

# **Kuitueristeet korkealämpötiloissa Toteutus ja käyttö**

Aulis Ranne, Markku Hänninen

VTT Energia

Jaakko Salmi

Polar Merchants Ltd



ISBN 951-38-5468-X  
ISSN 1235-0605  
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Energia, Energiajärjestelmät, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Energi, Energisystem, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Energy, Energy Systems, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Toimitus Leena Ukoski

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Ranne, Aulis, Hänninen, Markku & Salmi, Jaakko. Kuitueristeet korkealämpötiloissa. Toteutus ja käyttö. [Fiber insulation at high temperatures. Construction and use]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1975. 99 s. + liitt. 28 s.

**Avainsanat** thermal insulation, ceramic fibers, modular structures, layered structures, furnaces, blankets, boards, mineral wool, testing, simulation

## Tiivistelmä

Keraamisilla kuiduilla on niin suuri joukko hyödyllisiä ominaisuuksia korkealämpötilaprosessien lämpöeristämässä, että ne ovat syrjäyttämässä perinteiset eristeet useimmissa käyttökohteissa. Keraaminen kuitueriste on vielä nuori tuote, ja siitä valmistettävien eristystuotteiden kehitys jatkuu vielä. Tässä tutkimuksessa selvitettiin koeuunin ja simulointimallin avulla kuiturakenteiden ominaisuuksia ja vertailtiin moduulirakenteisten eristetuotteiden ja kerrosrakenteisten eristeseinämien ominaisuuksia ja toimivuutta. Lisäksi tutkimuksessa on arvioitu kuitueristeiden käytön markkinatilannetta lämpökäsittelyä edellyttävillä teollisuudenaloilla ja soveltamista energiateknologiaan.

Normaalikokoisen koeuunin, jonka testilämpötilat olivat enimmäkseen 1 300 °C, seinät eristettiin erilaisilla keraamisista kuiduista valmistetuilla rakenteilla. Perinteisempi rakennetyyppi eli moduulirakenne koostuu koko eristevahvuudeltaan keraamisesta kuidusta, kun puolestaan uudempi eristerakenne koostuu kerroksittain toisiinsa liimatuista eristehuoista ja -levyistä, joista kuumimmalla puolella on kuitueristehuoja ja ulkoseinän puolella alemmassa lämpötilassa esimerkiksi mineraalivilla.

Kuitueristeet kokonaisuutena selvisivät kokeista hyvin. Kerrosrakenteisissa seinämissä on varmistuttava siitä, että alemman kestävyysluokan eristettä ei sijoiteta liian kuumalle alueelle. Eristeiden lämmönjohtavuus on korkeissa lämpötiloissa 4 - 5-kertainen lähellä ulkopintaa oleviin lämpötiloihin verrattuna. Kuitueristeille on tyypillistä kutistuminen niin, että uunin jäähtyttyä kuitueristeeseen syntyy säröjä, jotka kuumennusvaiheessa pääosiltaan sulkeutuvat. Moduulirakenteisessa seinämässä nämä säröt voivat olla koko eristekerroksen syvyisiä. Kerrosrakenteisessa eristeessä säröt päättyvät kerrosten rajapintaan. Säröjen leveydellä todettiin selvä yhteys kuitueristeen rakenteeseen. Uunin ulkopinnan lämpötilojen ei kuitenkaan todettu säröjen kohdalta nousevan olennaisesti. Kerrosrakenteisen seinämän kohdalta mitattiin hieman alemmat pintalämpötilat kuin moduulirakenteisen.

Kuitueristeiden etuja ovat erityisesti lämpötilan vaihteluiden kestävyys, keveys, helppo asennettavuus ja huollettavuus sekä mahdollisuus tehdasvalmistukseen. Näiden etujen vuoksi kuitueristeillä on mahdollisuutensa myös energiantuotantolaitoksissa kuitenkin huomioon ottaen kemiallinen ja mekaaninen kestävyys.

Ranne, Aulis, Hänninen, Markku & Salmi, Jaakko. Kuitueristeet korkealämpötiloissa. Toteutus ja käyttö. [Fiber insulation at high temperatures. Construction and use]. Espoo 1999, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1975. 99 p. + app. 28 p.

**Keywords** thermal insulation, ceramic fibers, modular structures, layered structures, furnaces, blankets, boards, mineral wool, testing, simulation

## Abstract

Ceramic fibers have a wide range of useful properties in high temperature processes needing insulation, and therefore are replacing the more traditional insulation materials. Ceramic fiber insulation is still quite new and the development of new product is continuous. This study was conducted with a research furnace, also using simulation, in determining the properties of fiber structures, comparisons between modular insulation structures and layer-insulation, their properties and functions. Further, this research has taken into account the market situation of those insulation fibers in high-temperature industrial use as well as their potential application in energy technology.

A normal sized research furnace was heated to a maximum temperature of 1 300 °C. The walls were insulated with various kinds of fiber insulation structures. The traditional structure, that is, the modular structure, was solely composed of ceramic fibers, as opposed to the newer insulation structures comprised of glued layers of different kinds of insulation blankets or insulation boards: fiber insulation blankets on the hotter inside surfaces, and on the cooler outside wall surfaces, for example, mineral wool insulation.

As a whole, the properties of fiber insulation proved to be exceedingly good during these tests. The heat conduction of insulation at high temperatures is 4 - 5 times greater compared to temperatures near the outer wall surfaces. Shrinkage is a common phenomenon in fiber insulation in that during the furnace's cooling process cracks appear which, however, close again when heating commences. In modular structures these cracks may run through the entire depth of the insulation layers. In layered insulation structures these cracks are solely on the outermost fiber layers. A clear difference appears to exist in relation to fiber insulation as far as the widths of those cracks, with no significant growths in surface temperatures along the cracks being noticed during testing. Lower surface temperatures were measured in the structures of layered insulation. In choosing insulation layers, one must make sure that the recommended temperature limits are not exceeded in use.

The benefits of fiber insulation are particularly noticeable in those situations where the fluctuations in temperatures make demands for durability, their light weight, facility of installation and service, plus possible factory production. Due to these benefits fiber insulation also has possibilities in energy production plants, taking into consideration, nevertheless, both chemical and mechanical durability.

# Alkusanat

Julkaisu liittyy Tekesin ohjelman "KESTO-Materiaalit energiatekniikan palveluksessa" projektiin "Kuitueristeet korkealämpötiloissa". Projektin rahoittajina toimivat Tekesin lisäksi VTT Energia ja seuraavat teollisuusyritykset: Outokumpu Polarit Oy, Rautaruukki Oy Halikon tehtaat, Partek Paroc Oy Ab, Oy Sarlin Ab Uunit, Sermet Oy, St Gobain ja Hotman Oy.

Olennaisena osana projektia oli teollisuuden lisäpanostuksena rakennettu koeuuni, jonka rakensivat pääasiassa Hotman Oy ja Oy Sarlin Ab ja merkittäviä materiaalihjoituksia antoivat myös Partek Paroc Oy Ab, St Gobain, Termorak Oy sekä Oilon Oy.

Projektin toteuttamista valvoi seurantaryhmä, jonka puheenjohtajana oli Juha Huotari Sermet Oy:stä sekä jäsenenä Sisko Sipilä Tekes Tuotanto- ja energiateknologiasta, Pertti Heinonen Kuopion Teknologiakeskus Teknia Oy:stä, Martti Sassi Outokumpu Polarit Oy:stä, Fredrik Wikström Oy Ab Sarlinilta, Tommi Siitonen ja Juha Mielikäinen Partek Paroc Oy Ab:stä, Raimo Viertola Hotman Oy:stä ja Jorma Hietalahti Rautaruukki Oy:n Halikon tehtailta. Projektipäällikkönä on toiminut Aulis Ranne VTT Energiasta ja muina tutkijoina Markku Hänninen VTT Energiasta ja Jaakko Salmi Oy Polar Merchants Ltd:stä (projektin alkuvaiheessa VTT Valmistustekniikassa). Projektiin on osallistunut useita VTT Energian mittaus- ja lämpötekniikan asiantuntijoita.

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	3
Abstract .....	4
Alkusanat .....	5
Symboliluettelo .....	8
1. Johdanto .....	9
2. Kuitueristeet ja niistä valmistetut rakenteet .....	10
2.1 Kuitueristeitten kestävyys eri olosuhteissa.....	10
2.1.1 Kuitueristeitten lämmönkestävyys eri atmosfääreissä .....	10
2.1.2 Kuitujen kemiallinen ja eroosiokestävyys korkeissa lämpötiloissa.....	12
2.2 Kuitueristerakenteet ja kiinnitysmenetelmät .....	15
2.3 Keraamisten kuitujen terveydelliset vaikutukset.....	22
3. Koeuunijärjestelyt ja eristysrakenteet .....	26
3.1 Materiaalit .....	26
3.2 Rakenteet .....	29
3.3 Työvaiheet .....	31
3.4 Koeajot ja mittaukset.....	37
4. Koeuunin lämpötekniset tulokset.....	39
4.1 Lämpötilojen mittaus .....	39
4.2 Lämpötilat eristerakenteissa .....	41
4.2.1 Moduulirakenteiset seinämät.....	41
4.2.1.1 Prismobloc .....	41
4.2.1.2 Pyrobloc .....	43
4.2.2 Liimatut eristerakenteet .....	46
4.2.3 Ulkopintojen lämpötilat.....	48
4.3 Palotilan ja savukaasun mittaukset.....	50
5. Materiaalitekniset koeuunitulokset .....	53
5.1 Rakenteiden kestävyys .....	53
5.2 Materiaalien kestävyys .....	54
6. Simuloinnit.....	56
6.1 Koeuunin simulointi.....	56
6.1.1 Aineominaisuudet.....	56

6.1.2	Simuloinnissa käytetyt seinien eristepaksuudet.....	60
6.1.3	Kuumennusvaiheen simulointi .....	61
6.1.4	Tasapainotilan simulointi .....	62
6.1.5	Eristetyn seinämän kokonaiskonduktanssin arviointi.....	66
6.1.6	Imupyrometrin vaikutus uunin lämpötilaan.....	67
6.2	Teollisuusuunien simuloinnit .....	69
6.2.1	Uunin koon vaikutus.....	69
6.2.2	Kuorman koon vaikutus .....	72
6.2.3	Kuumennustehon vaikutus .....	73
6.2.4	Panosuunin vuorokausisimulointi .....	75
7.	Korkealämpötilaiset uunit Suomessa.....	79
7.1	Käyttökohteet ja sovellutukset .....	79
7.1.1	Metalliteollisuus .....	79
7.1.2	Kemianteollisuus .....	82
7.1.3	Lasi- ja keramiikkateollisuus.....	83
7.1.4	Rakennusaineteollisuus .....	85
7.2	Kysely uunien käytöstä.....	85
7.3	Kuitueristeiden mahdollisuuksia energiateollisuudessa.....	87
8.	Kustannustarkastelua .....	90
9.	Yhteenveto .....	94
9.1	Tutkimuksen sisältö .....	94
9.2	Tärkeimmät tulokset.....	95
	Lähdeluettelo.....	98

## LIITTEET

### Liite A:

Keraamiset kuitueristeet, Koeuuni  
Rakenteisiin ja rakentamiseen liittyvät valokuvat

### Liite B:

Kuitueristeet korkealämpötiloissa  
Valokuvia koeuunista testien aikana

### Liite C:

Kuitueristeet korkealämpötiloissa  
SEM-kuvasarja koeuunin eristeistä

## Symboliluettelo

A	pinta-ala	(m <sup>2</sup> )
C <sub>p</sub>	lämpökapasiteetti	(J/ kg °C)
d	paksuus	(m)
D <sub>eq</sub>	hydraulinen halkaisija	( m )
K	konduktanssi	(W/ m <sup>2</sup> °C)
Pr	Prandtlin luku	
Re	Reynoldsin luku	
T	lämpötila	(°C)
a	lämmönsiirtokerroin	(W/m <sup>2</sup> °C)
l	lämmönjohtavuus	(W/m °C)
f	lämpövirta	(W)
r	tiheys	(kg/m <sup>3</sup> )



# 1. Johdanto

Kuiduista valmistetuilla rakenteilla on uuninrakennuksessa monia etuja massiivisiin rakenteisiin verrattuna. Kuitutuotteitten hyviä ominaisuuksia ovat pieni ominaislämpö, pieni lämmönjohtavuus, pieni tilavuuspaino ja hyvä lämpötilanvaihteluiden kestävyys. Uunit voivat olla kokonaan kuiturakenteisia, jolloin eristeet kiinnitetään suoraan vaippaan, tai kuitueristeet voidaan kiinnittää vanhoihin tiilirakenteisiin. Kuitueristeitten avulla saatavat energiansäästöt voivat olla kymmeniä prosentteja riippuen siitä, millä tavoin uunia käytetään. Edelleen kuitueristeitten ansiosta lyhyittenkin seisokkien aikana voidaan uunin lämpötila laskea ja tehdä uunissa korjauksia, joitten tekemiseen tiiliuunissa tarvittaisiin noin viikon mittainen seisokki. Kuidut ovat tiiliin verrattuna kevyitä, joten niiden ansiosta ovat kokonaan uudenlaiset uuniratkaisut tulleet mahdollisiksi.

Alumiinisilikaatti- ja alumiinioksidipohjaiset kuidut ovat ainoat kohtuuhintaiset ilma-atmosfäärissä toimivat kuitueristeet, joitten käyttölämpötilat ovat riittävän korkeita moniin terästeollisuuden, kemian teollisuuden, keraamisen teollisuuden ja energiantuotannon prosesseihin. Muista materiaaleista valmistetut kuitutuotteet eivät ole saavuttaneet laajempaa kaupallista menestystä; korkeintaan joihinkin erikoistarkoituksiin voidaan käyttää grafiitti- tai zirkoniumoksidikuiduista valmistettuja tuotteita.

Alumiinisilikaattikuitujen luokituslämpötilat ovat yleensä 1 260 °C tai 1 400 °C. Myös n. 15 % zirkoniumoksidia sisältävät 1 400 - 1 450 °C:n alumiinisilikaattikuidut ovat tavallisia. Korkeimmat käyttölämpötilat ovat hieman matalammat, mutta kuitenkin 1 200 - 1 350 °C:n lämpötiloihin löytyy kuitueristeratkaisuja. Alumiinioksidikuidut ovat huomattavasti kalliimpia kuin alumiinisilikaattikuidut mutta kestävät vielä korkeampia lämpötiloja. Niiden luokituslämpötila on yleensä 1 600 °C.

Keraamiset kuidut ovat varsin uusi materiaaliryhmä: alumiinisilikaattipohjaiset kuidut kehitettiin 1940-luvun alussa ja ensimmäiset käyttökokemukset korkealämpötilauuneista ovat 1960-luvun lopulta. 1970-luvun energiakriisien jälkeen käyttö on lisääntynyt valtavasti kaikkialla maailmassa, myös Suomessa, ja käyttö on edelleen kasvamassa, kun vanhoja tiiliuuneja korvataan kuitu-uuneilla tai korjataan osittain kuiturakenteisiksi.

Kuitujen käyttöä rajoittavia tekijöitä voivat eri tilanteissa olla kiteytyminen, kutistuminen ja haurastuminen korkeissa lämpötiloissa, kestävyys erilaisia mekaanisia vaurioita vastaan, eroosiokestävyys ja joissakin oloissa kemiallinen kestävyys. Kuitumateriaalien kestävydestä ”rajaolosuhteissa” on saatu lisätietoa mm. VTT:llä tehdyissä tutkimuksissa (Laitinen 1989, Salmi 1993).

Tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään kokeellisesti ja laskennallisesti eristysrakenneiden ja -materiaalien ominaisuudet sekä kokonaisten prosessiuunien toimintaa.

## 2. Kuitueristeet ja niistä valmistetut rakenteet

Tässä luvussa käsitellään aluksi lyhyesti kuitumateriaalien kestävyyttä eri olosuhteissa painottamalla niitä tekijöitä, jolla saattaa olla merkitystä tutkittavissa olosuhteissa. Kohdassa 2.2 esitellään erilaiset kuitueristeistä valmistetut rakenteet ja niiden ominaisuuksia kirjallisuuteen pohjautuen.

### 2.1 Kuitueristeitten kestävyys eri olosuhteissa

Seuraavassa on lyhyt yhteenveto kuitujen lämmönkestävyydestä eri olosuhteissa, joita on aiemmin käsitelty perusteellisemmin VTT:n julkaisuissa (Laitinen 1989, Salmi 1993).

#### 2.1.1 Kuitueristeitten lämmönkestävyys eri atmosfääreissä

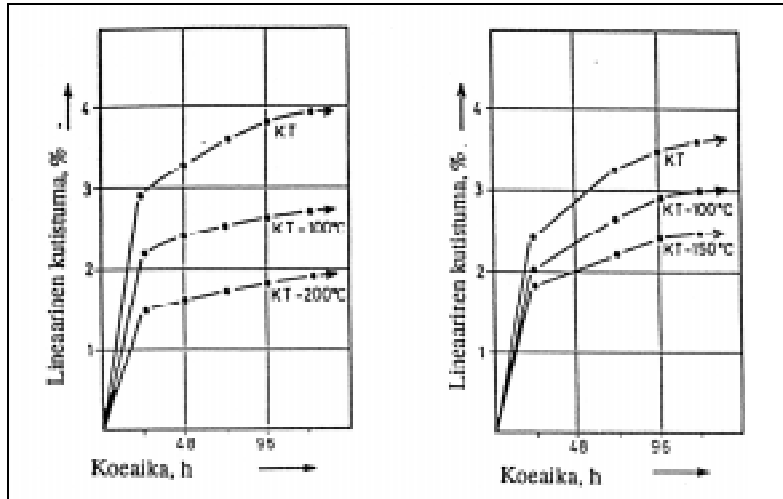
Alumiinisilikaattikuitujen valmistus tapahtuu sulasta massasta, jonka lämpötila on 1 850 - 1 950 °C. Kuiduttaminen tapahtuu hajottamalla sulavirta joko ilmavirran avulla tai tavallisemmin linkoamalla. Tuloksena on amorfisia kuituja, joiden halkaisija on yhden ja kahdeksan µm:n välillä, keskimäärin noin 4 µm (Laitinen 1989, Horie 1987). Suurimmat alumiinioksidipitoisuudet, joista sulamenetelmällä voidaan valmistaa kuituja, ovat noin 60 - 65 % ja suhde  $Al_2O_3 : SiO_2$  on korkeintaan 60/40. Kuidut voivat sisältää myös seosaineita, tavallisimpana zirkoniumoksidi, jota kuidut voivat sisältää jopa 20 %.

Kun amorfista kuitua kuumennetaan n. 980 °C:n lämpötilaan, se alkaa kiteytyä. Tuloksena on aluksi pieniä mulliittikiteitä (Ganz 1982). Lämpötiloissa 1 250 - 1 300 °C alkaa syntyä toista kidefaasia, kristobaliittia. Faasien kiteisyyden kasvaessa kuitutuotteen tiheys kasvaa ja joustavuusominaisuudet heikkenevät. Kutistumisnopeus kasvaa lisäksi noin 1 200 °C:ssa kuitujen yhteensintrautumisen seurauksena.

Keraamisille kuiduille määritelty luokituslämpötila on lämpötila, jossa koekappale ei 24 tunnin pitoaikana kutistu enempää kuin 2,5 %. Kutistuminen ei kuitenkaan pääty 24 tunnin kuluttua, vaan jatkuu "jälkikutistumisena" yleensä noin 150 tunnin ajan. 100 - 200 °C luokituslämpötilaa alempana jälkikutistuma on paljon vähäisempi. Kuvassa 1 esitetään alumiinisilikaattikuitutuotteen kutistuma ajan funktiona eri lämpötiloissa. Luokituslämpötila ei tarkoita käyttölämpötilaa kuin korkeintaan lyhytaikaisessa käytössä. Pitkäaikaiskäytössä suotuisissakin olosuhteissa korkein käyttölämpötila on 100 - 150 °C alempi kuin luokituslämpötila.

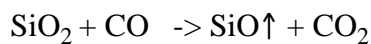
Keraamisten kuitujen kestävyys on paras puhtaassa hapettavassa ympäristössä, jossa niiden kestävyys on sama kuin lämmönkestävyys. Hapettava ympäristö on mm. sähkö-

kuumenteisessa uunissa, jossa on sisällä ilmaa. Suotuisa ympäristö on myös puhtaitten hiilivetyjen täydellisessä palamisessa syntyvä atmosfääri. Puhtaita hiilivetyjä ovat maa-kaasu, nestekaasu (propaani, butaani) sekä kevyt polttoöljy. Kuitujen kannalta ongelmallisia komponentteja sisältävät raskas polttoöljy ja erilaiset prosessikaasut.

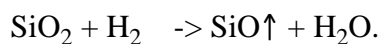


Kuva 1. Keraamisen kuituhuovan lineaarinen kutistuma luokituslämpötilassa (KT) ja sen alapuolella. Vasemmalla alumiinisilikaattikuitu, jonka luokituslämpötila on 1 260 °C, oikealla alumiinioksidikuitu, jonka luokituslämpötila on 1 600 °C (Elstner & Jeschke 1987).

Pelkistävät kaasukomponentit, kuten vety, hiilimonoksidi, ammoniakki ja metaani, alenavat keraamisen kuitueristeen käyttölämpötilaa. Erikoisen pahoja ovat hiilimonoksidi ja vety. Ne edistävät amorfisen faasin tai mulliitin piidioksidin pelkistymistä (Dietrichs & Krönert 1981, Laitinen 1989):



tai



Reaktioissa syntyvä piimonoksidi on kaasumainen aine ja se voi kulkeutua pois ja tiivistyä uudelleen rakenteen kylmemmissä osissa. Piidioksidin pelkistymistä voidaan havaita jo 925 °C:ssa, mutta vasta 1 150 °C:ssa tapahtuu merkittävää materiaalin painon alenemista.

CO:lla täytetyssä sähkökuumenteisessa uunissa tehdyissä kokeissa on havaittu, että pelkistävä atmosfääri vaikuttaa kiteitten läpimittaan ja kiderakenteisiin niin selvästi, että erot voidaan havaita elektronimikroskoopilla ja röntgendiffraktiolla (Dietrichs &

Krönert 1981). Selvimmin hiilimonoksidi vaikutti 85 - 95 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sisältäviin alumiinioksidikuituihin, joihin muodostui 1 250 - 1 350 °C:ssa samanlaisia kiteitä, joita hapettavassa ympäristössä syntyi 100 - 150 °C korkeammissa lämpötiloissa. Alumiinisilikaattikuiduilla ero oli noin 100°. Johtopäätös onkin, että pelkistävät olosuhteet alentavat alumiinisilikaattikuitujen (luokituslämpötila 1 260 tai 1 400 °C) korkeinta käyttölämpötilaa 100°:lla ja alumiinioksidikuitujen (1 600 °C) 100 - 150°:lla verrattuna hapettaviin olosuhteisiin, luokituslämpötilaan verrattuna siis jo 200 - 300° (Dietrichs & Krönert 1981). Hapettavien ja pelkistävien olosuhteitten vaikutus erilaisten kuitujen käyttölämpötilaan on esitetty taulukossa 1.

*Taulukko 1. Piidioksidi- ja alumiinioksidipitoisten kuitutyypin luokitus- ja käyttölämpötiloja (Schupp 1981).*

Kuitutyyppi	Luokitus- lämpötila, °C	Korkein käyttölämpötila, °C		
		Hapettava		Pelkistävä
		Pitkäaikainen	Lyhytaikainen	
Piilasi, 99 % SiO <sub>2</sub>	1 100	1 000	1 100	900
Alumiinisilikaatti, 45 - 50 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 260	1 100	1 260	900
Alumiinisilikaatti, 55 - 60 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 400	1 200	1 400	1 100
Alumiinisilikaatti, 55 - 65 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 3,5 % Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 425	1 200	1 400	1 100
Sekakuidut, Alumiinisilikaatti (45 -50 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ja alumiinioksidi	1 500	1 400	1 500	1 200
Sekakuidut, Alumiinisilikaatti (55 -50 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ja alumiinioksidi	1 600	1 500	1 600	1 300
Alumiinioksidi, 95 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 5 % SiO <sub>2</sub>	1 600	1 500	1 600	1 400

### 2.1.2 Kuitujen kemiallinen ja eroosiokestävyys korkeissa lämpötiloissa

Keraamisten kuitujen perusmateriaali, alumiinioksidi, kestää useimpien kemikaalien vaikutusta. Esim. reaktiot useimpien metallien ja metallioksidien kanssa tapahtuvat vain erittäin korkeissa lämpötiloissa (yleensä 1 600 - 2 000 °C). Alumiinioksidituotteiden heikko kohta on alumiinioksidikiteiden välinen piidioksidipitoinen lasimainen faasi, johon sisältyvät myös materiaalin lisäaineet ja epäpuhtaudet. Vaikka kuitumateriaalin kor-

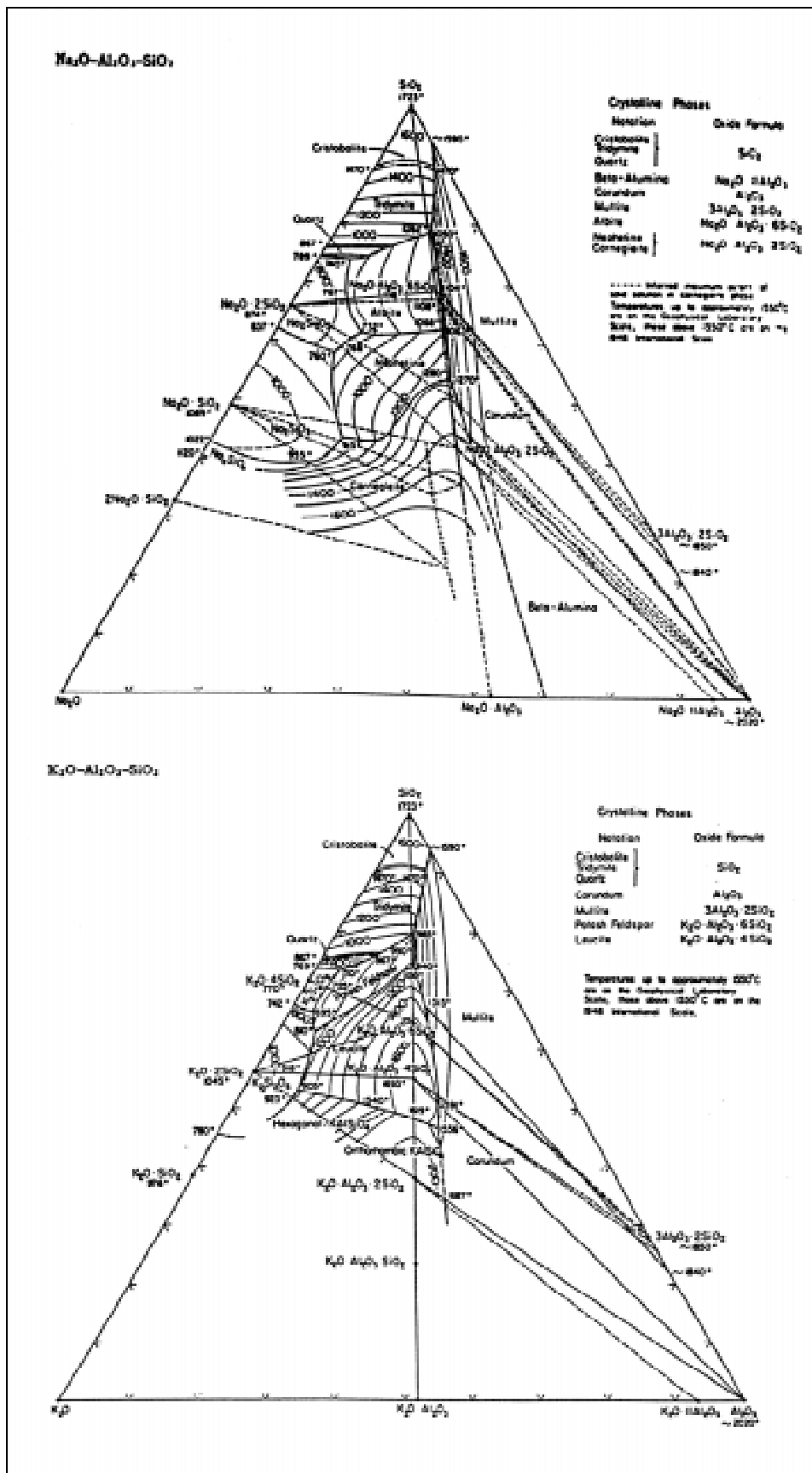
roosionkestävyys onkin erinomainen, on kuitutuotteen ominaispinta-ala suuri ja kaasuvirtaukset pystyvät vapaasti kulkemaan rakenteiden sisällä; siksi kuidut ovat alttiina kemiallisille vaurioille ja korroosiolle, jos niille on olemassa fysikaaliset edellytykset.

$K_2O$ - ja  $Na_2O$ -pitoiset höyryt vaikuttavat korundiin jo alle  $900\text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötiloissa muodostaen alkalimetallipitoisia  $\beta$ -alumiinioksiedeja kiteitten rajoille ja tunkeutuvat huokosiin (Petzold & Ulbricht 1991).

Alkalimetallien tiedetään reagoivan keraamisten kuitujen kanssa jo  $800$  ja  $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ :n välillä muodostaen maasälvän tyyppisiä yhdisteitä, mm. leusiittia ja ortoklaasia. Tällaiset olosuhteet on mm. lasitus-, alumiini- ja tiilenpoltouuneissa (Elstner & Jeschke 1987), (Dietrichs & Krönert 1981). Alkalimetallit voivat olla uuniatmosfäärissä esimerkiksi suolahöyryjen muodossa: kalium- ja natriumsulfaatit ja -kloridit höyrystyvät  $900 - 1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ :ssa (Schupp 1981). Kuvan 2 tasapainopiirroksista nähdään, että sulaa muodostuu jo alle  $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötiloissa, kun koostumus on sopiva.

Muita korroosio-ongelmia, joilla on käytännön merkitystä, ovat reaktiot raskaan polttoöljyn palokaasujen kanssa, eristeen kylmään osaan tiivistyvät höyryt, fluoripitoiset ympäristöt ja hiiletyskaasu ympäristöt (Salmi 1993). Raskaan polttoöljyn tiedetään olevan tuhoisaa kuitueristeille (Nurmi 1985). Kuitujen korroosiota on odotettavissa ainakin, jos polttoöljyn rikkipitoisuus on yli  $1,5\%$  ja jos polttoöljy sisältää lisäksi runsaasti vanadiinipentoksidia (Dietrichs & Krönert 1981). Vanadiinipentoksidi on tuhoisaa alumiinioksidikuiduille jo alle  $700\text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötiloissa. Nykyisin ongelma on pienentynyt, kun raskaan polttoöljyn rikkipitoisuuksia on vähennetty: vanadiini on peräisin samoista lähteistä kuin rikki ja sen määrä on myös olennaisesti pienentynyt. Eristeen kylmään osaan voi tiivistyä vettä ja rikin happoja. Vaikka eristemateriaali sinänsä kestääkkin näitten vaikutusta, nämä ovat haitallisia aiheuttaessaan metallisten kiinnikkeitten korroosiota. Fluorivety reagoi kuitujen piidioksidin kanssa etenkin rakenteen kylmässä osassa. Fluoripitoiset atmosfäärarit ovat mahdollisia esim. alumiinielektrolyysiuuneissa ja lisäksi emalointiuuneissa (Dietrichs & Krönert 1981). Hiiletyskaasuista voi eristeen sisäosiin pelkistyä hiiltä (Laitinen 1989), joka huonontaa eristyskykyä.

