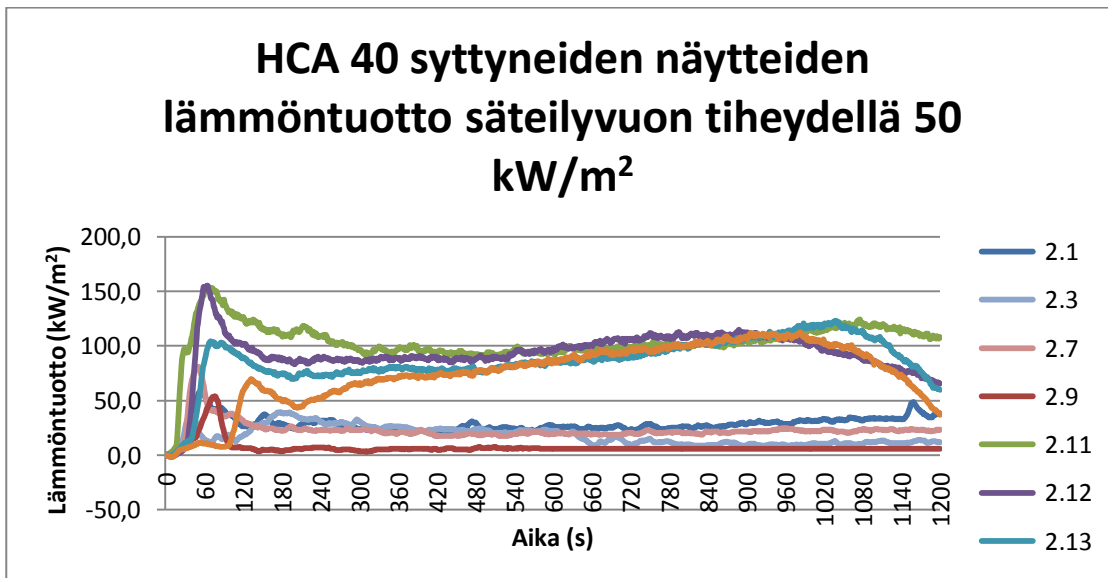
TAULUKKO 7. HCA 40 -koe-erien kartiokalorimetrikokeen tulokset

näyte	$t_{ig}$ s	HRR <sub>60s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>180s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>300s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>max</sub> kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	massa häviö g/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	SEA m <sup>2</sup> /kg
2.1	29,8	40,0	33,3	31,0	59,8	44,6	6370	7,0	178,5
2.2	ei syt	3,2	5,7	1,3	13,1	3,6	2770	1,3	243,7
2.3	22,7	21,1	25,0	27,0	39,4	21,7	4350	5,0	181,0
2.4	ei syt	5,2	9,1	8,4	17,3	5,6	2850	2,0	184,1
2.5	ei syt	4,8	6,3	7,6	18,1	5,3	3010	1,8	260,8
2.6	ei syt	7,0	7,8	8,5	16,7	5,5	2910	1,9	232,9
2.7	21,5	49,0	35,4	30,4	81,1	29,9	6170	4,8	258,2
2.8	ei syt	6,8	8,5	8,3	14,9	5,2	2830	1,8	260,7
2.9	39,8	31,1	13,9	10,4	53,6	4,8	3050	1,6	384,4
2.10	ei syt	5,0	7,1	7,4	13,4	4,7	2750	1,7	228,9
2.11	11,7	105,6	117,8	113	153,4	159,5	9090	17,5	115,0
2.12	27,4	103,2	97,6	93,4	155,3	120	8580	14,0	28,8
2.13	32,2	71,0	77,7	76,7	123,0	107,3	8000	13,4	20,5
2.14	78,2	34,7	46,7	54,7	112,6	92,5	7870	11,8	33,0
2.15	ei syt	3,3	5,4	5,8	19,2	10,8	4850	2,2	132,1
2.16	ei syt	11,7	13,0	13,4	22,7	9,3	3620	2,6	256,9
2.17	33,8	45,5	42,9	43,2	74,2	82,4	8620	9,6	200,3
2.18	50,8	50,0	58,7	55,0	74,2	74,9	7350	10,2	129,2
2.19	31,5	35,8	53,2	51,1	71,5	70,1	7390	9,5	137,7
2.20	14,5	73,6	78,7	75,5	99,5	111,4	8420	13,2	178,9
2.21	ei syt	9,7	12,1	12,9	22,5	9,3	4020	2,3	202,5
2.22	ei syt	9,3	12,1	12,6	21,8	9,3	3930	2,4	169,5
2.23	ei syt	6,5	9,9	10,0	20,8	7,4	4070	1,8	190,1
2.24	6,5	168,7	159,9	146,5	203,0	168,8	9140	18,47	227,2
2.25	6,9	141,2	152,5	141,6	184,1	159,5	8920	17,88	210,2
<b>KA kaikki</b>	<b>29,1</b>	<b>41,7</b>	<b>43,6</b>	<b>41,8</b>	<b>67,4</b>	<b>52,9</b>	<b>5637</b>	<b>7,0</b>	<b>185,8</b>
<b>KA 50 kW/m<sup>2</sup></b>	<b>32,9</b>	<b>32,7</b>	<b>33,2</b>	<b>32,3</b>	<b>59,4</b>	<b>41,4</b>	<b>5030</b>	<b>5,9</b>	<b>182,8</b>
<b>KA 65 kW/m<sup>2</sup></b>	<b>24,0</b>	<b>55,2</b>	<b>59,3</b>	<b>56,2</b>	<b>79,4</b>	<b>70,2</b>	<b>6548</b>	<b>8,8</b>	<b>190,2</b>
<b>KA 50 kW/m<sup>2</sup> sytty- neet</b>	<b>32,9</b>	<b>57,0</b>	<b>55,9</b>	<b>54,6</b>	<b>97,3</b>	<b>72,5</b>	<b>6685</b>	<b>9,4</b>	<b>149,9</b>
<b>KA 65 kW/m<sup>2</sup> sytty- neet</b>	<b>24,0</b>	<b>85,8</b>	<b>91,0</b>	<b>85,5</b>	<b>117,8</b>	<b>111,2</b>	<b>8307</b>	<b>13,1</b>	<b>180,6</b>

Koekappaleiden keskiarvoinen syttymisaika 50 kW/m<sup>2</sup>:n lämpövirrantiheydellä tehdyl-  
lä kartiokalorimetrikokeella oli n. 33 sekuntia. Syttymisaikojen vaihteluväli 11,7–78,2

sekuntia oli melko suuri ja johtuu mitä ilmeisimmin erosta koekappaleiden imeytyneisyydessä. Kyllästämättömään vertailuerään verrattuna syttymisaika on 2 kertaa suurempi ja Vital Protect -koe-erän vastaavaan keskiarvoiseen syttymisaikaan verrattuna on HCA 40 koe-erän syttymisaika n. 2 kertaa pienempi.

