

# **POLYURETAANIERISTEISTEN SANDWICH-ELEMENTTIEN OSALLISTUMINEN PALOON**

Tuomas Paloposki ja Tuula Hakkarainen  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT

## **Tiivistelmä**

VTT on toteuttanut vuosina 2000–2002 laajan koeohjelman, jonka puitteissa tutkittiin polyuretaanieristeisten sandwich-elementtien palokäyttäytymistä suhteessa palon kehittymisen rajoittamiselle asetettuihin luokkavaatimuksiin. Koeohjelma sisälsi sekä täyden mittakaavan kokeita (ISO 9705 palokammio-koee, ISO 13784-1 ja 13784-2) että keskisuuren mittakaavan kokeita (EN 13823 SBI-koee) useille erilaisille elementeille.

Koeohjelman tulokset osoittivat, että polyuretaanieristeen osallistuminen paloon riippuu eristeen koostumuksesta ja elementtien välisen sauman rakenteesta. Valitsemalla oikeat ratkaisut voidaan valmistaa polyuretaanieristeisiä sandwich-elementtejä, jotka täyttävät lämmöntuoton osalta jopa luokan B vaatimukset. Havaittiin myös, että täyden mittakaavan ja keskisuuren mittakaavan kokeissa saadut tulokset vastasivat toisiaan hyvin. Näin kävi sekä niissä kokeissa, joissa elementtien palokäyttäytyminen täytti B-luokan lämmöntuottovaatimukset, että niissä kokeissa, joissa elementtien palokäyttäytyminen vastasi alhaisempia luokkavaatimuksia.

## **TAUSTA**

Sandwich-rakenne muodostuu kahdesta pintakerroksesta ja niiden väliin jäävästä ytimestä, jotka on kiinnitetty toisiinsa ja muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden. Rakenne on luja mutta kevyt ja onkin alunperin kehitetty lentokoneita varten. Sandwich-rakenne muistuttaa poikkileikkaukseltaan englantilaista voileipää ja tämä mielleyhtymä on muodostunut niin vahvaksi ettei rakenteen suomenkielinen nimitys kerroslevy ole edes vakiintunut käyttöön.

Rakennusalalla sandwich-tekniikkaa sovelletaan seinä- ja kattoelementeissä. Keveyden ja lujuuden lisäksi saavutetaan sandwich-elementeillä myös hyvä lämmöneristys ja tiiviys sekä yksinkertainen ja nopea asennus.

Sandwich-elementtien pintakerrokset ovat tavallisesti teräsohutlevyä ja ydin lämmöneristemateriaalia. Teräsohutlevyt voivat olla tasomaisia tai lievästi muotoiltuja ja ovat lisäksi usein pinnoitettuja. Lämmöneristemateriaalina käytetään sekä mineraalivilloja että muovipohjaisia eristeitä. Elementtien reunat varustetaan ponteilla, jotka asennettaessa muodostavat tiiviin sauman. Saumarakenteen yksityiskohdilla on tärkeä merkitys lämmöneristyksen sekä ilma- ja vesitiiviyyden kannalta.

Sandwich-elementtien paloturvallisuutta arvioitaessa on tärkeää pystyä ennustamaan missä määrin lämmöneristemateriaali osallistuu paloon. On huomattava, että muovipohjaisen eristeen käyttö ei suinkaan automaattisesti johda huonoon paloturvallisuuteen. Lämmöneristemateriaali, ulkopinnat ja saumarakenteet muodostavat kokonaisuuden, joka oikein

suunniteltuna ja toteutettuna tarjoaa korkeamman turvallisuustason kuin mihin lämmön-eristemateriaalin ominaisuudet yksinään riittäisivät.

Tässä työssä tutkittiin polyuretaanieristeisten sandwich-elementtien osallistumista paloon useilla eri testimenetelmillä. Testituloksia verrattiin niinsanottuihin euroluokkiin eli niihin luokittelusääntöihin, joihin perustuvat myös Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 vuonna 2002 annetut palon kehittymisen rajoittamista koskevat vaatimukset [1]. Työssä ei tutkittu palonkestävyyttä eli palokäyttäytymistä suhteessa niihin vaatimuksiin, joilla pyritään rajoittamaan palon leviämistä osastosta toiseen.