Eräs kuituristeen käyttöä rajoittava tekijä on huono kestävyys kaasuvirtauksia ja etenkin niitten mukana kulkeutuvaa pölyä vastaan. Korkeissa lämpötiloissa voisi olettaa, että kuitujen kiteytymisen ja haurastumisen johdosta kuitumateriaalin kulumisen nopeutuisi. Kuitukerroksen kulumisesta ja ohenemisesta on seurauksena lämmöneristävyyden heikkeneminen. Lisäksi kaasun mukana kulkeutuva kuitupöly saattaa heikentää uunissa valmistettavan tuotteen laatua (Arnold et al. 1996). Täsmällistä tietoa kuitueristeitten kestävydestä korkeissa lämpötiloissa on vähän, koska toistettavia, teollisuusoloja vastaavia kaasu- ja pölyvirtauksia on vaikea saada aikaan.



Kuva 2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O- ja Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O-tasapainopiirroksset.

Joitakin yksittäisiä arvioita kuiturakenteen kestävydestä virtaavassa kaasuympäristössä saattaa kirjallisuudesta löytyä, tällaisena mm. kuituhuopavuorauksen kestävyysrajaksi mainittu 18m/s, minkä yläpuolella huopakerros alkaa kuoriutua (Horie 1987).

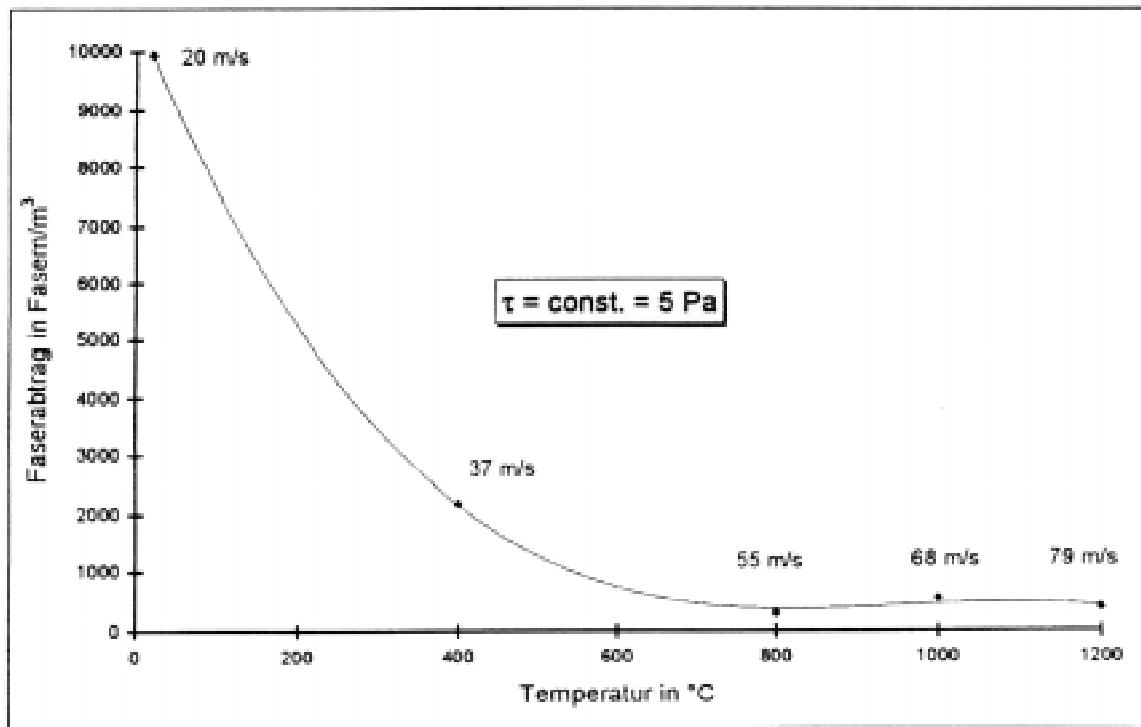
Perinteisesti on oletettu, että kaasun keskimääräinen virtausnopeus on ainoa kuiturakenteen kulumiseen vaikuttava tekijä. Uudemman tutkimuksen mukaan tällainen yleistys on erittäin epätarkka: kulumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin seinään kohdistuva leikkausjännitys, kaasun ja pinnan lämpötila, kuitukappaleitten laatu, valmistus- ja asennustapa sekä kuiturakenteen muutokset käytön aikana (Arnold et al. 1996). Eri tekijöiden vaikutusta on tutkittu koelaitteistolla, jossa kaasuvirtaus kulkee ohuen kanavan läpi ja niputetut kuitumoduulit on asennettu kanavan seiniin. Koska kuitujen kuluminen oli niin vähäistä, että esim. seinän paksuuden mittaamisesta ei olisi saanut riittävää tietoa, mitattiin kulumista kuitujen määränä/kuutiometri virtaavaa kaasua. Tuloksista pääteltiin mm. että kuitujen eroosio on sitä suurempi mitä suurempi leikkausjännitys on. Kaasun lämpötilan vaikutus osoittautui odottamattoman suureksi: poistuvat kuitumäärät ovat moninkertaisia, kun kaasua on kylmää. Lisäksi vielä kylmemmässä kaasussa sama leikkausjännitys saadaan aikaan paljon pienemmällä virtausnopeudella.

Lämpötilan vaikutus johtunee laminaarin kaasuvirtauskerroksen kasvusta, kun kaasun lämpötila nousee. Kun kuitukerroksen sisällä virtaus on laminaari, kuluminen on pienempää. Kuluminen on monin verroin pahempaa turbulentin virtauksen alueella, joka on siis suurempi, kun kaasua on kylmää. Kuitutuotteen eroosio ei tulosten mukaan ole selitettävissä pelkän keskimääräisen kaasuvirtauksen avulla, vaan merkityksellisempiä ovat paikalliset virtaukset kuitupinnan tuntumassa (Arnold et al. 1996). Esim. kuvan 3 mukaan korkeammassa lämpötilassa kuitujen eroosionopeus pienenee olennaisesti, vaikka keskimääräinen virtausnopeus nelinkertaistuu (1 200 °C:ssa 79 m/s; huoneenlämpötilassa 20 m/s). Samoissa kokeissa ei myöskään havaittu, että kuitujen kulumisnopeus olisi kasvanut 24 tunnin kokeen loppupuolella edes 1 200 °C:n lämpötilassa.

## 2.2 Kuitueristerakenteet ja kiinnitysmenetelmät

Valmistusprosessista riippumatta ensimmäinen syntyvä tuote on irtovilla. Suurin osa villasta jatkojalostetaan kuituhuovaksi. Kuituhuovasta voidaan tehdä valmiita rakennepaloja, moduuleja, joitten tarkoituksena on helpottaa asennustyötä ja myös huoltoa. Lisäksi kuiduista valmistetaan jäykkiä levyjä ja muotokappaleita sekä papereita, nauhoja, köysiä ja ruiskutettavia tuotteita.

Kuituhuovaksi sanotaan kuituvillasta valmistettua paksuhkoa mattoa, jossa kuidut ovat pääosin pinnan suuntaisesti - alumiinioksidivillojen kuidut säännöllisemmin, lähes yhdensuuntaisina. Huovat voivat olla sideaineettomia (ommeltuja) tai ne voivat sisältää or-



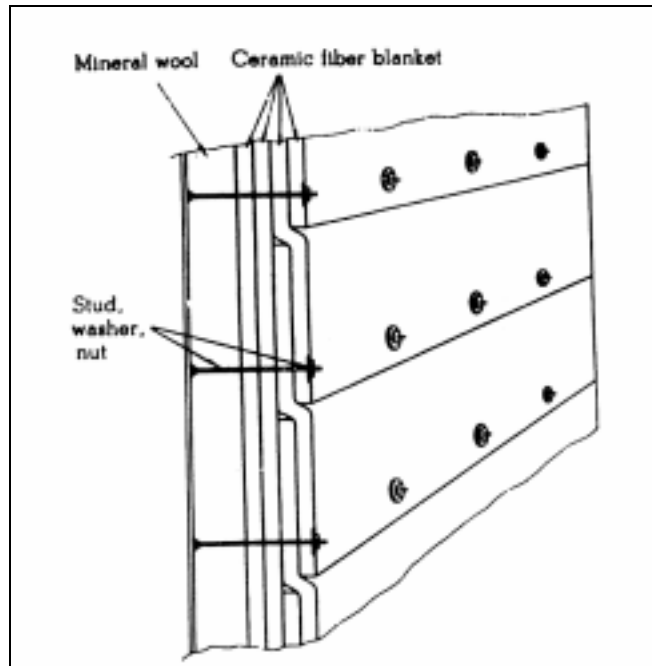
Kuva 3. Kuitujen kuluminen lämpötilan funktiona seinään kohdistuvan leikkausjännityksen ollessa vakio (Arnold et al. 1996).

gaanista tai epäorgaanista sideainetta. Huovat toimitetaan yleensä rullina, joiden leveys on 60 tai 120 cm ja paksuus 6 - 50 mm (Laitinen 1989).

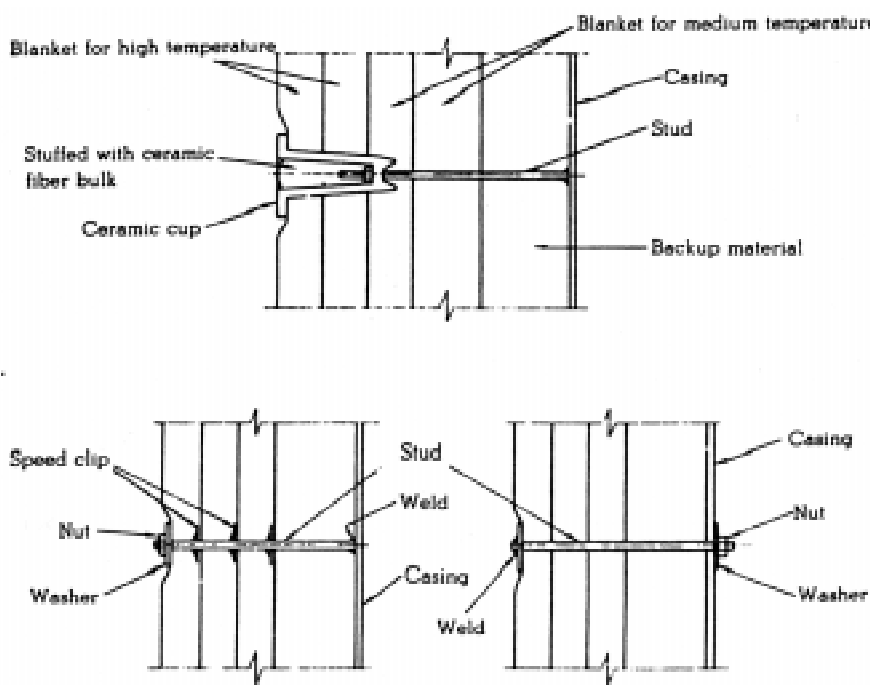
Ensimmäinen, vieläkin käytetty seinärakenne oli kuituhuovista ja taustaeristekerroksista (kivi- tai kuonavilla tai levyt) valmistettu "huopakerrosvuoraus", jossa huovat ovat uunin seinän suuntaiset ja ne on kiinnitetty tulenkestävästä materiaalista valmistettujen uunin seinään hitsattujen tappien ja metallisten tai keraamisten kiinnikkeitten avulla (kuvat 4 ja 5). Huopakerrosvuorauksen etuja ovat (Horie 1987) mahdollisuus valita edullisin materiaali jokaiselle lämpötila-alueelle kuumimmasta osasta vaippaan asti, saumojen pieni määrä, helppo valmistettavuus ja pintakerroksen helppo korjattavuus. Kuidut ovat huovan ja seinän suuntaiset, mikä on lämmöneristävyyden kannalta edullista (Crowley 1989). Rakenteen huonoja puolia ovat kiinnityselinten vahinkoalttius (näitten lämpötilankestävyys on yleensä huonompi kuin muun rakenteen ja myös korroosionkestävyys saattaa rajoittaa käyttömahdollisuuksia) ja huono kaasuvirtausten kestävyys kuoriutumisen johdosta (rajana 18 m/s). Lisäksi rakenne on altis mekaanisille vaurioille (Horie 1987).

Kiinnikkeitten tärkein valintakriteeri on lämpötilan kestävyys, toinen tärkeä kriteeri on korroosionkestävyys. Japanilaisia materiaalisuosituksia on taulukossa 2.





Kuva 4. Huopakerroksilla vuoratun uunin seinärakenne (Horie 1987).



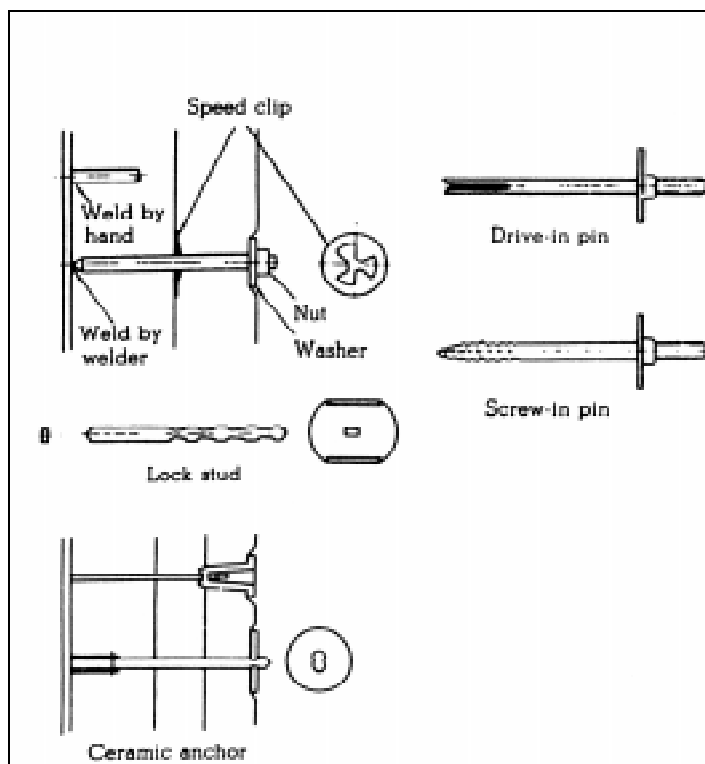
Kuva 5. Huopakerroksilla vuoratun uunin seinärakenteitten kiinnikkeitä (Horie 1987).

Huopien kiinnikkeitten koko ja muoto riippuvat asennustavasta, aluslevyjen kiinnitysmenetelmistä ja huovan paksuudesta (Horie 1987). Tapit kiinnitetään yleensä hitsaamalla tai erilaisten pulttien, muttereitten ja aluslevyjen avulla. Suurimmat muotoiluongelmat liittyvät keraamisten kuppimaisten tai levymäisten kiinnikkeitten kiinnittämiseen uunin vaippaan. Joitakin kiinnitystapoja esitetään kuvassa 6.