Koekappaleiden keskiarvoinen lämmöntuottohuippu  $50 \text{ kW/m}^2$ :n lämpövirrantiheydellä tehdyllä kartiokalorimetrikokeella oli  $59,4 \text{ kW/m}^2$ . Täytyy kuitenkin muistaa, että tähän on otettu mukaan lukuun myös koekappaleet, jotka eivät olleet syttyneet testin aikana. Näin ollen vertailukelpoisempi lämmöntuoton keskiarvo saadaan vain syttyneiden koekappaleiden lämmöntuotosta, joka on tässä tapauksessa  $97,3 \text{ kW/m}^2$ . Vaihteluväli koekappaleiden lämmöntuotossa on  $39,4 \text{ kW/m}^2$ – $155,3 \text{ kW/m}^2$ . Lämmöntuottoa verrattaessa vastaavaan kyllästämättömän vertailuerän lämmöntuottoon, huomataan HCA 40 -palosuoja-aineella kyllästetyn koe-erän tuottaneen yli 3 kertaa vähemmän lämpöä. Vastaavasti Vital Protect -koe-erään verratessa huomataan molempien palosuoja-aineella kyllästettyjen koe-erien sijoittuvan lämmöntuoton osalta melko lähelle toisiaan, HCA 40 -koe-erän tuottaessa n. 6 % vähemmän lämpöä kuin Vital Protect -koe-erä. Lämmöntuoton kehittyminen suhteessa aikaan on esitetty kuviossa 4.

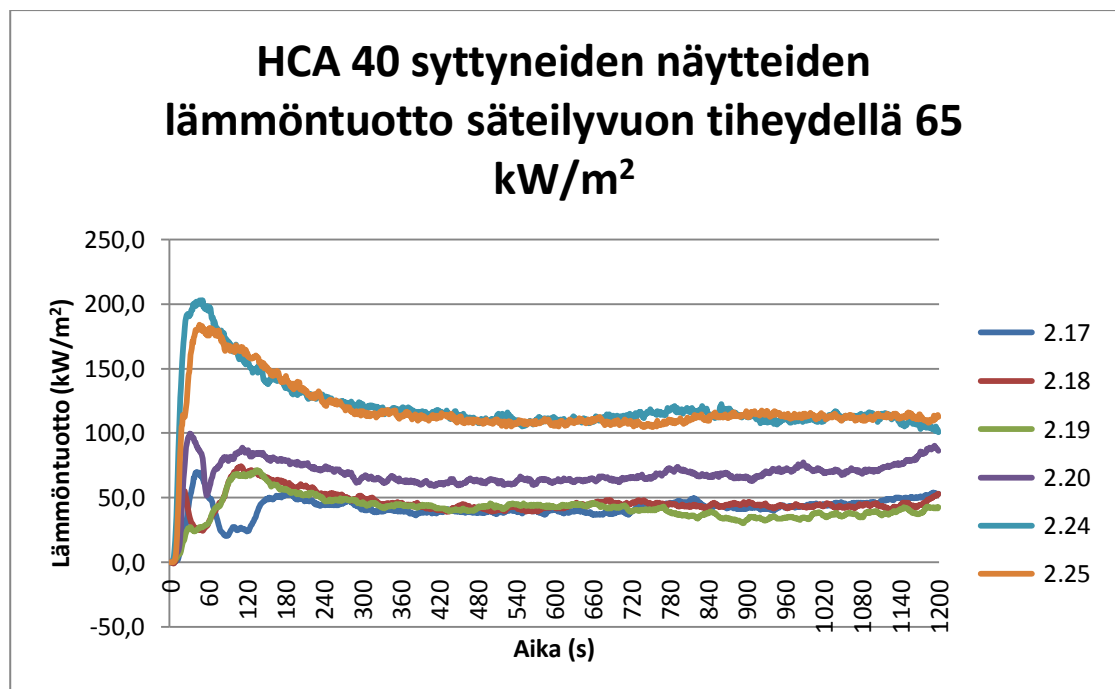


KUVIO 4. HCA 40 -koe-erien keskiarvoinen lämmöntuoton kehittyminen ajan suhteen lämpövirrantiheydellä  $50 \text{ kW/m}^2$

Oheisesta lämmöntuottokäyrästä käy ilmi, että HCA 40 -palosuoja-aineella kyllästetyssä koe-erässä oli kaikista eniten vaihtelua. Koe-erän lämmöntuottokäyrissä on havaittavissa selkeästi 2 erilaista lämmöntuoton kehitysmallia. Toisessa lämmöntuot-

to on koko testin ajan todella alhainen, lämmöntuottohuipun ollessa  $40 \text{ kW/m}^2$ – $50 \text{ kW/m}^2$ , jonka jälkeen lämmöntuotto tasaantuu  $20 \text{ kW/m}^2$ :n tuntumaan. Toisessa mallissa lämmöntuotto kasvaa nopeasti yli  $100 \text{ kW/m}^2$ :iin, jonka jälkeen lämmöntuotto hieman laskee ennen kuin se lähtee nousemaan kohti toista lämmöntuottohuippua. Ensimmäisen mallin mukaiset koekappaleet sijoittuvat epäilemättä Euroluokkaan B, lämmöntuoton ollessa todella alhainen koko testin ajan. Toisen mallin koekappaleissa luokitusennustus voisi olla B tai C.