## KOEOHJELMA

### Tutkitut sandwich-elementit

Tässä esityksessä vertaillaan taulukossa 1 esitettyjä kolmea elementtityyppiä. Taulukossa mainitun standardin DIN 4102-1 mukainen paloluokitus perustuu materiaalin käyttäytymiseen altistuksen ollessa tulitikon liekkiä vastaava pienen propaanikaasupolttimen liekki [2]. Elementtityyppi PUR-SE1 muodostaa perustason, johon vertailtaessa PUR-SE2 näyttää paremman luokitus tuloksen saaneella lämmön-eristemateriaalilla saavutettavat edut. Elementtityypissä PUR-SE0 on lämmön-eristemateriaalin lisäksi kiinnitetty erityishuomiota elementtien välisten saumojen rakenteeseen.

*Taulukko 1. Vertailtavat sandwich-elementit.*

Elementtityyppi	Lämmön-eriste		Saumarakenne
	Paloluokitus standardin DIN 4102-1 mukaan	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	
PUR-SE0	B2	39	parannettu
PUR-SE1	B3	38	normaali
PUR-SE2	B2	41	normaali

### Testimenetelmät

Käytetyt testimenetelmät on esitetty taulukossa 2 [3–6]. Testeissä käytettävien koekappaleiden mitat ja niihin kohdistettava paloaltistus on kuvattu taulukossa 3. Kuvassa 1 on valokuvia koekappaleista.

Standardien ISO 9705 ja ISO 13784 mukaiset testit ovat täyden mittakaavan kokeita, eli koekappale on periaatteessa täysikokoinen huone, jonka seinät ja katto on valmistettu tutkittavasta materiaalista (tässä tapauksessa siis sandwich-elementeistä). Standardin EN 13823 mukaisissa testeissä (SBI-kokeissa) käytettävä koekappale on kahden 1,5 m korkean seinämän muodostama nurkkaus, eli siis huomattavasti pienempi kuin em. testeissä käytettävät koekappaleet mutta kuitenkin toisaalta isompi kuin perinteisissä materiaalien palokäyttäytymisen testaamiseen liittyvissä kokeissa käytettävät koekappaleet. SBI-kokeita voidaan tämän vuoksi kutsua keskisuuren mittakaavan kokeiksi.

Kaikissa tämän työn puitteissa käytetyissä testimenetelmissä saadaan paloaltistus aikaan propaanikaasupolttimella, joka sijoitetaan koekappaleen nurkkaan tai seinän vierelle lattian tasoon. Tehotasot ja altistusajat on esitetty taulukossa 2. Vaikka polttimien mitoissa sekä käytettävissä tehotasoissa ja altistusajoissa esiintyykin vaihteluita, on koekappaleen pinta-alayksikölle kohdistuvan palorasituksen huippuarvojen todettu olevan kaikissa tapauksissa melko lähellä toisiaan (n. 40...60 kW/m<sup>2</sup>) [7–10].

*Taulukko 2. Käytetyt palotestimenetelmät. Elementille PUR-SE0 tehdyissä SBI-kokeissa käytettiin kolmea identtistä koekappaletta. Elementeille PUR-SE1 ja PUR-SE2 tehdyissä SBI-kokeissa käytettiin kummassakin kahta rakenteeltaan hieman toisistaan poikkeavaa koekappaletta, joita merkitään jatkossa tunnuksilla "a" ja "b".*

	EN 13823 (SBI)	ISO 9705 (palokammio)	ISO 13784-1	ISO 13784-2
PUR-SE0	3 koetta	1 koe	1 koe	1 koe
PUR-SE1	2 koetta	1 koe	–	–
PUR-SE2	2 koetta	1 koe	–	–

*Taulukko 3. Koekappaleiden mitat ja niihin kohdistettava paloaltistus tässä työssä sovelletuissa palotestimenetelmissä.*

Menetelmä	Koekappaleen mitat			Paloaltistus (kesto aika / polttimen kokonaisteho)	Huomautuksia
	Korkeus [m]	Leveys [m]	Pituus [m]		
EN 13823 (SBI)	1,5	1,5	–	20 min / 30 kW	Koekappale on kahden seinämän muodostama nurkka
ISO 9705 (palokammio)	2,4	2,4	3,6	10 min / 100 kW 10 min / 300 kW	Koekappale on palokammion sisälle rakennettu huone
ISO 13784-1	2,4	2,4	3,6	10 min / 100 kW 10 min / 300 kW	Koekappale on vapaasti seisova huone
ISO 13784-2	4,0	4,8	4,8	5 min / 100 kW 5 min / 300 kW 5 min / 600 kW	Koekappale on vapaasti seisova huone