Huovista tehdyn rakenteen (kuten kuiturakenteiden yleensä) ongelmakohtia ovat uunin nurkat, joissa on vältettävä suoria uunitilasta vaippaan ulottuvia saumoja, erilaiset aukot (ovet, polttimien ympäristö) sekä kattorakenteet, joissa kiinnikkeitä on oltava huomattavasti tiheämmässä kuin seinillä.

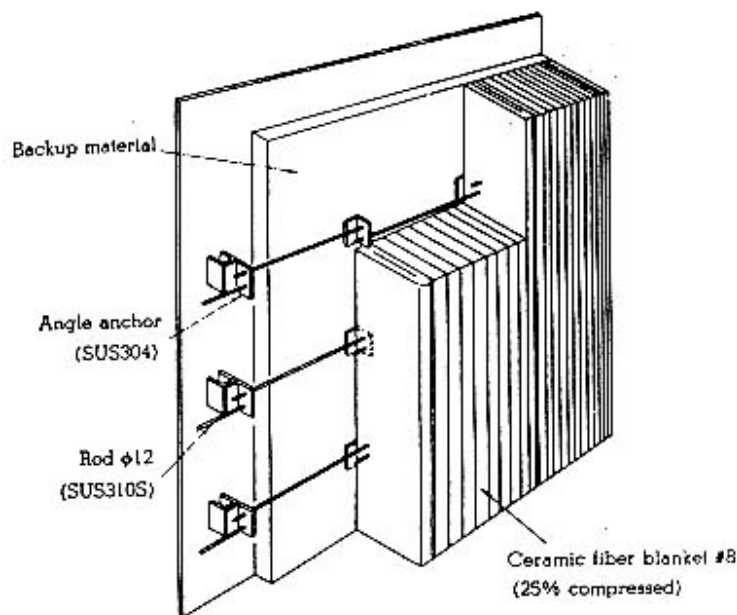
*Taulukko 2. Kiinnitinmateriaalien valintakriteerejä eri lämpötila-alueille ja erilaisiin atmosfääreihin. Erikoisseoksilla tarkoitetaan erilaisia nikkeli-kromi- ja rauta-kromiseoksia (Horie 1987).*

Kuumennustapa	Käyttölämpötila				
	<750 °C	<900 °C	<1 000 °C	<1 100 °C	Yli 1 100 °C
Sähkö tai epäsuora kuumennus	SUS-304	SUS-310S	SUS-310S	Erikoisseos	Keraaminen kiinnike
Kaasun poltto	SUS-304	SUS-310S	Erikoisseos	Erikoisseos	Keraaminen kiinnike
Kevytöljyn poltto	SUS-310S	SUS-310S	Erikoisseos	Erikoisseos	Keraaminen kiinnike
Raskaan polttoöljyn poltto	SUS-310S	SUS-310S	Erikoisseos	Keraaminen kiinnike	Keraaminen kiinnike



Kuva 6. Keraamisten kuituhuopien kiinnitykseen käytettyjä kiinnikkeitä (Horie 1987)

Pinovuorauksessa keraamihuovat leikataan suorakulmaisiksi suikaleiksi, jotka pinotaan siten, että ne muodostavat suoran kulman uunin vaipan kanssa. Huopasuikaleen leveys on siis sama kuin vuorauskerroksen paksuus. Kunkin huopasuikaleen toinen reuna on uunin sisätilassa, toinen reuna kosketuksissa uunin vaippaan tai mahdollisesti taustavuoraukseen. Pinot on kiinnitetty vaippaan kuvan 7 mukaisesti terästangoilla. Huopakerrosvuoraukseen verrattuna tällainen rakenne on kestävämpi, koska vain kuitujen päät ovat alttiina lämpöaurioille, huopakerrosrakenteessa pinnan kuidut ovat kokonaan kuumimmassa osassa ja voivat siten vahingoittua ja kuoriutua kokonaan. Jos materiaali on samaa, nostaa pinottu vuoraus kuiturakenteen käyttöaluetta 50 - 100 °C:lla. Tähän rakenteeseen ei myöskään kuulu metallisia uunin kuumimpaan osaan ulottuvia kiinnikkeitä, ja rakenteen kestävyys virtaavaa kaasua vastaan on olennaisesti parempi. Tällaista rakennetta voi myös parantaa pinnoittamalla, mikä parantaa kestävyyttä korroosiota ja kulumista vastaan. Kohtisuoraan seinää vasten oleva kuitusuunta ei ole lämmönsiirron kannalta yhtä hyvä kuin seinän suunta. Pinorakenteen huono puoli on huopakerrosvuoraukselta paksumpi kuitukerros, etenkin paksumpi kerros kalliimpia korkeamman lämpötilan kuituja, ja siten korkeampi hinta, mistä syystä sitä on käytetty sellaisissa kohteissa, joissa huopakerrosrakenteen kestävyys on syystä tai toisesta ollut rajoitettu (Horie 1987).



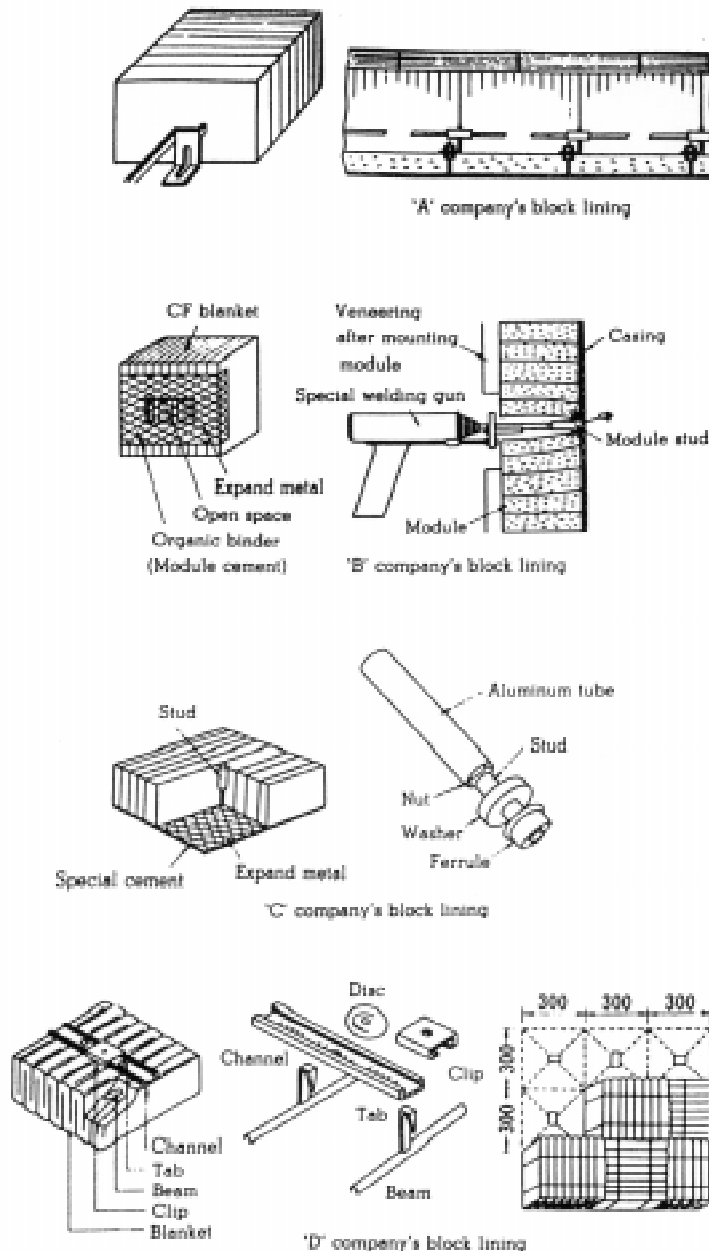
Kuva 7. Esimerkki pinovuorausmenetelmästä.

Moduulivuorausta voidaan pitää pinorakenteen parannettuna mallina ja sen edut ovat samat kuin pinorakenteen. Moduulirakenteet on erikoisesti suunniteltu helposti asennettaviksi. Moduulivuoraus on kalliimpi kuin huopakerroksista tehty vuoraus, koska moduulit ovat yleensä läpikotaisin samaa korkealaatuista kuitua (Laitinen 1989).

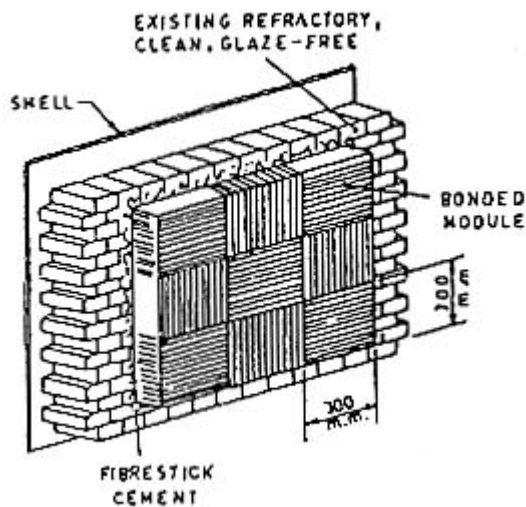
Tavallinen moduulikoko on 300 x 300 mm, paksuus 100 - 300 mm. Moduulit on tavallisesti valmistettu 25 mm:n paksuisesta huovasta. Eri valmistajat käyttävät erilaisia huopalaatuja, pinoamis- ja puristamismenetelmiä ja asennustapoja. Kuvassa 8 on joukko moduulirakenteita ja kiinnitystapoja. Moduulien kaksi pääryhmää ovat pinotut moduulit, jotka koostuvat päällekkäin pinotuista huopasuikaleista, ja laskostetut moduulit eli "haitarimoduulit" (Horie 1987). Näistä haitarimoduulien lämmöneristyskyky on hieman parempi, koska osa kuiduista on uunin pinnan suuntaisia (Crowley 1989, Bhattacharya et al. 1996). Kiinnitysmenetelmät ovat pääasiassa kahta tyyppiä: joko villan sisään upotetut metallikiinnikkeet hitsataan tai pultataan vaippaan tai tankoihin varrastetut moduulit kiinnitetään vaippaan erillisten metallikiinnikkeitten avulla. Lisäksi voidaan käyttää tulenkestävää laastia varmistamassa kiinni pysymistä (Horie 1987).

Eräs tapa käyttää kuitueristeitä on olemassa olevan tiili- tai massarakenteisen uunin sisäpuolinen lämmöneristys. Tällainen eristys voidaan tehdä kuituhuovasta tai tavallisemmin moduulin tyyppisistä kuitusuikaleista, joitten koko on tavallisesti 300 x 300mm, paksuus 25, 50, 75 tai 100 mm. Kiinnitys tapahtuu joko aiempaan tulenkestävään massaan kiinnitettyjen tappien avulla tai tulenkestävällä laastilla (kuva 9). Tällaisella rakenteella saadaan huomattavaa energian säästöä ilman, että olemassa oleviin rakenteisiin tehdään mitään muutoksia.

Kuitulevyjä uunin sisäpuolisena lämmöneristeenä voidaan pitää huopavuorauksen erikoistapauksena. Kuitulevyn ja vaipan välissä on kerroksia vuorivillaa ja muita eristeitä ja rakenne on kiinnitetty tappien, pulttien levyjen ym. avulla, kuten huovista tehty eristys. Koska levyjen tiheys on suurempi ja kaasunläpäisevyys pienempi kuin huopien, ne vähentävät kaasujen virtauksia eristekerrosten läpi. Ne antavat suojaa myös mekaanisia vaurioita, nopeasti virtaavaa kaasua ja sen mukana kulkeutuvaa pölyä sekä myös korroosiota vastaan.



Kuva 8. Joukko moduuleja ja niiden kiinnitysrakenteita (Horie 1987).



Kuva 9. Kuitueristeen käyttö olemassa olevan uunin sisäpuolisena lisäeristeenä (Bhattacharya et al. 1996)

Muista poikkeava moduulityyppi ovat vakuumimuovatus moduulit, jotka koostuvat kuituista ja sideaineista valmistetusta laatikosta, joka on kovetettu esikuumentamalla ja täytetty kuitumateriaalilla. Kovetettu, tiheä pinta kestää eroosiota paremmin kuin pehmeät kuitutuotteet (Bhattacharya et al. 1996) ja sen lämmöneristyskykykin on parempi kuin muiden kuiturakenteiden (Crowley 1989).

### 2.3 Keraamisten kuitujen terveydelliset vaikutukset

Kuitujen käytön terveysriskit ovat viime aikoina nousseet voimakkaasti esille. Suomesakin on tullut voimaan EU:n direktiivi, jonka mukaan alumiinisilikaattipohjaiset kuitutuotteet on luokiteltu ryhmään ”todennäköisesti syöpää aiheuttavat” aineet (EU97/69EY). Vaarallisuusolettamuksen on perustuttava pitkäaikaisiin kahdella eläinlajilla tehtyihin tutkimuksiin ja muihin tietoihin, joiden perusteella voidaan olettaa, että altistuminen näille aineille voisi aiheuttaa syöpää. Keraamisille kuiduille on tehty suuri määrä rotta- ja hamsterikokeita, joitten tuloksilla luokituksen muutosta on perusteltu.

Syynä epäilyksiin kuitujen vaarallisuudesta on ollut mm. se, että kuitumainen mineraalituote, asbesti, jota pidettiin vielä joitakin vuosia sitten monilla aloilla korvaamattomana, havaittiin erilaisia syöpälaatuja aiheuttavaksi ja sen käyttö jouduttiin lähes kokonaan kieltämään. Luonnollista on, että epäilykset muitakin kuitumaisia tuotteita kohtaan tällöin lisääntyivät.

Asbestin kuidut koostuvat suuresta määrästä erittäin ohuita yhdensuuntaisia kuituja, fibrillejä. Nämä ovat onttoja, niiden läpimitta on n. 15 - 40 nm ja pituus on ilmeisesti lähes sama kuin koko kuidun (Noll 1974). Asbestin vaikutusmekanismeista ei olla täysin yksimielisiä. Todennäköisesti kuitenkin on olemassa "kriittisiä kuituja", joiden muoto vahingoittaa soluja ja edistää syöpäsairauksien alkamista. Asbesti on täysin liukenematon elimistöön ja niin ollen aiheuttaa elinikäisen riskin. Asbestipohjaisten sairauksien "itämisaika" on kuitenkin varsin pitkä: syöpäsairaudet voivat puhjeta vasta 25 - 35 vuoden asbestityöskentelyn jälkeen. Vaikutus on tilastollinen, ts. altistumisen ja sairastumisen välillä on vain tilastollinen yhteys (Traupe 1995).

Asbestin ja synteettisten mineraalikulitujen välillä on kuitenkin useita olennaisia eroja, joiden takia mineraalikulitujen vaarallisuutta voi perustellusti epäillä. Ensinnäkin, koska synteettiset kuidut eivät koostu fibrilleistä vaan amorfisesta materiaalista, ne eivät jakaaannu pituussuunnassa vaan katkeavat, pahimmassakin tapauksessa vain vinosti. Toiseksi keraamikuidut ja lasikuidut hajoavat elimistössä kohtuullisessa ajassa, muutamassa vuodessa, kun asbestin hajoamisaika yli 100 vuotta (Traupe 1995). Edelleen mineraalivillakulitujen laskeutumisenopeus ilmassa on aivan eri luokkaa kuin asbestikulitujen: mineraalivillapöly laskeutuu verrattain nopeasti lattialle, asbestipöly leijailee ilmassa tuntikausia. Mineraalivillatyöntekijöillä ei myöskään ole vielä havaittu vastaavia tauteja kuin asbestityöntekijöillä, vaikka mineraalivillojakin on jo käytetty useita vuosikymmeniä.