$65 \text{ kW/m}^2$ :n lämpövirrantiheydellä tehdyssä kartiokalorimetrikokeessa koekappaleet jakautuivat myös kahteen malliin (kuvio 5), joista toisessa lämmöntuotto jäi myös melko alhaiseksi toiseen malliin verrattuna. Varsinaista luokitusennustetta ei voida kuitenkaan tehdä, koska kartiokalorimetrikoe tehtiin  $65 \text{ kW/m}^2$ :n lämpövirrantiheydellä ja Euroluokan luokitusennustetta varten tarvitaan kartiokalorimetrikokeen lämmöntuottokäyrä lämpövirrantiheydellä  $50 \text{ kW/m}^2$ .



KUVIO 5. HCA 40 -koe-erien keskiarvoinen lämmöntuoton kehittyminen ajan suhteen lämpövirrantiheydellä  $65 \text{ kW/m}^2$

$50 \text{ kW/m}^2$ :n lämpövirrantiheydellä tehdyn kartiokalorimetrikokeen tulosten pohjalta laskettu keskiarvoinen massahäviö syttyneille HCA 40 -koe-erän koekappaleille on n.  $6 \text{ 685 g/m}^2$ , vaihteluvälin ollessa  $3 \text{ 050 g/m}^2$ – $9 \text{ 090 g/m}^2$ . Edellä mainittu massahäviö on n. 31 % pienempi kuin vastaava kyllästämättömän vertailuerän kokeen aikana

menettämä keskiarvoinen massa ja n. 16 % pienempi kuin vastaavan Vital Protect -koe-erän menettämä massa.

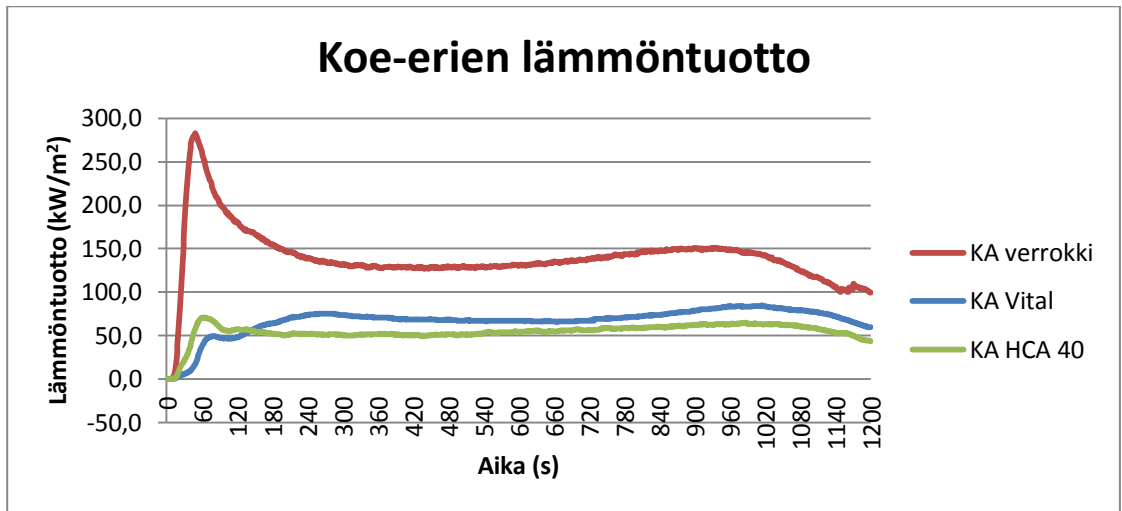
HCA 40 tuotti savua palanutta kappaleen massayksikköä kohden n. 182,8 m<sup>2</sup>/kg, kun otetaan lukuun kaikki 50 kW/m<sup>2</sup>:n lämpövirrantiheydellä testatut koekappaleet. Paremmän vertailtavuuden vuoksi verrataan vain syttyneiden koekappaleiden savunmuodostumista muihin vertailtaviin koe-eriin. Tässä tapauksessa HCA 40 -koe-erän savunmuodostus on n. 149,9 m<sup>2</sup>/kg, joka on jopa suurempi kuin kyllästämättömän vertailuerän vastaava savunmuodostus. Vertailuerä muodostaa n. 3 kertaa vähemmän savua kuin HCA 40 -koe-erä ja vastaavasti Vital Protectiin verratessa on HCA 40 -koe-erän savuntuotto yli nelinkertainen.

Todennäköisesti HCA 40 -koe-erän suuri savunmuodostus johtuu palosuoja-aineen aiheuttamasta epätäydellisestä palamisesta. Varsinkin osa syttyneistä koe-erän kappaleista paloi todella heikolla liekillä. Todennäköisesti heikosti liekehtivä palaminen aiheutti runsaan savunmuodostuksen.

Taulukossa 8 on eritelty kaikkien koe-erien keskiarvoiset koetulokset samassa taulukossa ja kuviosta 6 käy ilmi koe-erien lämmöntuoton kehittyminen ajan suhteen. Kylästämatön koe-erä kuvaa tyypillisen D-luokan tuotteen palokäyttäytymistä. Molemmilla palosuoja-aineilla kyllästetyissä koe-erissä Euroluokitusta saadaan merkittävästi parannettua.

TAULUKKO 8. Kaikkien koe-erien keskiarvoiset koetulokset

koe-erä	t <sub>ig</sub> s	HRR <sub>60s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>180s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>300s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>max</sub> kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	massa häviö g/m <sup>2</sup>	SEA m <sup>2</sup> /kg
<b>Verrokki</b>	13,5	208,1	187,2	167,5	293,8	173,4	18,0	9639	49,6
<b>Vital</b>	67,2	38,3	60,7	65,4	103,2	86,0	10,6	8001	31,0
<b>HCA 40</b>	32,9	57,0	55,9	54,6	97,3	72,5	9,4	6685	149,9



KUVIO 6. Koe-erien keskiarvoinen lämmöntuotto suhteessa kuluneeseen aikaan

Kuten kuviosta käy ilmi palosuoja-aine kyllästys alentaa merkittävästi koekappaleiden (kuva 13) lämmöntuottoa.