*Kuva 1. Koekappaleita. Vasemmalla: SBI-testin koekappale. Keskellä: palokammiotestin koekappale palokammion oviaukosta katsottuna. Oikealla ISO 13784-2 -testin koekappale.*

SBI-kokeissa, palokammiokokeessa (ISO 9705) ja standardin ISO 13784-1 mukaisessa kokeessa johdetaan palamisessa syntyvät savukaasut keräilykuvun kautta poistokanavaan, jossa mitataan kaasun lämpötila, virtausnopeus, happi-, hiilidioksidi- ja hiilimonoksidi-pitoisuudet sekä savuhiukkasten aiheuttama valonsäteen vaimennus. Mitatuista suureista voidaan laskea lämmön- ja savuntuotto kokeen aikana. Standardin ISO 13784-2 mukaisessa kokeessa mitataan ainoastaan koekappaleen lämpötiloja eri kohdissa sekä kaasun lämpötiloja koekappaleen oviaukossa.

Tässä työssä vertaillaan tutkittuja elementtejä ainoastaan lämmöntuoton osalta, sillä savuntuoton osalta ei täyden mittakaavan kokeille ole sovittu yleiseurooppalaisesti hyväksytyjä luokkarajoja. Tarkasteltavat luokituskriteerit ovat seuraavat:

- SBI-kokeessa ovat luokituksen perusteena lämmöntuoton kasvunopeus (FIGRA) ja kokonaislämmöntuotto paloaltistuksen ensimmäisten 600 sekunnin aikana ( $THR_{600s}$ ). Lisäksi luokituksessa huomioidaan liekin leviäminen koekappaleen pinnalla sivusuunnassa (LFS), mutta nyt tarkasteltavien sandwich-elementtien kannalta ei tämä kriteeri ollut merkittävä, sillä yhdessäkään kokeessa ei tapahtunut merkittävää liekin leviämistä sivusuunnassa. SBI-kokeiden tuloksiin sovellettavat luokitusvaatimukset on esitetty taulukossa 4 [11].
- Palokammiokokeessa voidaan luokituksen perusteena käyttää vaihtoehtoisesti joko lämmöntuoton kasvunopeutta ( $FIGRA_{RC}$ ) tai aikaa paloaltistuksen alusta lieskahduksen tapahtumiseen [11,12]. Nämä kaksi kriteeriä ovat yleensä täysin toisiaan vastaavia, mutta eräissä erikoistapauksissa ne voivat antaa toisistaan poikkeavat luokitustulokset [13]. Palokammiokokeiden tuloksiin sovellettavat luokitusvastaavuudet on esitetty taulukossa 5.
- ISO 13784-1 –standardin mukaisiin kokeisiin liittyvät luokitusvaatimukset eivät ole vielä tiedossa, mutta kokeet ovat koekappaleen rakenteen ja kokeessa tehtävien mittausten osalta niin lähellä palokammiokoetta, että tässä työssä verrataan koetuloksia palokammiokokeen luokitusvaatimuksiin.
- ISO 13784-2 –standardin mukaisiin kokeisiin liittyvät luokitusvaatimukset eivät ole vielä tiedossa, joten koetuloksia ei tarkastella enempää tässä esityksessä.

Taulukko 4. SBI-kokeessa asetettavat luokitusvaatimukset lämmöntuoton osalta. On huomattava, että luokitus perustuu useamman koemenetelmän antamiin tuloksiin, ei pelkästään SBI-menetelmään.

Luokka	FIGRA	THR <sub>600s</sub>	LFS
A2 ja B	< 120 W/s	< 7,5 MJ	liekki ei saa levitä koekappaleen leveään sivun ulkoreunaan
C	< 250 W/s	< 15 MJ	liekki ei saa levitä koekappaleen leveään sivun ulkoreunaan
D	< 750 W/s	ei vaatimusta	ei vaatimusta

Taulukko 5. Palokammiokekeen luokitusvastaavuudet.