Keraamisten kulitujen mahdollisten terveyshaittojen vähentämiseksi on käynnissä voimakas kehitystyö, joka kohdistuu pääasiassa kolmeen tekijään: kuitupitoisuuden vähentämiseen asennustöitten aikana, kulitujen liukoisuusnopeuden lisäämiseen ja kulitujen paksuuden säätämiseen (Deren 1995).

Ongelmallisimmat työt kulitujen annostuksen kannalta ovat kuitueristeitten asennus- ja huoltotyöt. Kulitujen määrä ilmassa on suurimmillaan siinä vaiheessa, kun kuitumoduulit on asennettu ja mahdollisia rakoja täytetään irtovillalla. Tässä vaiheessa suositellaan kulitujen kostutusta. Yksi keino vähentää ilmassa olevan kuitupölyn määrää on asentaa moduulit muoviin pakattuna; kun uunin lämpötila nostetaan, muovi palaa pois. Tällä menetelmällä saadaan pölymäärää pienennettyä 90 %. Myös ruiskutettavia kuitutuotteita on kehitetty. Koska näiden sideaine on nestemäinen, on kehittyvän pölyn määrä pieni. Myös pinnoitettaessa irtoavan pölyn määrä vähenee, jos kuiturakenne kostutetaan.

Kulitujen paksuus vaikuttaa siihen, miten helposti kuidut kulkeutuvat esim. hengitysilman mukana. Laboratorioeläinkokeissa on käytetty läpimitaltaan alle 1 µm:n kuituja. On havaittu, että myös yli 1 µm:n, mutta alle 3,5 µm:n kuidut voivat kulkeutua hengityksen mukana ihmisen elimistöön. Ilma- tai vesihöyrystin avulla valmistettujen kulitujen läpimitta on alle 1 µm:sta 10 µm:iin keskiarvon ollessa noin 3 µm. Linkoamistekniikalla valmistettujen kulitujen halkaisija on hieman suurempi, 4 µm, ja kuidut ovat pitempiä.

Molemmilla tekniikoilla kuitenkin syntyy myös hengitettävän kokoisia kuituja. Kuituvalmistajat kehittävät edelleen kuitujen valmistusmenetelmiä, jotta kuitujen paksuutta pystyttäisiin paremmin säätelemään (Deren 1995). Myöskin liian paksuilla kuiduilla on terveysthaittansa: ainakin yli 6  $\mu\text{m}$ :n kuidut voivat aiheuttaa ihon ärsytystä (Dinwoodie 1996).

Kuitujen suuren liukoisuuden elimistöön oletetaan vähentävän kuidun vaarallisuutta. Eläinkokeissa näin onkin todettu. Keraamisten kuitujen liukoisuus on verrattain vähäinen, vaikkakin olennaisesti esim. asbestia suurempi. Niinpä kuituvalmistajat kehittävät kuitumateriaaleja, jotka liukenevat paremmin elimistöön. Kuituvalmistajat ovat esimerkiksi testanneet yli 150 erilaista lasikoostumusta ja löytäneetkin koostumuksia, joitten liukoisuus on olennaisesti suurempi kuin alumiinisilikaattikuitujen. Nämä eivät kuitenkaan kestä vielä samoja lämpötiloja kuin alumiinisilikaattikuidut (Deren 1995).

Tuotantoasteelle kehitetty uusi kuitumateriaali on kalsiumsilikaattivilla, joka valmistajan antamien tietojen mukaan sisältää piidioksidia 61,0 - 67,0 %, kalsiumoksidia 27,0 - 33,0 % ja lisäksi magnesiumoksidia 2,5 - 6,5 % (Carborundum 1998). Luokituslämpötilaksi ilmoitetaan 1 100 °C. Kuitujen liukenemisnopeus rottien elimistöön on suurempi kuin muiden lasi- ja mineraalivillojen. Rajoituksia on käyttöolosuhteissa: koska luokituslämpötilan ja sulamislämpötilan ero on suhteellisen pieni, kalsiumsilikaattivilla ei kestä kovin suuria käyttöhäiriöitä. Atmosfääri ei saa olla myöskään kovin kostea, alkalinen tai hapan.

Toinen ilmeisesti tuotantoasteelle kehitetty uusi kuitumateriaali on kalsiumaluminaattivilla, joka ei sisällä juuri lainkaan piidioksidia eikä siten aiheuta ainakaan silikoosi-vaaraa (Eltner et al. 1996). Kalsiumaluminaatti on sementtimineraali, joka niin ollen hydrolysoituu vedessä ja liukenee nopeasti veteen tai esim. ihmisen elimistöön. Reaktiot veden kanssa rajoittavat kuitumateriaalien käytön sellaisiin olosuhteisiin, joissa kosteus on vähäistä. Kuidut kuitenkin kestävätkin jopa 1 250 °C:n lämpötiloja sekä hapettavissa että pelkistävässä olosuhteissa mutta haurastuvat nopeammin kuin alumiinisilikaattikuidut. Rotilla tehdyissä kokeissa kuidut korrodoituivat pahoin jo kuudessa viikossa.

Kuituasennustöitä suoritettaessa on joka tapauksessa kiinnitettävä suurta huomiota erilaisiin tekniisiin ja henkilökohtaisiin suojautumistoimenpiteisiin (Fuehres 1995). Teknisiä toimenpiteitä ovat mm. työpaikan ilmanvaihdon järjestäminen, työpaikan pitäminen puhtaana, syntyvän jätteen siirto heti esim. suljettuun muovisäkkiin sekä hienon pölyn imemiseen tarkoitettujen pölynimurien ja suodattimien käyttö. Paineilman käyttö puhdistukseen on ehdottomasti kielletty. Pakkaukset on avattava vasta asennuspaikalla ja kuituhuopa on leikattava veitsellä kiinteän alustan päällä, ei sahalla. Käytettyjen kuitutuotteiden purku on tehtävä erittäin varovaisesti: poistettavaa materiaalia ei saa heittää, paikka on mahdollisuuksien mukaan eristettävä, kuitutuote kostutettava ja imu



järjestettävä. Jäte on kerättävä suljettuun astiaan. Henkilökohtaisia suojautumisvälineitä ovat kunnolliset hengityssuojaimet, suojalasit (kaasutiiviit, jos pöly on alle 5 µm), tiivis, pitkähäinen työpuku, joka säilytetään ja pestään erillään muista työvaatteista sekä nahka- tai muovikäsineet. Kädet ja esiin jäävä iho on käsiteltävä suojaavalla ihovoiteella etukäteen, ja työn jälkeen on peseydyttävä vedellä.

### 3. Koeuunijärjestelyt ja eristysrakenteet

Erilaisten rakenteiden toimivuuden tutkimista ja lämpötekniisten tietojen tarkistusta varten rakennettiin koeuuni. Rakenteeltaan uuni on laatikon mallinen vaunu-uuni, jonka luukku on kiinni arinassa. Ulkomitat ovat 2,4 x 2,4 x 2,1 m. Uunin päädyssä on poltin (120/60 kW), ja savukaasun poistoaukko on poltinseinän alaosassa. Eristekerroksen paksuus on joka puolella 300 - 320 mm.

Tärkeimmät vertailtavat rakenteet olivat moduulirakenne ja useista kerroksista muodostuva "liimattu rakenne". Moduulirakenteita oli koeuunissa kaksi erilaista, eri toimittajilta saatua, ja myös liimatusta rakenteesta oli useita versioita. Materiaalit valittiin siten, että niitten lämmönkestävyys oli riittävän ylärajoilla, kunkin valmistajan samanlaisiin olosuhteisiin valitut materiaalit olivat lämpötilaluokitukseltaan samaa luokkaa ja kukin rakenne oli mitoitettu samoja käyttölämpötiloja varten (1 300 °C). Tarkoituksena ei ollut vertailla materiaaleja vaan rakenteita.

#### 3.1 Materiaalit

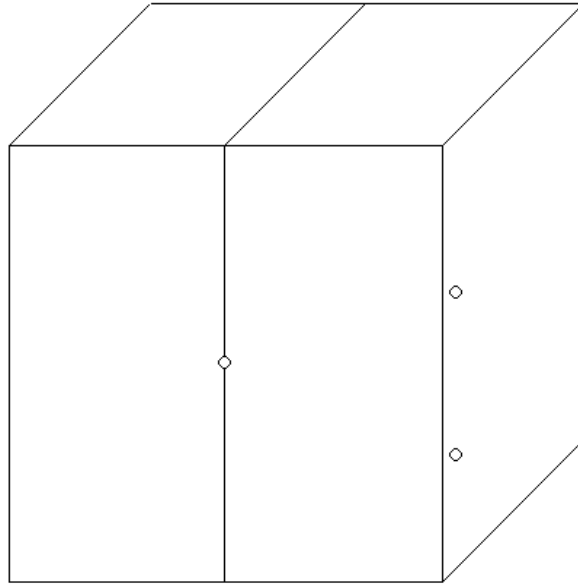
**Pyrobloc**-moduulit (valmistaja Thermal Ceramics; maahantuojana Termorak Oy) olivat kaikki samaa toimituserää. Moduuli koostuu kahdesta puolikkaasta, ts. kahdesta 150 x 300 x 300 mm kuituhuopakappaleesta, joitten välissä on kiinnitykseen käytettävä putki kiinnitysosineen sekä taustan lähellä kaksi poikittaista terästankoa, jotka myös pitävät moduulin puolikkaita yhdessä ennen asennusta (kuva 10). Kuitujen suuntautuneisuus on tietävästi pääosin seinästä uunin kuumaan osaan. Pyrobloc-moduulien ilmoitettu tiheys oli 240 kg/m<sup>3</sup>.

Prismobloc-moduulit (Carborundum-Kerlane) olivat kahta toimituserää. Uunia varten toimitetut moduulit (**Prismobloc, uusi**) koostuivat 16 - 18 pinotusta huovasta (alkuperäinen paksuus 20 mm), jotka oli pakattu muovipussiin (kuva 11). Taustan lähellä olivat kiinnitykseen käytetyt metalliosat. Ilmoitettu tiheys oli 210 kg/m<sup>3</sup>.

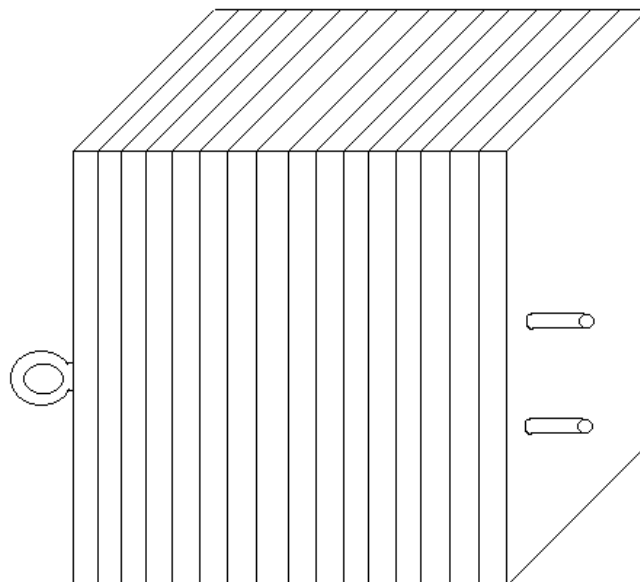
Aiemmasta toimituserästä peräisin olleet Prismobloc-moduulit (**Prismobloc, vanha**) olivat osittaisia haitarimoduuleja, ts. ne oli valmistettu kahdeksasta huopasuikaleesta, jotka olivat kaksin kerroin siten, että käänneskohta oli kuumalla puolella. Kiinnitystapa muovipusseineen ja metalliosineen oli sama kuin uusien Prismobloc-moduulien. Ilmoitettu tiheys oli 170 kg/m<sup>3</sup>.

Prismobloc-rakenteisiin kuuluu moduulin lisäksi erillinen ohuehko (20 mm) taustahuopa, jonka kuumalla puolella on ohut alumiinifolio.

Liimatuissa rakenteissa käytettiin Carborundumin ja Thermal Ceramicsin toimittamia kuituhuopia sekä taustaeristeinä Parocin toimittamia huopia ja levyjä. Näiden valmistajia sekä luokituslämpötiloja ja valmistajien antamia tiheystietoja on taulukossa 3. Moduulien ja pehmeiden huopamateriaalien ja vuorivillan lisäksi liimatuissa rakenteissa käytettiin kovetettuja Ceraboard 1100 -levyjä.



*Kuva 10. Pyrobloc-moduuli.*



*Kuva 11. Prismobloc-moduuli.*

Pyrobloc- ja Prismobloc-moduuleille ja lisäksi joillekin Ceraboard 1100 -levyille tehtiin "vastaanottotarkastus" mittaamalla ja punnitsemalla joitakin moduuleja ja levyjä sekä analysoimalla niiden materiaalit. Samalla analysoitiin muut kuumimpaan osaan tarkoitettut kuituhuopamateriaalit (analyysit tehtiin Rautaruukki Oy:n tutkimuskeskuksessa Raahessa). Moduulien mittaustulokset on esitetty taulukossa 3. Lisäksi punnittiin ja mitattiin kolme Ceraboard 1100 -levyä. Levyjen ulkomitat olivat 1 000 x 600 x 25 mm ja painot 5,0729 kg, 5,048 kg ja 4,968 kg. Näistä laskettuna Ceraboardin tiheys on 335 kg/m<sup>3</sup>. Analyysitulokset on esitetty taulukossa 4.

*Taulukko 3. Tutkittujen moduulien mittoja ja painoja.*

Pyrobloc		Prismobloc, uusi		Prismobloc, vanha	
Paino / g	Mitat / mm	Paino / g	Mitat / mm	Paino / g	Mitat / mm
6 891,6	300 x 300 x 305	5 997,6	350 x 300 x 305	4 683,9	350 x 300 x 290
6 003,0	295 x 300 x 300	6 119,3	350 x 300 x 305	4 690,6	350 x 300 x 295
5 713,4	300 x 300 x 300	5 932,6	350 x 300 x 305	4 617,4	360 x 280 x 290 <sup>*</sup>
6 594,5	295 x 305 x 310	6 015,8	350 x 300 x 305	4 731,8	350 x 285 x 290
6 791,7	300 x 300 x 300	6 147,5	340 x 305 x 305	4 786,0	360 x 280 x 300

(\* Kapeni silmin nähden toista päätä kohti, 290 -> 260 mm.

*Taulukko 4. Kuitutuotteitten analyysituloksia.*

Näyte	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Zrk-160, Carborundum-Kerlane	31,7	51,6	15,8	0,001	0,043	0,001
Pyrobloc	35,1	49,7	14,3	0,100	0,010	0,100
Prismobloc, uusi	29,7	52,6	17,0	0,057	0,004	0,057
Prismobloc, vanha	29,6	52,2	17,4	0,062	0,030	0,062
Zrk-160, Thermal Ceramics	34,7	50,3	14,2	0,102	0,009	0,102

## 3.2 Rakenteet

Moduulirakenteet asennettiin maahantuojien tai valmistajien antamien ohjeiden mukaan ja tarvittaessa tarkoitukseen valmistetuilla erikoistyökaluilla.