KUVA 13. Esimerkkikuva koekappaleiden ulkonäöstä ennen ja jälkeen polttokoetta.  
Kuva Markus Mustonen 2012

## 7.5 Kiinnipysyvyys

Ensimmäisenä tehtiin kartiokalorimetritestaus sääkaapissa olleelle Vital Protect -koe-erälle. Taulukossa 9 on eritelty kaikkien koekappaleiden tulokset ja kuviosta 7 käy ilmi koe-erän keskiarvoinen lämmöntuoton muodostuminen ajan suhteen.

TAULUKKO 9. Vital Protect -koe-erän tulokset

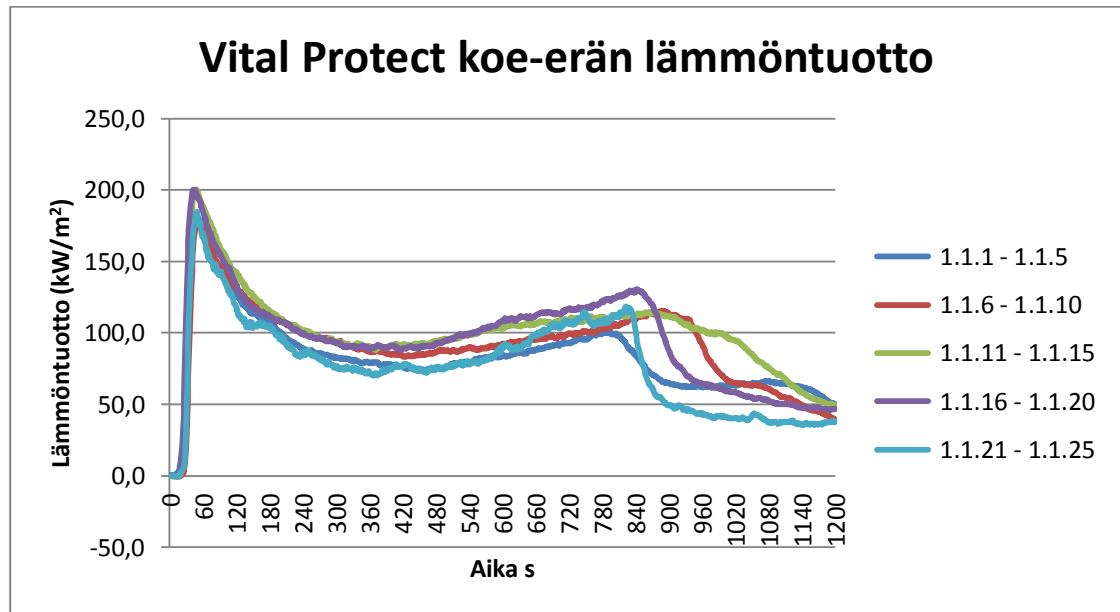
näyte	$t_{ig}$ s	HRR <sub>60s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>180s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>300s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>max</sub> kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	massa häviö g/m <sup>2</sup>	SEA m <sup>2</sup> /kg
1.1.1	15,2	144,9	128,7	111,2	210,8	97,0	14,3	6810	2,3
1.1.2	11,7	140,9	133,5	118,3	193,3	100,5	14,4	6980	1,2
1.1.3	13,7	136,3	126,7	111,1	188,6	95,4	13,7	6950	0,5
1.1.4	24,4	120,9	118,1	104,5	172,2	110,2	12,0	9150	1,2
1.1.5	18,9	117,1	120,6	108,0	167,6	108,3	12,2	8910	0,4
1.1.6	22,3	139,9	131,1	115,7	202,5	110,3	12,4	8880	1,0
1.1.7	20,0	120,8	120,8	111,4	171,1	107,9	12,4	8730	0,3
1.1.8	20,1	110,3	119,3	112,0	160,8	106,4	12,0	8850	0,3
1.1.9	17,2	139,6	143,0	132,4	200,9	125,9	13,3	9440	3,6
1.1.10	19,2	123,5	117,3	105,0	177,7	103,3	12,3	8380	1,1
1.1.11	18,2	142,6	133,3	114,2	202,4	111,5	13,2	8460	0,6
1.1.12	16,9	129,8	123,5	108,7	184,9	100,0	12,3	8110	0,4
1.1.13	14,3	141,6	136,7	123,2	204,9	120,1	13,9	8670	3,6
1.1.14	15,5	158,5	154,7	137,9	218,2	139,7	16,1	8700	38,8
1.1.15	14,7	144,9	143,0	130,5	200,8	137,8	16,1	8570	26,5
1.1.16	15,3	181,8	165,8	149,3	254,7	148,0	16,8	8830	71,5
1.1.17	13,1	138,0	129,0	115,5	183,5	108,8	13,7	7930	0,1
1.1.18	18,1	145,5	132,3	117,8	196,1	111,2	14,0	7920	0,6
1.1.19	17,7	137,2	123,2	109,2	185,8	102,3	13,3	7700	0,8
1.1.20	15,0	140,1	128,4	112,6	193,7	107,3	13,4	8000	0,5
1.1.21	16,9	132,2	134,2	121,2	174,7	117,5	13,5	8670	11,3
1.1.22	16,1	157,4	152,7	137,7	222,1	136,7	15,1	9050	1,6
1.1.23	15,6	152,1	147,8	133,8	211,4	131,8	14,9	8820	4,2
1.1.24	16,4	161,3	157,7	145,6	227,5	142,1	15,6	9090	9,6
1.1.25	20,0	130,7	120,1	105,3	185,0	94,6	12,5	7570	1,3
<b>KA</b>	<b>17,0</b>	<b>139,5</b>	<b>133,7</b>	<b>119,7</b>	<b>195,6</b>	<b>115,0</b>	<b>13,7</b>	<b>8367</b>	<b>7,3</b>

Vital Protect -koe-erä syttyi keskimäärin 17 sekunnissa, vaihteluvälin ollessa 11,7–24,4 sekuntia. Koe-erän lämmöntuoton maksimiarvo oli puolestaan 195,6 kW/m<sup>2</sup>, vaihteluvälin ollessa 160,8–254,7 kW/m<sup>2</sup>.

Vital Protectin kokeen aikana menettämä keskimääräinen massahäviö oli 8 367 g/m<sup>2</sup>. Massahäviön vaihteluväli oli 6 810–9 440 g/m<sup>2</sup>. Sääkaappi testin jälkeen Vital Protect



-koe-erä muodosti savua palanutta kappaleen massayksikköä kohden keskimäärin  $7,3 \text{ m}^2/\text{kg}$ .