Luokka	FIGRA <sub>RC</sub>	Lieskahdusaika
B	< 0,58 kW/s	ei lieskahdusta
C	< 1,5 kW/s	> 10 minuuttia
D	< 7,5 kW/s	> 2 minuuttia

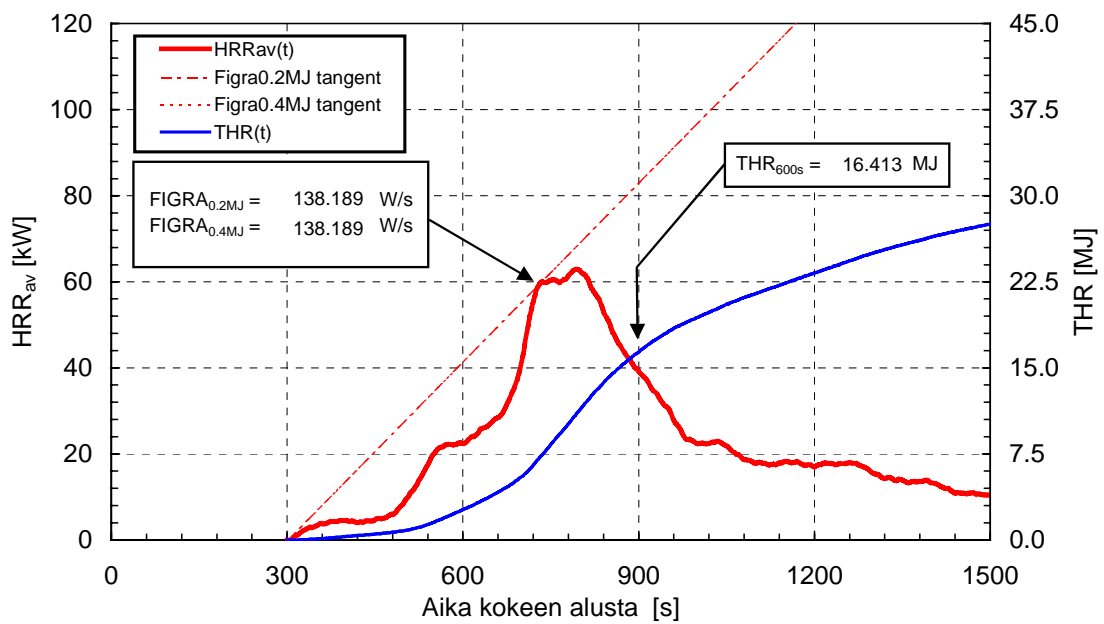
## KOETULOKSET

Kuvassa 2 on esitetty SBI-kokeen mittaustuloksista laskettu lämmöntuotto sandwich-elementille PUR-SE1-a. Kuvassa on esitetty myös, kuinka luokituksen perusteena käytettävät lämmöntuoton kasvunopeus FIGRA ja kokonaislämmöntuotto THR<sub>600s</sub> määräytyvät. Tässä tapauksessa FIGRA-arvo oli 138 W/s ja kokonaislämmöntuotto 16,4 MJ. Lämmöntuoton kasvunopeus lasketaan käyttäen kahta eri lämmöntuoton kynnyсарvoa, mutta tässä kokeessa molemmat laskentatavat antoivat saman arvon.

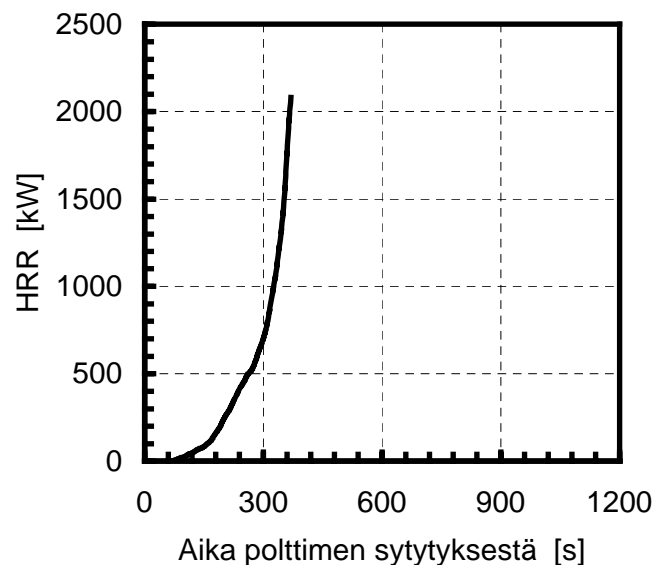
Elementille PUR-SE1-a saadaan kuvassa 2 esitettyjen SBI-koetulosten perusteella lämmöntuoton osalta luokitusarvioksi D. Määrävänä tekijänä oli kokonaislämmöntuotto, joka ylitti C-luokan rajana olevan arvon 15 MJ. Lämmöntuoton kasvunopeuden eli FIGRA-arvon perusteella olisi luokitusarvio ollut C.