Pyrobloc-moduulien asennus tapahtuu erikoistyökalulla, jonka avulla moduuli kiinnitetään keskellä olevan alumiiniputken läpi uunin vaippaan. Työkalun toiminnot ovat ensin hitsaus, sen jälkeen pultin kiertäminen paikalleen. Kiinnittävät teräsovat koostuvat tasta, kiinnitysosasta sekä kahdesta teräsputkesta, joihin moduulin puolikkaat on varras-tettu. Lisäksi moduuleja ja moduulirakenteita tiivistetään jälkikäteen joka puolelta mm. erilaisilla “kulmarautoilla”, joten esim. taulukon 3 mitat voivat hieman muuttua (mate-riaali voi hieman tiivistyä).

Prismobloc-moduulien asennukseen liittyvät seuraavat työvaiheet: Kiinnitystappien paikkojen mittaaminen, 40 mm kierretappien hitsaus kiinni uunin vaippaan, taustavillaker-roksen asennus, (erillisten Al-pinnoitettujen huopien saumakohdat tiivistetään Al-tei-pillä, moduulin sovittaminen paikalleen, kiinnitys ruuveilla. Kun joukko moduuleja on kiinnitetty, muovipussin vetäistään pois moduulien päältä. Lopuksi moduulirakenne tiivistetään kulmarautojen ym. työkalujen avulla. Prismobloc-kerrosten väleissä on li-säksi yksi kerros 20 mm:n kuituhuopaa.

Liimattuun rakenteeseen kuuluu tavallisesti tapeilla kiinnitettävä taustarakenne, jonka kuumalle puolelle liimataan kuitusuikaleita yksi tai useampia kerroksia siten, että suika-leet ovat poikittain kaasun virtaussuuntaan nähden. Työvaiheet ja materiaalit ovat tap-pien hitsaus uunin vaippaan, taustaeristeiden asennus tappeihin, kovetetun kuitulevyn kiinnittäminen tappeihin pulteilla, kuituhuopasuikaleista valmistetun kerroksen liimaa-minen kuitulevyn pintaan, mahdollisen toisen kerrokseen liimaaminen edellisen pintaan ja rakenteen tiivistäminen.

Koeuuniin asennettiin useita erilaisia taustaeristeitä. Kuitusuikalekerroksia oli osassa uunia yksi, osassa kaksi. Kuitusuikalekerrosten paksuudet olivat eri kohdissa erilaisia. Erilaisia versioita luetellaan taulukossa 5. Version 1B kaaviokuva on kuvassa 12.

*Taulukko 5. Koeuunin liimattujen rakenteitten materiaalit.*

*Versio 1A, vasemman seinän polttimen puoleinen osa.*

Sijainti ja kiinnitys	Valmistaja ja tyyppi	Paksuus	Luokitus/tiheys
Vaippaa vasten, kiinni tapeissa	Partek Paroc Oy Ab Paroc Sullontavilla SV	75	(sullottu; tiheys vaikeasti määritettävissä)
Edellisen kuumalla puolella, tapeissa	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	25	1 260/128

Rakenteen keskellä, kiinnitetty pulteilla tappeihin	Ceraboard 1100-levy	25	
Liima	Borgestad Sement 70	1 - 2	
Kuituhuopasuikalekerros	ZrO <sub>2</sub> -pitoinen alumiini-silikaattihuopa, Cerachem Blanket	200	1 400/160

*Versio 1B, vasemman seinän luukun puoleinen osa mittauspisteitten kohdalta.*

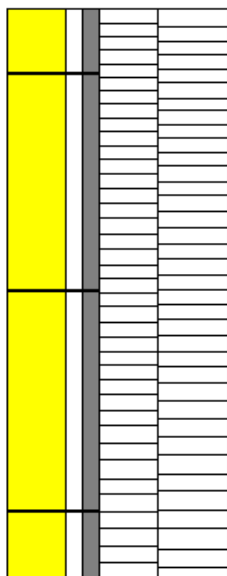
Sijainti ja kiinnitys	Valmistaja ja tyyppi	Paksuus	Luokitus/tiheys
Vaippaa vasten, kiinni tapeissa	Partek Paroc Oy Ab Paroc sullontavilla SV	75	(sullottu; tiheys vaikeasti määritettävissä)
Edellisen kuumalla puolella, tapeissa	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	25	1 260/128
Rakenteen keskellä, kiinnitetty pulteilla tappeihin	Ceraboard 1100 -levy	25	
Liima	Borgestad Sement 70	1 - 2	
Kuituhuopasuikalekerros	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	75	1 260/160
Kuituhuopasuikalekerros, liimattu ed. pint.	ZrO <sub>2</sub> -pitoinen alumiini-silikaattihuopa, Fiberfrax	120	1 400/160

*Versio 2, vasemman seinän ylä- ja alaosa sekä katon liimatun osan vasen puoli.*

Sijainti ja kiinnitys	Valmistaja ja tyyppi	Paksuus	Luokitus/tiheys
Vaippaa vasten, kiinni tapeissa	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	50	1 260/96
Edellisen kuumalla puolella, tapeissa	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	2 x 25	1 260/128
Rakenteen keskellä, kiinnitetty pulteilla tappeihin	Ceraboard 1100 -levy	25	
Liima	Borgestad Sement 70	1 - 2	
Liimattuna, suikaleina	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	75 (kattossa 100)	1 260/160
Liimattuna, suikaleina	ZrO <sub>2</sub> -pitoinen alumiini-silikaattihuopa, Fiberfrax/Carborundum	120 (kattossa 75)	1 400/160

*Versio 3, katon liimatun osan oikea puoli.*

Sijainti ja kiinnitys	Valmistaja ja tyyppi	Paksuus	Luokitus/tiheys
Vaippaan hitsattuun verkkoon liimattu, suikaleina	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	100	1 260/128
Liimattuna, suikaleina	Alumiinisilikaattihuopa, Carborundum-Kerlane	100	1 260/160
Liimattuna, suikaleina	ZrO <sub>2</sub> -pitoinen alumiinisilikaattihuopa, Fiberfrax/Carborundum	100	1 400/160



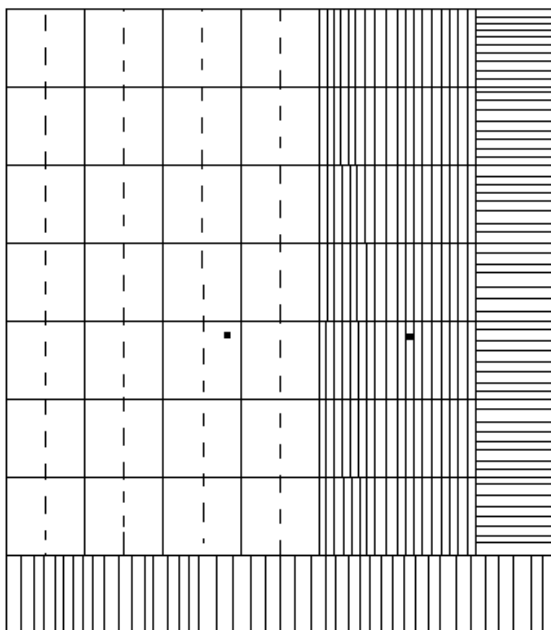
*Kuva 12. Liimatun seinärakenneversion 1B kaaviokuva.*

Liitteessä A esitetään valokuvasarja koeuunin rakenteista ja eristeistä.

### 3.3 Työvaiheet

Oikean seinän koko on 2 100 x 2 400 mm. Rakenne on esitetty kuvassa 13. Seinän eristys koostuu moduuleista, kooltaan n. 300 x 300 x 300 mm, lukuun ottamatta alareunaa, johon on tehty kuitusuikaleista kapeampi (100 mm, korkeus 300 mm) reuna. Samanlainen alareuna on myös poltinseinän ja vasemman seinän alaosassa. Tämän yläpuolella vasemmalla (polttimen puoleisessa osassa) on Pyrobloc-alue, leveydeltään neljä mo-

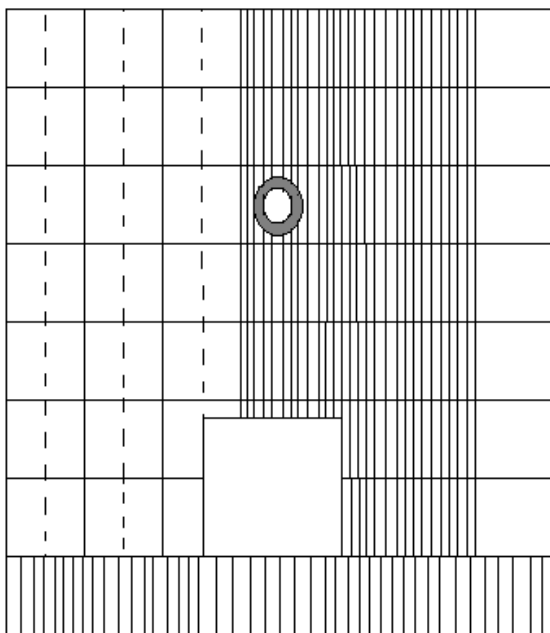
duulia, oikealla Prismobloc-alue, leveydeltään kolme moduulia. Pyroblocien sauman suunta on ylhäältä alas; Prismobloceista kahden vasemmanpuoleisen moduulin huopien suunta on ylhäältä alas, luukun puoleisen moduulin huovat ovat vaakasuorassa. Tällaisia kerroksia tehtiin ensin kolme. Sen jälkeen kiinnitettiin termoelementit, joista pääosa johdettiin paikalleen kuitumoduulikerrosten välistä. Lopuksi kerroksia jatkettiin ylöspäin uunin kattoon asti. Prismobloc-kerroksista kaikkiaan neljä alimmaista tehtiin uunia varten toimitetuista moduuleista (Prismobloc, uusi), kolme ylintä aiemman toimituserän tuotantomoduuleista (Prismobloc, vanha).



*Kuva 13. Uunin oikea seinä. Vasemmalla Pyrobloc-moduulit, oikealla Prismoblocit.*

Poltinseinän koko on 2 400 x 2 400 mm. Keskellä 300 mm alareunasta on savukaasukanavaa varten tehty aukko kooltaan 450 x 450 mm, 1 000 mm tämän yläpuolella poltin-aukko,  $\phi$  100 mm. Poltinseinän rakenne on esitetty kuvassa 14. Rakenne on jotakuinkin samanlainen kuin oikean seinän, vasemmalla puolen Pyrobloc-moduulit, oikealla Prismobloc-moduulit; molempia kolme moduulia/kerros. Termoelementit kiinnitettiin kolmannen ja neljännen kerroksen väliin samalla tavoin kuin oikealla seinälläkin. Poltin-aukko porattiin Prismobloc-moduulin läpi ja laajennettiin kartioksi veitsellä sekä pinnoitettiin.

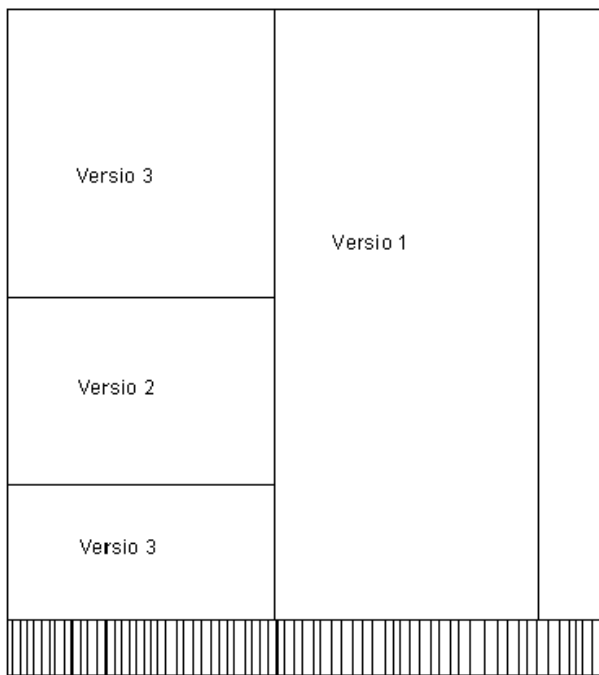




*Kuva 14. Poltinseinä. Vasemmalla Pyrobloc-moduulit (3), oikealla Prismoblocit (3), äärimmäisenä oikealla Pyrobloc-moduuleja (kulmassa olevat moduulit, samat kuin oikeassa seinässä äärimmäisenä vasemmalla). Yläosassa poltinaukko, alaosassa neliömäinen aukko savukaasun poistoa varten.*

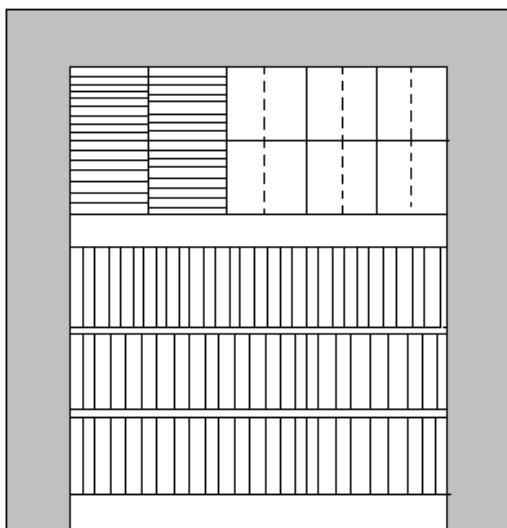
Vasen seinä, kooltaan 2 100 x 2 400 mm, koostuu liimatuista rakenteista kuvan 15 mukaisesti. Mittauspisteitten kohdalla on molempien taustarakenteen samanlainen: seinästä lukien kaksi kerrosta Parocin sullontavillaa (Paroc SV), sullottuna yhteensä 75 mm, 25 mm kerros alumiinisilikaattihuopaa (128 kg/m<sup>3</sup>) ja kovetettu Ceraboard 1100 -levy (25mm). Tämän päälle liimattiin poltinseinän puolelle yksi huopasuikalekerros, paksuudeltaan 200 mm. Luukun puoleiseen osaan liimattiin vastaavasti kaksi kerrosta, ensin Ceraboard-levyn pintaan 75 mm paksu kerros, sen päälle 120 mm:n kerros. Kaikkien kuituhuopasuikaleitten suunta oli ylhäältä alas. Vasemman seinän taustaeristeiden paksuus oli yhteensä 120 - 140 mm, kokonaispaksuus n. 320 mm. Rakenteen on esitetty myös taulukossa 5 (versiot 1A ja 1B).

Vasemmassa seinässä kokeiltiin myös erilaisten taustaeristeitten vaikutusta: luukun puoleisen puolikkaan ylä- ja alaosan taustavuoraus koostui alumiinisilikaattihuovista: vai-pasta lukien 50 mm 1 260-laattaa (96 kg/m<sup>3</sup>), 2 x 25mm 1260-laattaa (128 kg/m<sup>3</sup>). Rakenteen on esitetty taulukossa 5, versio 2.



*Kuva 15. Vasemman seinän eristysalueet. Versioitten rakenne on lueteltu taulukossa 5.*

Katto koostuu kuvan 16 mukaisesti osaksi moduuleista, osaksi liimatusta rakenteesta. Polttimeen puoleisessa päässä on kaksi riviä moduuleja, oikealla puolen Pyrobloc-moduuleja, vasemmalla Prismobloc-moduuleja. Etuosa koostuu liimatusta rakenteesta: vasemman puolen taustaosien rakenne on sama kuin taulukon 5 version 2, kuitusuikalekerrosten paksuudet taustasta päin lukien 120 ja 75 mm. Oikea puoli (taulukon 5 versio 3) koostuu kolmesta kuituhuopasuikalekerroksesta, joista jokaisen paksuus on 100 mm, laadut ja tiheydet vaipasta lukien 1 260/128, 1 260/160 ja 1 400/160.