KUVIO 7. Vital Protect -koe-erien keskiarvoinen lämmöntuoton kehittyminen ajan suhteen

Kuten kuvion lämmöntuottokäyristä ja taulukon 10 tuloksista huomataan on Vital Protect -koe-erän palo-ominaisuudet heikentyneet huomattavasti 2 viikon sääkaappirasi-tuksen johdosta. Molempien koe-erien koetulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Vital Protect -koe-erien keskiarvoiset koetulokset

näyte	$t_{ig}$ s	$HRR_{60s}$ kW/m <sup>2</sup>	$HRR_{180s}$ kW/m <sup>2</sup>	$HRR_{300s}$ kW/m <sup>2</sup>	$HRR_{max}$ kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	massa häviö g/m <sup>2</sup>	SEA m <sup>2</sup> /kg
Vital	67,2	38,3	60,7	65,4	103,2	86,0	10,6	8001	31,0
Vital <sub>sääkaappi</sub>	17,0	139,5	133,7	119,7	195,6	115,0	13,7	8367	7,3

Sääkaappialistuksessa olleiden koe-kappaleiden syttymisaika on pienentynyt n. 4 kertaa pienemmäksi kuin vastaavien ensimmäisen koe-erän koekappaleiden vastaa-va syttymisaika. Vastaavasti koe-erän lämmöntuotto on kasvanut n. 90 %.

Sääkaapissa olleen koe-erän massahäviö verrattuna aiemmin testattuun koe-erään on kasvanut n. 5 %. Muusta poiketen sääkaapissa ollut koe-erä muodostaa koetulos-ten perusteella n. 4 kertaa vähemmän savua kuin aiemmin testattu koe-erä.

Heikentyneistä palo-ominaisuuksista huolimatta Vital Protect -palosuoja-aineella kylästetyssä koe-erässä on vielä havaittavissa suojaavia ominaisuuksia sääkaappitestin jälkeen. Syttymisajat ovat hieman vertailuerää pidemmät, mutta lämmöntuotto on vielä n. 92 kW/m<sup>2</sup> pienempi eli prosentuaalisesti n. 33 % pienempi kuin vertailuerän lämmöntuotto.

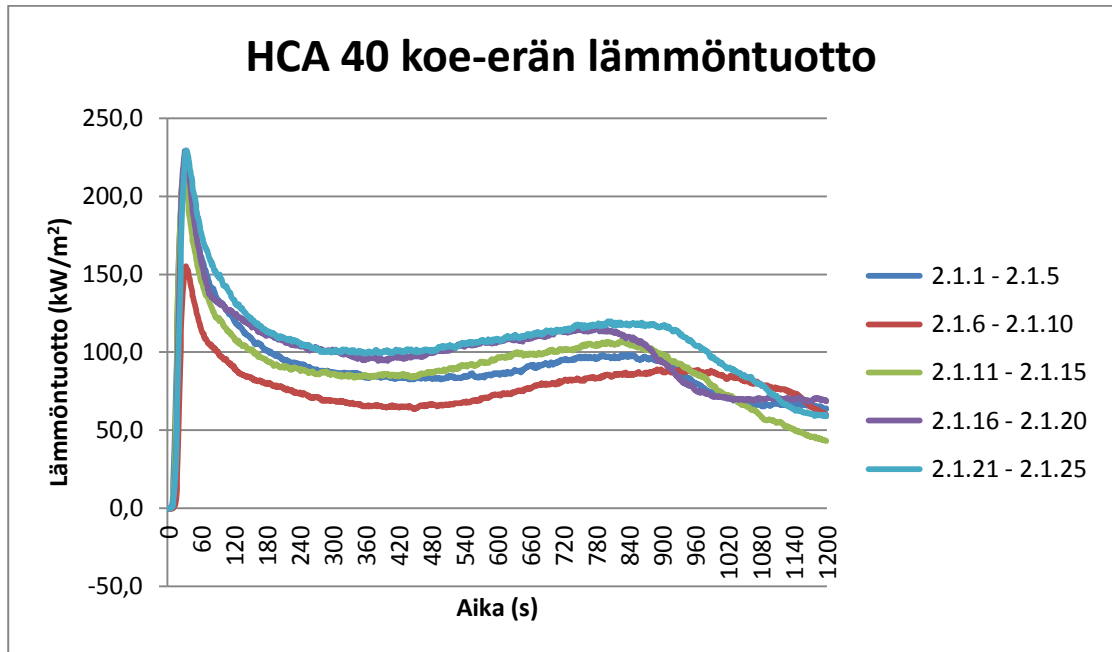
HCA 40 -koe-erässä oli havaittavissa myös selvää heikentymistä palosuojaominaisuuksissa. Taulukossa 11 on esitetty koe-erän tulokset kokonaisuudessaan.