Elementille PUR-SE1-b saatiin SBI-kokeen tulosten perusteella luokitusarvioksi C. Erot a- ja b-tyyppin koekappaleilla saaduissa tuloksissa ovat kuitenkin suhteellisen vähäisiä eikä niitä voi nyt saatujen koetulosten perusteella vielä pitää ainakaan kokonaan rakenne-eroista johtuvina.

Kuvassa 3 on esitetty palokammiokekeen mittaustuloksista laskettu lämmöntuotto sandwich-elementille PUR-SE1. Koe päättyi lieskahdukseen kun paloaltistusta oli kestänyt 6 minuuttia 5 sekuntia, mikä vastaa luokitusarviota D. Sama tulos olisi tässä tapauksessa saatu tarkastelemalla lämmöntuoton kasvunopeutta.



Kuva 2. SBI-kokeen mittaustulosten perusteella laskettu lämmöntuotto sandwich-elementille PUR-SE1-a. Paloaltistus alkaa 300 s kuluttua kokeen alusta. Kuvaan on piirretty lämmöntuottoa  $HRR_{av}$  kuvaava käyrä sekä sille piirretty tangentti, jonka avulla määritetään lämmöntuoton kasvunopeus FIGRA. Kuvassa on myös kokonaislämmöntuottoa THR kuvaava käyrä, joka saadaan integroimalla lämmöntuotto ajan suhteen. Kokonaislämmöntuottokäyrä kuvaa siis lämmöntuottokäyrän alle jäävää pinta-alaa.



Kuva 3. Palokammiokokoen mittaustulosten perusteella laskettu lämmöntuotto sandwich-elementille PUR-SE1. Paloaltistus alkaa ajanhetkellä 0 s. Kuvaan on piirretty lämmöntuottoa HRR kuvaava käyrä, joka päättyy lieskahdukseen ajanhetkellä 365 s.

Taulukko 6 sisältää kaikkien SBI-kokeiden tulokset ja taulukko 7 kaikkien täyden mittakaavan kokeiden tulokset. Taulukkoon 8 on koottu yhteenveto koetulosten perusteella saaduista luokitusarvioista. Täyden mittakaavan kokeiden (palokammio, ISO 13784-1) ja keski-suuren mittakaavan kokeiden (SBI) tulokset vastasivat kaikissa tapauksissa hyvin toisiaan.

*Taulukko 6. SBI-kokeiden tulokset. Elementtityypin PUR-SE0 tulokset ovat kolmen yksittäiskokeen keskiarvoja. Muut tulokset ovat yksittäiskokeiden tuloksia.*

Elementtityyppi	FIGRA [W/s]		THR <sub>600s</sub> [MJ]	LFS	Luokitusarvio
	kynnysarvolla 0,2 MJ	kynnysarvolla 0,4 MJ			
	PUR-SE0	33			
PUR-SE1-a	138	138	16,4	ei	D
PUR-SE1-b	94	94	10,6	ei	C
PUR-SE2-a	55	55	5,8	ei	B
PUR-SE2-b	70	70	7,4	ei	B

*Taulukko 7. Palokammio-kokeiden (ISO 9705) ja ISO 13784-1 –kokeen tulokset. Elementin PUR-SE2 lämmöntuoton kasvunopeus FIGRA<sub>RC</sub> oli itse asiassa hieman korkeampi kuin B-luokan yläraja 0,58 W/s (vertaa taulukkoon 5), joten luokitus olisi tällä perusteella ollut C. Tosiasiassa ei ko. kokeessa saatu lämmöntuoton kasvunopeuden arvo ole mielekäs, sillä korkein arvo saatiin aivan kokeen lopussa, jolloin propaanikaasupolttimen sammuttaminen aiheuttaa mittaustulosten perusteella määritettyyn palotehoon keinotekoisien huipun.*

Elementtityyppi	Testimenetelmä	FIGRA <sub>RC</sub> [kW/s]	Lieskahdusaika [min:s]	Luokitusarvio
PUR-SE0	ISO 9705	0,16	ei lieskahdusta	B
	ISO 13784-1	0,18	ei lieskahdusta	B
PUR-SE1	ISO 9705	2,9	6:06	D
PUR-SE2	ISO 9705	0,60	ei lieskahdusta	B

Taulukko 8. Yhteenvedo koetuloksiin perustuvista luokitusarvioista.