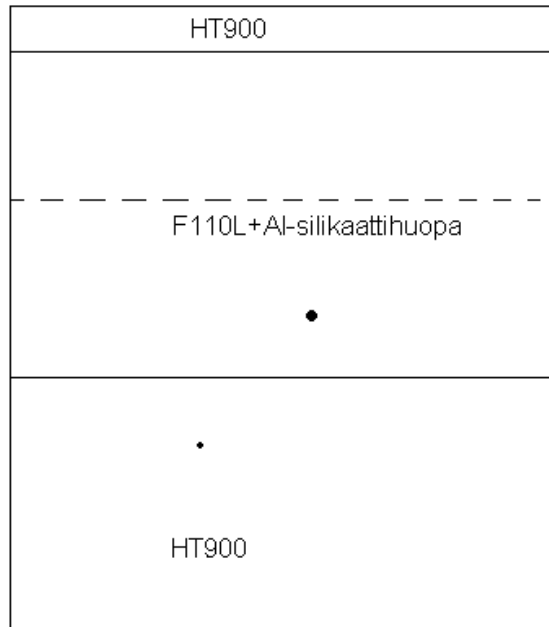
*Kuva 16. Uunin katto. Vasemman, oikean ja yläreunan harmaat alueet on esitetty sivuseinien ja poltinseinän yhteydessä. Kuvassa vasemmalla ylhäällä on Prismobloc-alue, oikealla ylhäällä Pyrobloc-alue. Alaosa (luukun puoleinen osa) koostuu liimatusta rakenteesta; vasemman puolen taustavuoraus on taulukon 3 version 2 mukainen, oikean version 3.*

Luukun taustaeristeet tehtiin Parocin toivomusten mukaisiksi. Alaosassa olivat taustaeristeenä liimatun rakenteen alla pelkästään HT900-vuorivillalevyt, paksuus 2 x 50mm, korkeus 950 mm. Tämän yläpuolella oli taustaeristeenä 75 mm kerros Parocin F110L-villaa + 25 mm 1260-laadun Al-silikaattivillaa (128 kg/m<sup>3</sup>) ja Ceraboard 1100-levy (25 mm), ylempänä toisen toimittajan vastaava levy (kuva 17). Taustaeristekerrosten päälle liimattiin kuituhuopasuikaleista kaksi kerrosta, ensin 1 260/128-huovasta tehtyjä, päälle 1 400-laadun huopaa. Paksuudet olivat yläosassa 75 ja 120 mm, alaosassa 100 ja 125 mm. Pintakerroksen kuituhuopien suunta käy ilmi kuvasta 18. Luukkuun kiinnitettiin lisäksi vastusten ripustusjärjestelmä: ensin kiinnitettiin rivi keraamisia tappeja kahden kuituhuovan väliin ja nämä moduulit kiinnitettiin kahden pintakerroksen huopasuikalerivin väliin.

Uunin seinät ja katto pinnoitettiin Unicote M -pinnoitteella (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 50 - 53 %, SiO<sub>2</sub> 32 - 35 %, SiC 8 - 10 %), samoin puolet luukusta. Luukun toinen puoli ja poltinaukko pinnoitettiin ZrO<sub>2</sub>-pitoisella Unicote Z -pinnoitteella. Pinnoite levitettiin ruiskuttamalla ja ruiskutusjälki tasoitettiin lastalla.

Eristekerrosten kokonaispaksuus oli n. 300 - 320 mm. Keskimäärin ohuimpia olivat Pyrobloc-moduulit, yleensä 300 - 310 mm. Prismoblocien ja liimattujen rakenteiden

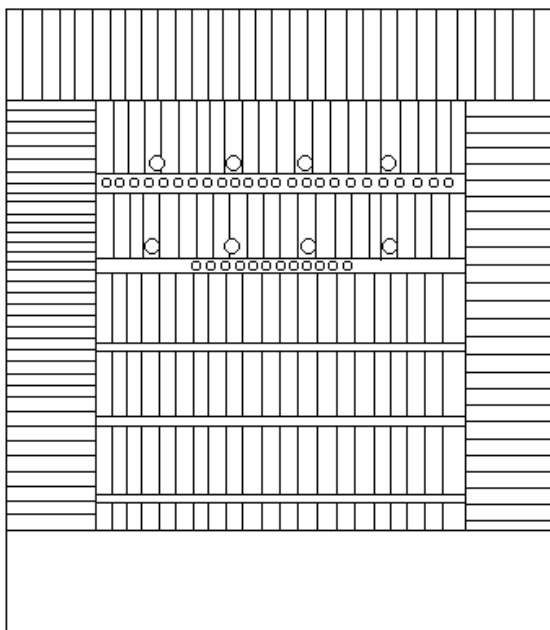
paksuus oli yleensä 310 - 320 mm. Selvää paksuuseroa ei esim. erilaisten rakenteiden liittymäkohdissa kuitenkaan ollut havaittavissa.



*Kuva 17. Luukun taustaeristealueet.*

Arina koostui 100 mm paksusta Siporex-harkkokerroksesta (harkkojen koko 100 x 200 x 600 mm), niiden päällä olevasta eristystiilikerroksesta (H26, paksuus 65 mm) ja 25 mm kerroksesta kuituhuopaa (128 kg/m<sup>3</sup>). Näiden päällä oli arinan keskellä neljä tulenkästävästä massasta (Hasle D39A + 3 painoprosenttia ohuita n. 20 mm pitkiä teräslankoja) valettua laattaa, kooltaan 550 x 440 x 100 mm.

Lämpötilamittaustietojen keruuta varten uunin seiniin asennettiin termoelementit. Moduuliseiniin asennettiin K-tyyppin termoelementit uunitilasta lukien 150 mm ja 300 mm syvyydelle siinä vaiheessa, kun kolme alinta moduulikerrosta oli paikallaan. 25 mm (seinästä n. 300 mm) syvyydelle kiinnitetyt anturit olivat keraamisessa suojaputkessa olevia S-tyyppin elementtejä ja ne työnnettiin uunin seinään ja huopakerrokseen poratun reiän läpi paikalleen. Prismoblocissa 300 mm syvyydessä oleva anturi oli kiinni alumiinifolion pinnassa, Pyroblocissa moduulin sisällä samalla syvyydellä. Liimattuun rakenteeseen termoelementit asennettiin, kun taustaeristeet oli asennettu paikalleen.



Kuva 18. Luukun pintakerros.

### 3.4 Koeajot ja mittaukset

Uunin rakenteiden kestävyuden tutkimiseksi ja eri rakenteiden lämmöneristyskyvyn vertailemiseksi uunilla tehtiin koeajot, joissa ensin pidettiin uunia  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa noin kahden viikon ajan ja sen jälkeen ja osaksi sen yhteydessä tehtiin dynaamisia ajoja, joissa lämpötila nostettiin tai laskettiin nopeasti asetusarvoonsa ja mitattiin, miten nopeasti eristeen sisälämpötilat asettuvat vakioarvoonsa. Käytännössä tätä vaihetta ei pystytty toteuttamaan yhtenäisenä kahden viikon mittaisena ajona; erilaisia ongelmia oli mm. polttimeen säätöjen, lämmön talteenotto-ongelmien, savukaasukanavan ja lämpötilamittaustietojen keruulaitteen hajoamisen ja valvontajärjestelyjen johdosta. Kaiken kaikkiaan uuni kuitenkin oli  $1\ 300 \pm 20\ ^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa yli kaksi viikkoa ja ennen kaikkia merkittäviä mittauksia vähintään vuorokauden ajan, jolloin uuni mittausten aikaan oli jotakuinkin vakio-tilassa ja ainakin eri eristeiden osalta tasavertainen.

Lämpötilat mitattiin rakennusvaiheessa asennettujen termoelementtien avulla käyttäen hyväksi VTT Energian tiedonkeruulaitteita. Lisäksi mitattiin uusin sisäosista eri kohdista lämpötiloja imupyrometrillä. Pintalämpötilat mitattiin lasermittalaitteella sekä kosket-

tavalla anturilla. Lisäksi lämpövuotojen selvittämiseksi tutkittiin uunin seinät lämpökameralla uunin lämpötilan ollessa 1 300 °C.

Uunin energiataseen selvittämiseksi savukaasujen koostumus mitattiin VTT Energian savukaasuanalyysaattoreilla.

Eristerakenteiden kestävyttä tarkkailtiin visuaalisesti ja näköhavaintojen tueksi otettiin runsaasti valokuvia aina, kun uuni ajettiin alas. Kun koeajojakso oli saatu päätökseen, otettiin uunista kuudesta kohdasta koko eristerakenteen paksuinen, halkaisijaltaan n. 200 mm:n näyte. Näiden näytteiden pohjalta tehtiin havaintoja eristeiden sisäosien ja taustaeristeiden sekä liimakerrosten kestävydestä. Joistakin kohdista otettiin näytteet SEM-kuvauksia varten. SEM-kuvaukset teetettiin Tampereen teknillisellä korkeakoululla.

Varsinaisia alkuaineanalyysejä ei tehty, koska ei ollut perusteltua syytä epäillä, että materiaaleissa olisi tapahtunut mitattavissa olevia koostumusmuutoksia. Ainoastaan "vastanottotarkastus", ts. toimitustilaisten korkealämpötilakuitueristeiden analysointi, tehtiin Rautaruukki Oy:n laboratoriossa. Tarkoituksena oli tarkistaa, että eri toimittajien tuotteet ovat toivottua laatua ja keskenään samanveroisia.

Rakenteiden erojen korostamiseksi uunilla ajettiin lopuksi kaksi korkealämpötila-ajoa, joissa uunin lämpötila nostettiin noin vuorokauden ajaksi 1 400 °C:seen. Näiden ajojen jälkeen tehtiin visuaalisia havaintoja eristeiden kestävydestä.

## 4. Koeuunin lämpötekniset tulokset

### 4.1 Lämpötilojen mittaus

Eristeiden lämpöteknillisten ominaisuuksien tutkimiseksi ja lämpötiladynamiikan selvittämiseksi eristekerroksessa mitattiin eristeiden lämpötiloja eri kohdissa testiajojen aikana. Lämpötila-arvoja kerättiin jatkuvalla mittauksella ja uunin ulkopinnan manuaalisella mittauksella sekä polttoprosessin analysointimittauksella. Viimemainittu mittaus sisälsi myös savukaasuanalyysin.

Jatkuvaa tiedonkeruuta varten asennettiin termoelementit moduuliseiniin siinä vaiheessa, kun kolme alinta moduulikerrosta oli asennettu paikalleen. Moduuliseiniin asennettiin anturit kolmelle syvyydelle, uunitilasta lukien 25 mm, 150 mm ja 300 mm:iin; koko villaeristeen paksuus kiinnitysvaiheen aikana oli noin 320 mm. Prismoblocissa 300 mm syvyydessä oleva anturi oli kiinni alumiinifolion pinnassa, Pyroblocissa villan sisällä samalla syvyydellä. 25 mm (seinästä n. 300 mm) syvyydelle kiinnitetyt anturit olivat keraamisessa suojaputkessa ja ne työnnettiin uunin seinään ja huopakerrokseen poratun reiän läpi paikalleen. 150 ja 300 mm mitta-anturit olivat joustavan metallivaipan sisällä; ne asennettiin paikalleen päätyyn tehtyjen reikien läpi ja moduulikerrosten välissä, kärki työnnettiin n. 50 mm alaspäin huopakerroksen sisään. Paikat valittiin siten, että vältettiin mahdollisia saumakohtia.

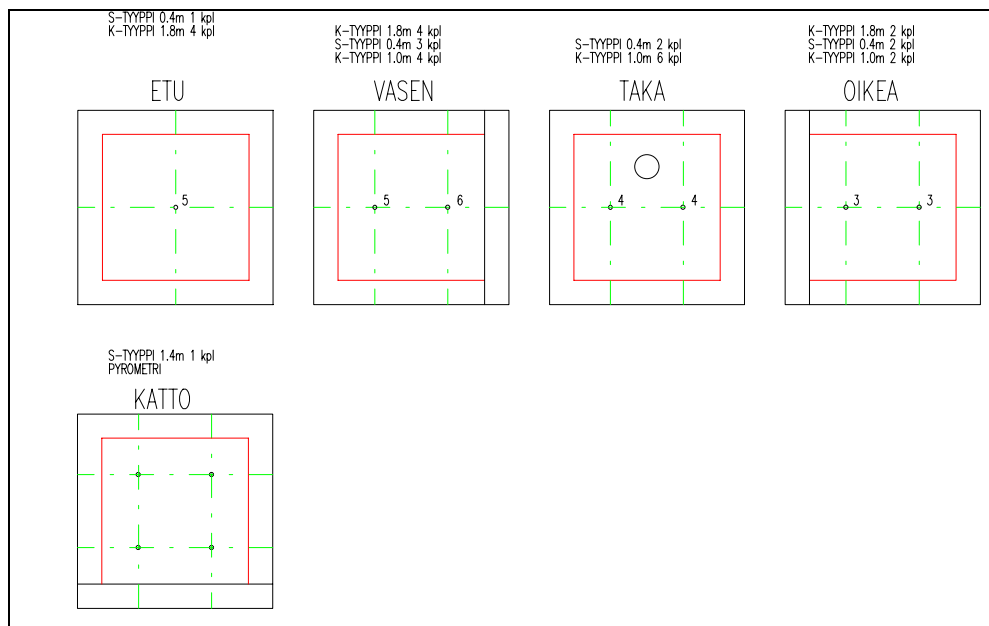
Liimattuun rakenteeseen termoelementit asennettiin, kun taustaeristeet oli asennettu paikalleen. Mittapisteen olivat vaipan lähellä (300 mm uunitilasta, 25 mm vaipasta) sekä eri eristekerrosten väleissä. Termoelementit vietiin paikalleen poltinseinään poratun reiän läpi ja Ceraboard-levyn pintaa pitkin, josta ne työnnettiin levyn ja huopien läpi mitatulle syvyydelle.

Mittapisteitten koodit ja sijaintikohdat luotellaan taulukossa 6 ja kuvassa 19 esitetään sijaintikohdat katsottuna uunia ulkoa päin, antureiden lukumäärä ja anturityypit. Etu- eli luukkuseinässä on neljän pisteen mittauslinja ja lisäksi kaksi erillistä mittapistettä, oikeassa eli moduulirakenteisessa seinässä on mittauslinja sekä Prismobloc- että Pyrobloc-moduulirakenteelle. Takaseinässä on niin ikään kaksi mittauslinjaa, vasemmassa seinässä eli liimarakenneseinässä on kaksi mittauslinjaa erityyppisille liimarakenteille ja lisäksi pari lisämittauspistettä. Katon eristeissä ei ole mitta-antureita, mutta katossa on läpivienti tulipesän termoelementille ja pyrometrimittauksille.

Taulukko 6. Lämpötilan mittauspisteet jatkuvassa mittauksessa. (Mittapisteitten korkeus oli 1 600 mm lattian pinnasta (1 220 mm uunin helmasta), ellei taulukossa ole muuta mainittu).