TAULUKKO 11. HCA 40 -koe-erän tulokset

näyte	t <sub>ig</sub> s	HRR <sub>60s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>180s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>300s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>max</sub> kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	massa häviö g/m <sup>2</sup>	SEA m <sup>2</sup> /kg
2.1.1	5,4	170,5	142,8	123,0	227,3	112,8	14,0	8080	19,5
2.1.2	5,0	182,2	149,9	130,5	253,6	120,4	14,7	8210	39,2
2.1.3	4,7	185,2	154,8	136,1	253,0	119,2	14,7	8120	42,5
2.1.4	12,0	124,6	109,6	98,8	172,9	108,6	12,6	8630	3,6
2.1.5	10,2	128,1	107,4	93,7	186,2	99,0	11,7	8450	1,1
2.1.6	10,8	127,0	104,6	91,5	185,2	100,6	11,8	8520	1,5
2.1.7	11,1	111,7	98,4	88,9	158,0	99,4	12,3	8100	2,8
2.1.8	11,8	96,8	85,6	77,3	135,3	92,1	11,7	7890	1,3
2.1.9	11,1	111,1	102,2	93,3	150,4	99,7	12,6	7930	13,2
2.1.10	9,1	106,2	91,6	84,5	154,8	93,2	12,9	7200	0,3
2.1.11	7,3	129,1	117,2	107,6	179,3	116,2	14,9	7820	64,8
2.1.12	5,4	125,2	110,8	98,2	173,3	103,7	14,0	7430	27,1
2.1.13	6,7	170,1	135,3	119,9	242,7	120,5	15,9	7570	23,3
2.1.14	6,7	159,5	125,2	109,9	242,6	104,9	15,4	6830	10,7
2.1.15	5,6	163,0	128,2	111,6	245,3	103,7	15,2	6840	15,6
2.1.16	9,4	133,7	118,1	108,1	193,6	110,9	14,6	7610	3,9
2.1.17	10,1	122,1	113,0	105,8	173,3	108,6	14,5	7500	1,0
2.1.18	9,8	150,3	122,4	108,7	221,6	101,8	14,2	7160	1,4
2.1.19	6,5	181,9	154,2	139,7	275,1	151,2	17,6	8590	57,8
2.1.20	5,8	201,3	167,7	151,4	289,6	160,3	18,6	8620	72,6
2.1.21	4,8	203,1	168,7	149,2	292,3	151,4	18,3	8280	70,1
2.1.22	8,2	155,4	138,5	125,0	233,9	129,2	16,0	8070	3,3
2.1.23	15,5	194,4	169,8	151,3	272,0	143,7	17,3	8330	10,3
2.1.24	8,7	150,2	130,2	117,7	226,4	132,3	16,7	7940	10,0
2.1.25	10,5	130,3	111,8	98,0	175,5	93,4	13,1	7130	0,6
<b>KA</b>	<b>8,5</b>	<b>148,5</b>	<b>126,3</b>	<b>112,8</b>	<b>212,5</b>	<b>115,1</b>	<b>14,6</b>	<b>7874</b>	<b>19,9</b>

Aikaisempaan koe-erään verrattuna, tässä koe-erässä kaikki koekappaleet syttyivät. Tästä voitiin heti päätellä palosuojaominaisuuksien heikentyneen sääkaappitestausen myötä.

HCA 40 -koe-erä syttyi keskimäärin 8,5 sekunnissa, vaihteluvälin ollessa 4,7–15,5 sekuntia. Näin ollen koe-erän syttymisaika pieneni n. nelinkertaisesti aikaisempaan koe-erään verrattuna. Vastaavasti koe-erän lämmöntuotto (kuvio 8) oli keskimäärin  $212,5 \text{ kW/m}^2$ . Koe-erän lämmöntuotto vaihteli  $135,5\text{--}292,3 \text{ kW/m}^2$ :n välillä. Lämmöntuotto vastaavasti kasvoi aikaisempaan koe-erään verrattuna yli kaksinkertaiseksi eli n. 118 %.



KUVIO 8. HCA 40 -koe-erän keskiarvoinen lämmöntuotto suhteessa kuluneeseen aikaan

Sääkaappitestauksen jälkeinen koe-erä jäi hieman vastaavista Vital Protect -koe-erän tuloksista. Lisäksi syttymisajoissa HCA 40 jäi jopa alle vertailuerän tuloksen.

Koe-erän massahäviö oli  $7\,874 \text{ g/m}^2$ , jonka vaihteluväli oli  $6\,830\text{--}8\,630 \text{ g/m}^2$ . Koe-erä muodosti savua  $19,9 \text{ m}^2/\text{kg}$  palanutta kappaleen massayksikköä kohden.

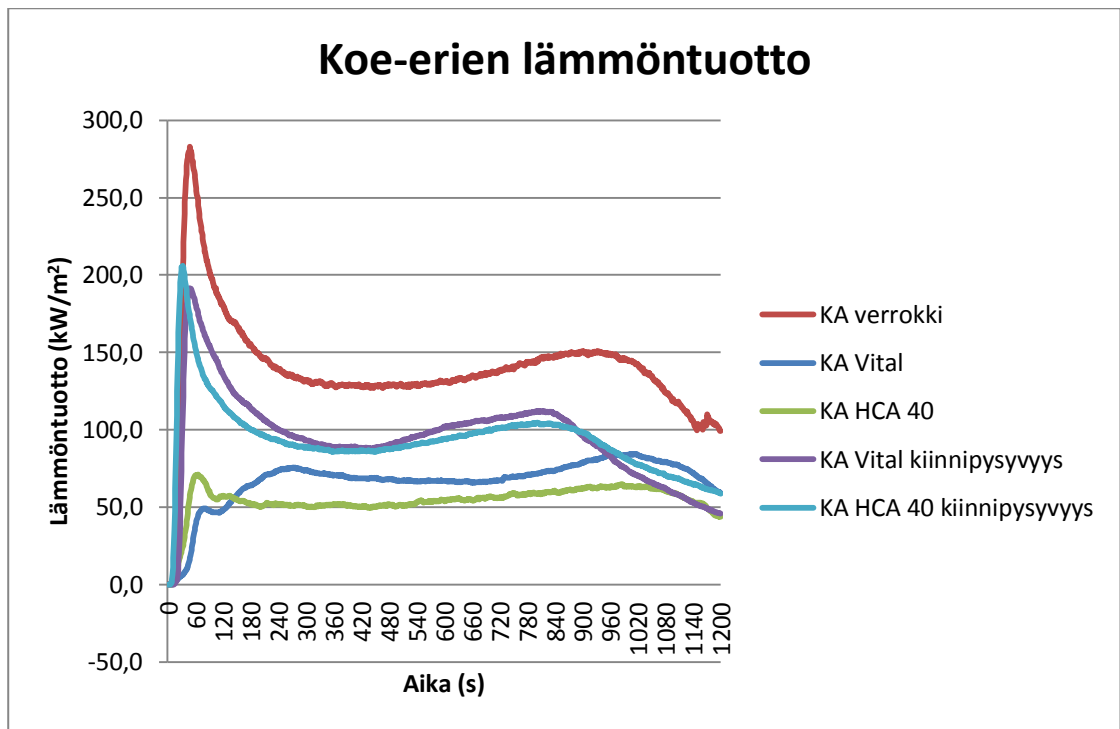
TAULUKKO 12. HCA 40 -koe-erien keskiarvoiset koetulokset

näyte	$t_{ig}$ s	HRR <sub>60s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>180s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>300s</sub> kW/m <sup>2</sup>	HRR <sub>max</sub> kW/m <sup>2</sup>	THR MJ/m <sup>2</sup>	EHC MJ/kg	massa häviö g/m <sup>2</sup>	SEA m <sup>2</sup> /kg
HCA 40	32,9	57,0	55,9	54,6	97,3	72,5	9,4	6685	149,9
HCA 40 <sub>sääkaappi</sub>	8,5	148,5	126,3	112,8	212,5	115,1	14,6	7874	19,9