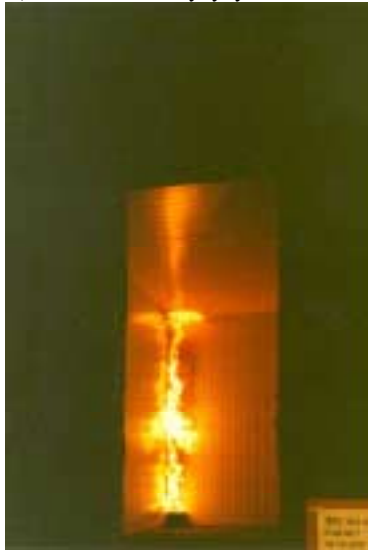
Elementtityyppi	Testimenetelmä		
	EN 13823 (SBI)	ISO 9705 (palokammio)	ISO 13784-1
PUR-SE0	B	B	B
PUR-SE1	C/D	D	
PUR-SE2	B	B	

## SANDWICH-ELEMENTTIEN KÄYTTÄYTYMINEN PALOKAMMIOKOKEESSA

Kuvissa 4 ja 5 havainnollistetaan valokuvien avulla elementtityyppien PUR-SE1 ja PUR-SE2 käyttäytymistä kokeen aikana ja kuntoa kokeen jälkeen. Elementtityyppi PUR-SE2 osallistui paloon selvästi vähemmän kuin PUR-SE1 ja oli vastaavasti myös kokeen jälkeen paremmassa kunnossa kuin PUR-SE1. Elementtityyppi PUR-SE0 osallistui paloon vielä vähemmän kuin PUR-SE2 ja oli kokeen jälkeen vielä paremmassa kunnossa.

Yksikään testatuista koekappaleista ei sortunut kokeen aikana eikä niistä pudonnut osia. Myöskään palavien pisaroiden putoamista ei havaittu. Tähän on osaltaan varmastikin syynä se, että polyuretaani on kertamuovi, joka ei kuumentuessaan sula vaan hiiltyy.

a) 1 minuutti sytytyksestä.



b) 5 minuuttia sytytyksestä.

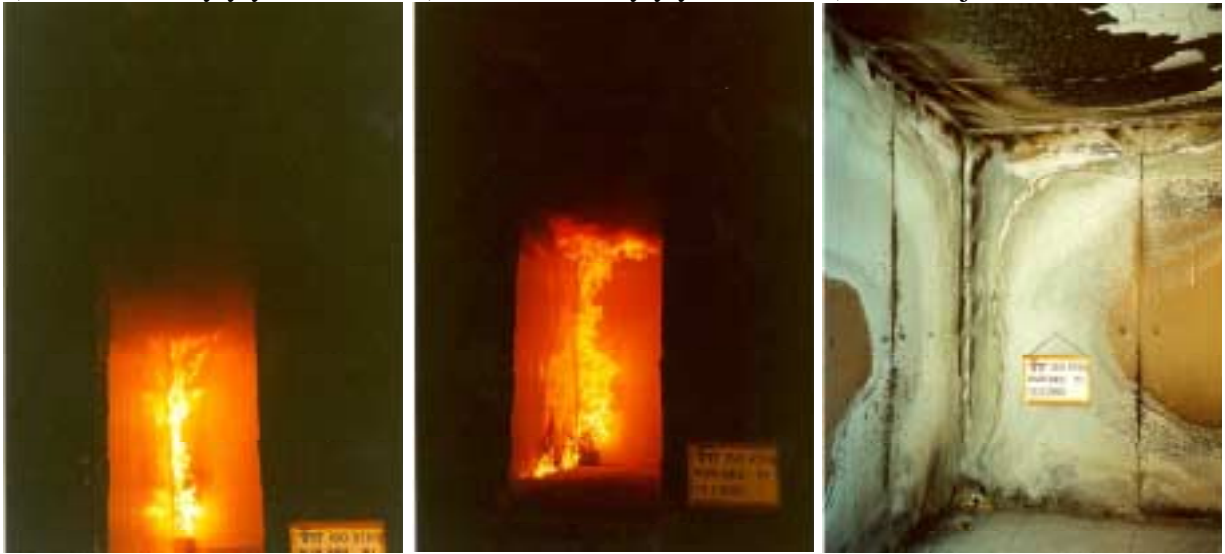


c) Kokeen jälkeen.