Sääkaapitestin läpikäyneen HCA 40 -koe-erän (taulukko 12) massahäviö kasvoi n. 18 % aikaisemmin poltettuun koe-erään verrattuna. Kuten Vital Protect -koe-erässäkin niin myös HCA 40 -koe-erässä huomattiin sääkaapitestin läpikäyneen koe-erän tuottaneen vähemmän savua kuin aikaisemmin poltetussa koe-erässä, jolle sääkaapitestausta ei tehty. HCA 40 -koe-erässä savuntuotto pieneni yli seitsenker-  
taisesti.

Palosuojaominaisuuksien merkittävästä heikkenemisestä huolimatta koe-erän läm-  
möntuotto oli silti merkittävästi alhaisempi kuin kyllästämättömän vertailuerän. Sää-  
kaapitestin läpikäynyt HCA 40 -koe-erä tuotti lämpöä yhä n. 28 % vähemmän kuin  
kyllästämätön vertailuerä.

Kaiken kaikkiaan oli melko selvää, että 2 viikon säärasitus heikensi merkittävästi koe-  
erien palosuojaominaisuuksia molemmilla palosuoja-aineilla. Ennen sääkaapitesta-  
usta tutkituista koe-eristä kävi ilmi, että suurella joukolla Vital Protect ja HCA 40 -  
palosuoja-aineilla kyllästetyistä koekappaleista oli mahdollisuuksia täyttää B-luokan  
asettamat vaatimukset. Sääkaapitestausten jälkeen koekappaleiden luokitus ennus-  
te kuitenkin putoaa. Lämmöntuoton jäädessä kuitenkin selvästi vertailuerää alhai-  
semmaksi on mahdollista, että koekappaleet pystyvät täyttämään C-luokan vaati-  
mukset. Kuviosta 9 käy ilmi jokaisen koe-erän keskiarvoinen lämmöntuotto suhteutet-  
tuna kuluneeseen aikaan.



KUVIO 9. Kaikkien koe-erien keskiarvoinen lämmöntuotto suhteessa aikaan

Koetuloksista huomattiin, että Vital Protect -koe-erässä tutkitut ominaisuudet heikkenivät keskiarvoisesti vähemmän kuin vastaavassa HCA 40 -koe-erässä. Näin ollen voidaan todeta Vital Protect -palosuoja-aineen säilyttävän ominaisuutensa paremmin säärasisituksen jälkeen kuin HCA 40 -palosuoja-aine.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää käytännön testauksien avulla tutkimuskohteena olleiden palosuoja-aineiden ominaisuuksien erot ja tehdä niistä vertailu. Vital Protect ja HCA 40 -palosuoja-aineiden ominaisuudet ja eroavaisuudet saatiin selvitettyä laboratoriotestien avulla. HCA 40 -palosuoja-aineella kyllästetyssä koe-erässä huomattiin selkeästi ulkonäössä tapahtunut muutos. Koe-erän pintaan muodostui kyllästysprosessin jälkeen, koekappaleiden kuivuttua, valkea suolakerros. Vital Protect -koe-erässä merkittävää muutosta koe-erän ulkonäössä ei havaittu.

Molempien koe-erien kyllästykseen käytettiin 40 l palosuoja-ainetta. Kyllästyksen jälkeen Vital Protect -palosuoja-ainetta poistettiin kyllästyskaukalosta n. 32 l ja HCA 40 -palosuoja-ainetta n. 30 l. Kaiken kaikkiaan Flameguardin HCA 40 -palosuoja-ainetta saatiin imeytettyä keskimäärin n.  $542 \text{ kg/m}^3$  ja Vital Protect -suoja-ainetta n.  $454 \text{ kg/m}^3$ . Käytännössä siis HCA 40 -palosuoja-aineen imeytymä oli n.  $90 \text{ kg/m}^3$  suurempi kuin Vital Protect -suoja-aineen imeytymä.

Kartiokalorimetrikokeissa ennen varsinaisten palosuoja-aineilla kyllästettyjen koe-erien testaamista, tehtiin kokeet kyllästämättömälle vertailuerälle. Kyllästämätön koe-erä simuloi työssä D-luokan materiaalin palokäyttäytymistä. Suuri joukko Vital Protect ja HCA 40 -koe-erien koekappaleista mitä ilmeisimmin pystyi saavuttamaan B-luokan vaatimukset.

HCA 40 -koe-erässä n. puolet testatuista näytteistä ei syttynyt testien aikana lainkaan. Koekappaleiden pinta alkoi heti testin aluksi kuplia voimakkaasti, jonka jälkeen koekappaleiden pintaan muodostui nopeasti eristävä kerros, joka todennäköisesti esti koekappaleiden syttymisen. Syttyneiden näytteiden pinnassa ei havaittu yhtä voimakasta kuplintaa, jolloin pintaan ei myöskään syntynyt yhtä tehokasta eristekerrosta vaan koekappaleet pääsivät syttymään. Kokeen aikana syttyneiden HCA 40 -koe-erän koekappaleiden syttymisaika oli n. 2 kertaa pienempi kuin Vital Protect -koe-erän syttymisaika. HCA 40 -koe-erässä syttyneiden näytteiden lämmöntuotto oli melko lähellä vastaavaa Vital Protect -koe-erän keskimääräistä lämmöntuottoa, sillä HCA 40 -koe-erä muodosti n. 6 % vähemmän lämpöä. HCA 40 -koe-erän massahäviö puolestaan oli n. 16 % pienempi kuin Vital Protect -koe-erän. HCA 40 -koe-erän savunmuodostus oli poikkeuksellisen suurta, sillä koe-erän savunmuodostus pinta-ala suhteessa palaneeseen kappaleen massayksikköön oli n. nelinkertainen Vital Protect -koe-erään verrattuna. Suuri savunmuodostus HCA 40 -koe-erässä johtuu

ilmeisesti palosuoja-aineen aikaansaamasta epätäydellisestä palamisesta, joka kävi ilmi koekappaleiden heikosta liekehtimisestä palamisen yhteydessä.

Molempien koe-erien palonkesto-ominaisuudet heikkenivät merkittävästi kiinnipysyvyyden määrittämiseksi tehdyn 2 viikon säärasituksen johdosta. Huolimatta suuresta ominaisuuksien heikkenemisestä, molemmilla koe-erillä oli vielä havaittavissa selvä ero kyllästämättömään vertailuerään nähden. Kartiokalorimetrikokeen koetulosten perusteella havaittiin Vital Protect -koe-erässä palo-ominaisuuksien muuttuneen prosentuaalisesti vähemmän kuin HCA 40 -koe-erässä.

Enimmäkseen palosuoja-aineiden ominaisuuksien tutkiminen kartiokalorimetrikokeilla onnistui hyvin. Kokeiden jälkeen oli selvästi havaittavissa palosuoja-aineiden, puun palonkestävyyttä parantava vaikutus. Kartiokalorimetrikokeiden avulla saatiin helposti selvitettyä, myös tutkimuskohteena olleiden palosuoja-aineiden erot toisiinsa nähden. Jatkotutkimuksiin olisi hyvä ottaa muutama tutkimuskohde lisää. Tässä työssä tutkittujen palosuoja-aineiden lisäksi voisi vertailuun ottaa mukaan muutamia muita puuteollisuudessa merkittävästi käytettäviä palosuoja-aineita, jolloin saataisiin laajempi käsitys eri palosuoja-aineiden eroista. Jatkossa voisi myös tutkia, kuinka tutkittavat palosuoja-aineet säilyttävät ominaisuutensa pintakäsittelyn jälkeen tai sitä onko palosuojakyllästyksellä minkälaisia vaikutuksia puun lujuusominaisuuksiin.

## LÄHTEET

Canadian Wood Council. Fire retardant treated lumber and plywood [viitattu 17.9.2011]. Saatavissa: <http://www.cwc.ca/index.php/en/mainmenuwoodproducts-cwcmenutopmenu?id=228>

Fire safety in timber buildings [verkkodokumentti]. VTT [viitattu 1.6.2011]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/files/research/tic/fire\\_safety/technical\\_guideline\\_summary\\_spinfo\\_2010\\_31\\_fin.pdf](http://www.vtt.fi/files/research/tic/fire_safety/technical_guideline_summary_spinfo_2010_31_fin.pdf)

Hakkarainen, T., Mikkola, E., Östman, B., Tsantaridis, L., Brumer, H. & Piispanen, P. 2005. InnoFireWood. Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications [verkkodokumentti]. VTT [viitattu 6.6.2011]. Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/ifw-stateoftheart.pdf>

Hakkarainen, T. & Mikkola, E. Palosuojattujen puutuotteiden palokäyttäytymisen arviointi [verkkodokumentti]. VTT [viitattu 10.5.2011]. Saatavissa: [http://www.pelastusopisto.fi/pelastus/hankkeet/ptr/home.nsf/files/Palosuojattujen%20puutuotteiden%20palok%C3%A4ytt%C3%A4ytymisen%20arviointi/\\$file/Palosuojattujen%20puutuotteiden%20palok%C3%A4ytt%C3%A4ytymisen%20arviointi.pdf](http://www.pelastusopisto.fi/pelastus/hankkeet/ptr/home.nsf/files/Palosuojattujen%20puutuotteiden%20palok%C3%A4ytt%C3%A4ytymisen%20arviointi/$file/Palosuojattujen%20puutuotteiden%20palok%C3%A4ytt%C3%A4ytymisen%20arviointi.pdf)

Nurmi, A., Hakkarainen, T. & Kevarinmäki, A. 2010. Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus [verkkodokumentti]. VTT [viitattu 6.3.2012]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W146.pdf>

Paloturvallinen puutalo [verkkodokumentti]. Wood Focus [viitattu 1.6.2011]. Saatavissa: [http://customers.evianet.fi/woodfocus/view.php?woodfocusid=2&page=document&document\\_id=1148&anonymous=nobody](http://customers.evianet.fi/woodfocus/view.php?woodfocusid=2&page=document&document_id=1148&anonymous=nobody)

Pohjanmaanpelastuslaitos. Onnettomuuksien ehkäisy. Rakenteellinen paloturvallisuus. Paloluokat [viitattu 17.9.2011]. Saatavissa: <http://www.pohjanmaanpelastuslaitos.fi>

Puuinfo. Puu materiaalina. Paloteknisiä ominaisuuksia [viitattu 19.4.2011]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi>



Puun monet mahdollisuudet [verkkodokumentti]. Suomen metsäyhdistys [viitattu 6.6.2011]. Saatavissa:

[http://www.forest.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/Images/57B97844C2D9571CC22575900031D254/\\$file/Puun\\_monet\\_mahdollisuudet.pdf](http://www.forest.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/Images/57B97844C2D9571CC22575900031D254/$file/Puun_monet_mahdollisuudet.pdf)

Puurakentamisen asema rakentamismääräyksissä [verkkodokumentti]. Ympäristöministeriö [viitattu 17.9.2011]. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=123032>

Rakennuslaine. Palosuojaus [viitattu 13.4.2012]. Saatavissa:

<http://rakennuslaine.fi/palosuojaus.html>

RakMK E1. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2011 [verkkodokumentti]. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta [viitattu 30.1.2012]. Saatavissa: [http://www.finlex.fi/data/normit/37126-E1\\_2011-fi.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/37126-E1_2011-fi.pdf)

SFS-EN 13823 2010. Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto

SFS-EN ISO 9239-1 2010. Reaction to fire tests for floorings. Part 1: Determination of burning behavior using a radiant heat source. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto

SFS-ISO 5660-1 2002. Reaction to fire tests: heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto

SFS-EN ISO 11925-2 2002. Reaction to fire tests-Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single-flame source test. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto

VTT. Paloturvallisia puutuotteita vaativiin kohteisiin [viitattu 19.4.2011]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/uutta/2006/20060803.jsp>