Kuva 4. Sandwich-elementti PUR-SE1 palokammiokokeen aikana ja kokeen jälkeen. Vasemmalla tilanne 1 minuutti sytytyksen jälkeen. Kuvassa näkyvä liekki on kokonaisuudessaan propaanikaasupolttimella aiheutettua paloaltistusta, sillä koekappale ei ole vielä syttynyt (vertaa kuvassa 3 esitetty palotehokäyrä). Keskellä tilanne 5 minuuttia sytytyksen jälkeen. Palaminen on voimakasta ja tulee johtamaan lieskahdukseen noin minuutin kuluttua. Oikealla koekappale kokeen jälkeen. Kattoelementtien pintalevy on irronnut ytimestä ja roikkuu seinien varassa, mutta ei ole pudonnut alas.

a) 5 minuuttia sytytyksestä.      b) 11 minuuttia sytytyksestä.      c) Kokeen jälkeen.



*Kuva 5. Sandwich-elementti PUR-SE2 palokammiokokoon aikana ja kokeen jälkeen. Vasemmalla tilanne 5 minuuttia sytytyksen jälkeen. Elementin osallistuminen paloon on edelleen varsin vähäistä. Keskellä tilanne 11 minuuttia sytytyksen jälkeen. Tässä vaiheessa on propaanikaasupolttimella aiheutettu paloaltistus nostettu jo tasolle 300 kW. Oikealla koekappale kokeen jälkeen.*

## **JOHTOPÄÄTÖKSET**

Koetulokset osoittivat, että sandwich-elementeissä käytettävän polyuretaanieristeen osallistuminen paloon riippuu eristeen koostumuksesta ja elementtien välisen sauman rakenteesta. Valitsemalla oikeat ratkaisut voidaan valmistaa polyuretaanieristeisiä sandwich-elementtejä, jotka täyttävät lämmöntuoton osalta jopa luokan B vaatimukset.

Täyden mittakaavan ja keskisuuren mittakaavan kokeissa saadut tulokset vastasivat toisiaan hyvin. Näin kävi sekä niissä kokeissa, joissa elementtien palokäyttäytyminen oli hillittyä ja täytti B-luokan lämmöntuottovaatimukset, että niissä kokeissa, joissa elementtien palokäyttäytyminen oli rajumpaa ja vastasi alhaisempia luokkavaatimuksia.

## **KIITOKSET**

Haluamme kiittää tutkimuksen rahoittajia Muoviteollisuus ry:tä sekä Huurre Group Oyj:tä sekä kaikkia tutkimuksen toteuttamiseen osallistuneita VTT:n palotutkimusryhmän ja palotestausryhmän jäseniä.

## LÄHDELUETTELO

1. Suomen rakentamismääräyskokoelma osa E1, Rakennusten paloturvallisuus, Määräykset ja ohjeet 2002. Ympäristöministeriö 2002.
2. DIN 4102-1:1998-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
3. EN 13823 SBI:2002 Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item.
4. ISO 9705:1993(E) Fire tests - Full-scale room test for surface products.
5. ISO 13784-1:2002 Reaction-to-fire tests for industrial sandwich panels - Part 1: Intermediate-scale test.
6. ISO 13784-2:2002 Reaction-to-fire tests for industrial sandwich panels - Part 2: Large-scale test.
7. R. van Mierlo & B. Sette, The SBI test method - Development decisions and recommendations for use. Interflam 2001, 17-19.9.2001, Edinburgh, Vol. 1 s. 473-484.
8. M. Kokkala, Sensitivity of the Room/Corner Test to variations in the test system and product properties. Fire and Materials 17 (1993) s. 217-224.
9. M. Kokkala, Characteristics of a flame in an open corner of walls. Interflam '93, 30.3.-1.4.1993, Oxford, s. 13-24.
10. R. Brady Williamson, A. Revenaugh & F. Mowrer, Ignition sources in room fire tests and some implications on flame spread evaluation. 3rd International Symposium on Fire Safety Science, 8.-12.7.1991, Edinburgh, s. 657-666.
11. EN 13501-1:2002 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests.
12. Summary of principles leading to the SBI classification system. European Commission Document RG N138, 1998.
13. T. Hakkarainen & Y. Hayashi, Comparison of Japanese and European fire classification systems for surface linings. Fire Science and Technology 21 (2001) s. 19-42.