Koodi lt+	Sijainti	Rakenne	Syvyys/mm uunitilasta	Etäisyys/mm	Muuta
0		Uunitila	1000 mm (50 reunasta)		
1	Oikea seinä	Prismobloc	25	500 luukusta	
11	Oikea seinä	Prismobloc	150	500 luukusta	
12	Oikea seinä	Prismobloc	300 (Al-folio)	500 luukusta	
2	Oikea seinä	Pyrobloc	25	1 350 luukusta, 820 poltinseinästä	
13	Oikea seinä	Pyrobloc	150	1 350 luukusta, 820 poltinseinästä	
14	Oikea seinä	Pyrobloc	300	1 350 luukusta, 850 poltinseinästä	
5	Vasen seinä	Liimattu, versio 1A	25	1 350 luukusta, 820 poltinseinästä	
22	Vasen seinä	Liimattu, versio 1A	175	1 350 luukusta, 850 poltinseinästä	Levyn pinta, liimakerros
21	Vasen seinä	Liimattu, versio 1A	200	1 350 luukusta, 820 poltinseinästä	Al-silikaattivillan ja levyn väli
20	Vasen seinä	Liimattu, versio 1A	225	1 350 luukusta, 850 poltinseinästä	Sullontavillan ja Al-silikaattivillan väli
19	Vasen seinä	Liimattu, versio 1A	300	1 350 luukusta, 820 poltinseinästä	Sullontavilla, ulkopinnan lähellä
6	Vasen seinä	Liimattu, versio 1B	25	500 luukusta	
7	Vasen seinä	Liimattu, versio 1B	100	500 luukusta	Liimasauma
26	Vasen seinä	Liimattu, versio 1B	175	500 luukusta	Levyn pinta, liimakerros
25	Vasen seinä	Liimattu, versio 1B	200	500 luukusta	Al-silikaattivillan ja levyn väli
24	Vasen seinä	Liimattu, versio 1B	225	500 luukusta	Sullontavillan ja Al-silikaattivillan väli
23	Vasen seinä	Liimattu, versio 1B	300	500 luukusta	Sullontavilla, ulkopinnan lähellä
31	Vasen seinä	Liimattu, versio 2	175	550 luukusta, 103 lattiasta	Levyn pinta, liimakerros
32	Vasen seinä	Liimattu, versio 2	225	550 luukusta, 103 lattiasta	Kahden Al-silikaattihuovan väli (vrt 1A-B)
3	Poltinseinä	Prismobloc	25	700 mm oik. seinästä	
15	Poltinseinä	Prismobloc	150	700 mm oik. seinästä	670 mm poltinaukosta, 500 poistoaukon kulmasta
16	Poltinseinä	Prismobloc	300 (Al-folio)	700 mm oik. seinästä	- " -
4	Poltinseinä	Pyrobloc	25	700 mm vas. seinästä	
17	Poltinseinä	Pyrobloc	150	700 mm vas. seinästä	kuten kohta 15
18	Poltinseinä	Pyrobloc	300	700 mm vas. seinästä	kuten kohta 15
8	Luukku	Paroc/Liimattu	25	1 200 oik. reunasta, 1 620 lattiasta	
30	Luukku	Paroc/Liimattu	200	1 200 oik. reunasta	HT900-levyn pinta
28	Luukku	Paroc/Liimattu	225	1 200 oik. reunasta	F110L-levyn pinta
27	Luukku	Paroc/Liimattu	300	1 200 oik. reunasta	Ulkopinnan läheltä
33	Luukku	Paroc/Liimattu	175	810 luukun vas. reunasta, 2 020 lattiasta	1100-levyn pinta
29	Luukku	Paroc/Liimattu	200	790 reunasta, 950 lattiasta	Al-silikaattihuovan ja Cerabloc 1100 -levyn väli





Kuva 19. Lämpötilojen mittauslinjat.

## 4.2 Lämpötilat eristerakenteissa

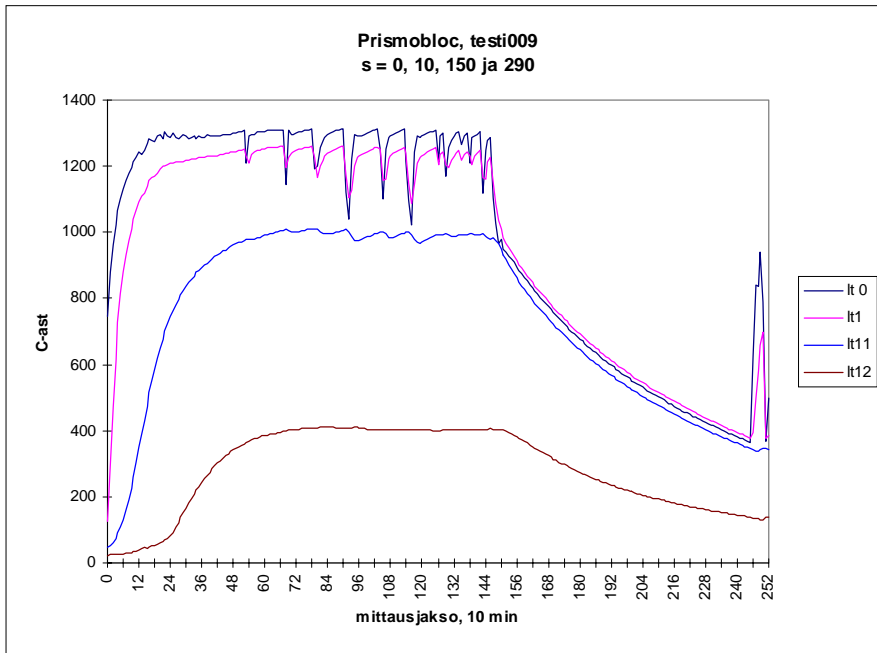
### 4.2.1 Moduulirakenteiset seinämät

#### 4.2.1.1 Prismobloc

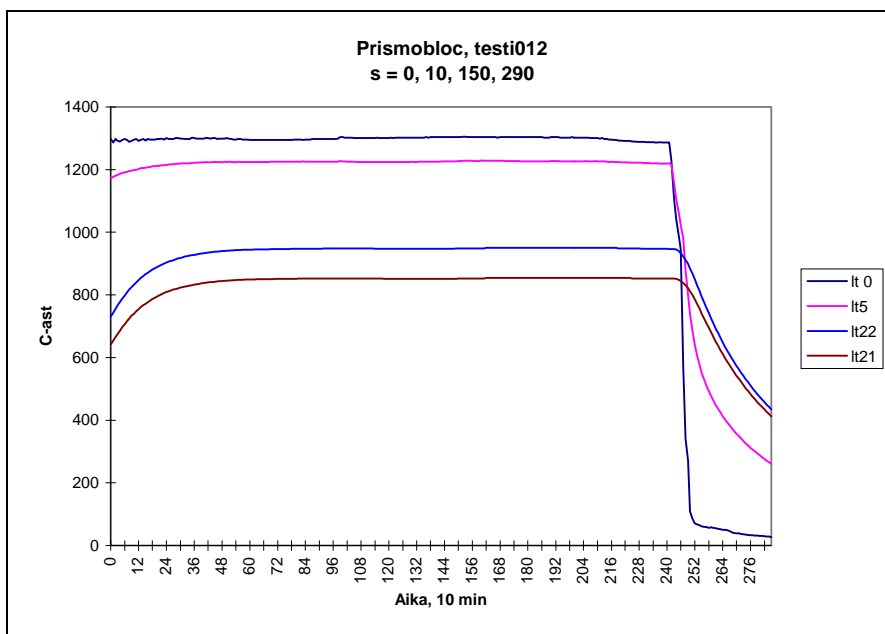
Vasemman seinän Prismobloc-rakenteessa on kolme mittauspistettä. Niiden lisäksi esitettävissä kuvissa on palotilan lämpötila. Kuvassa 20 esitetään testiajon 3 lämpötiläkäyrät. Ajon alkuvaiheessa tulipesän lämpötila nousi hallitusti noin 1 300 °C:seen, mutta polttimen säätöalue ei ollut oikea, ja ajon aikana lämpötilaheilahtelut palotilassa olivat 200 - 300 °C. Eristeen sisäpinnassa lämpötilavaihtelut seuraavat palotilan vaihteluita, mutta eristeen puolivälissä vaihtelut tasaantuvat muutamaan kymmeneen asteeseen. Kuvassa aika-akselin jakoväli on 1 h ja todetaan, että tulipesä saavuttaa stationäärisen tilan kolmessa tunnissa. Ensimmäisten 2,5 cm matkalla lämpötila putoaa 50 - 60 °C, ja eristeeroksen puolivälissä lämpötila saavuttaa noin 1 000 °C. Lähellä ulkopintaa eli eristeessä 300 mm:n kohdalla lämpötila on vielä 400 °C:ssa.

Polttimen säädön korjaamisen jälkeen tulipesän lämpötila pysyi hyvin ohjausarvossaan, kuten testiajon 12 lämpötiläkäyrät kuvassa 21 osoittavat. Testin lopussa poltin on sammutettu ja palotilan lämpötila putoaa kahdessa tunnissa 50 °C:seen. Kuvan 22 avulla voidaan tarkastella, tapahtuuko eristeessä muutoksia heti käyttöönoton jälkeen. Kuvassa on useiden testiajojen lämpötiläkäyrät eristekohdan funktiona stationäärisessä tilanteessa ja ne ovat yhdenmukaisia, ja keskinäiset erot aiheutuvat lämpötilaeroista palotilassa. Näin ollen eristeiden kuivuminen ei näyttäisi aiheuttavan muutosta lämmönjohtavuus-

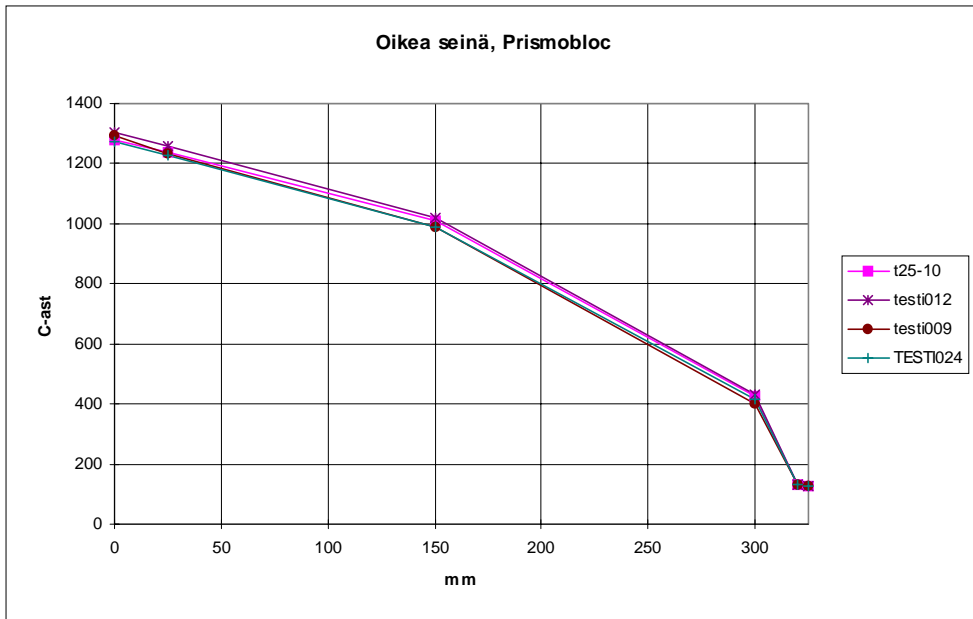
teen. Verrattaessa vasemman seinän Prismobloc-eristettä poltinseinän vastaavaan rakenteeseen ominaisuuseroja ei ole havaittavissa (kuva 23).



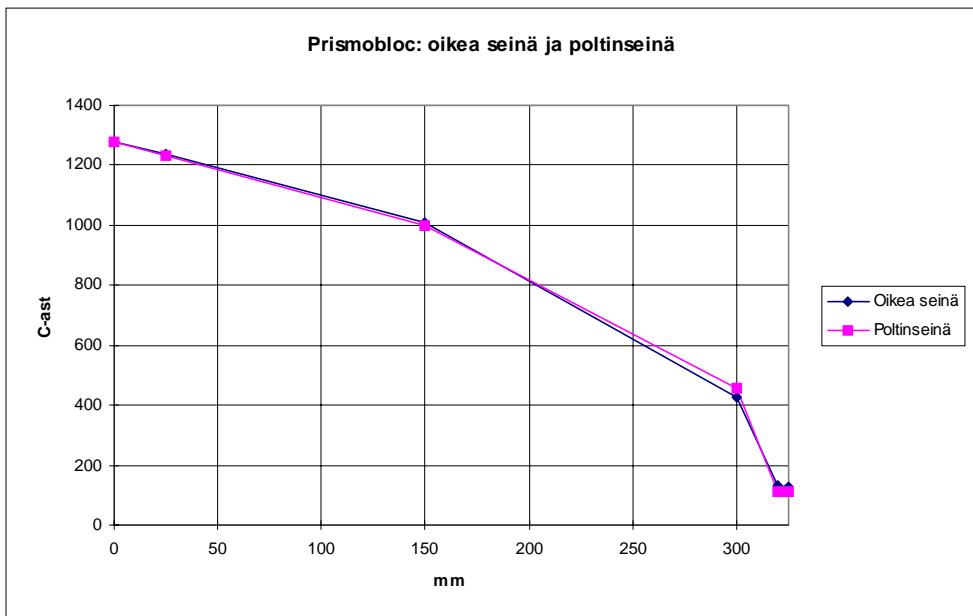
Kuva 20. Lämpötilat Prismobloc-rakenteessa uunin oikeassa seinässä, testi 9.



Kuva 21 Lämpötilat Prismobloc-rakenteessa uunin oikeassa seinässä, testi 12.



Kuva 22. Lämpötilaprofiilit Prismobloc-rakenteessa eri testeissä.

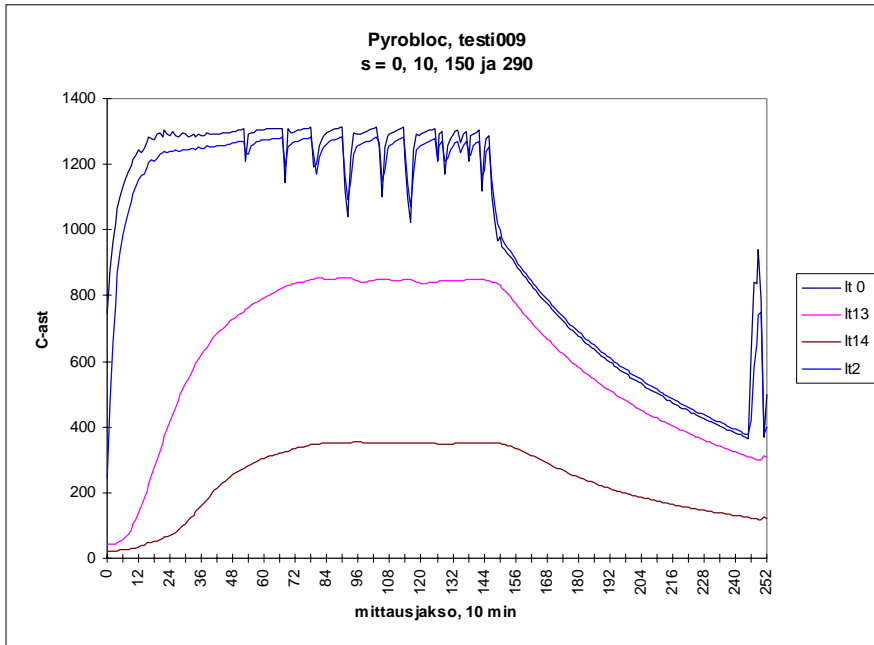


Kuva 23. Prismoblocin lämpötilaprofiili oikeassa seinässä ja poltinseinässä.

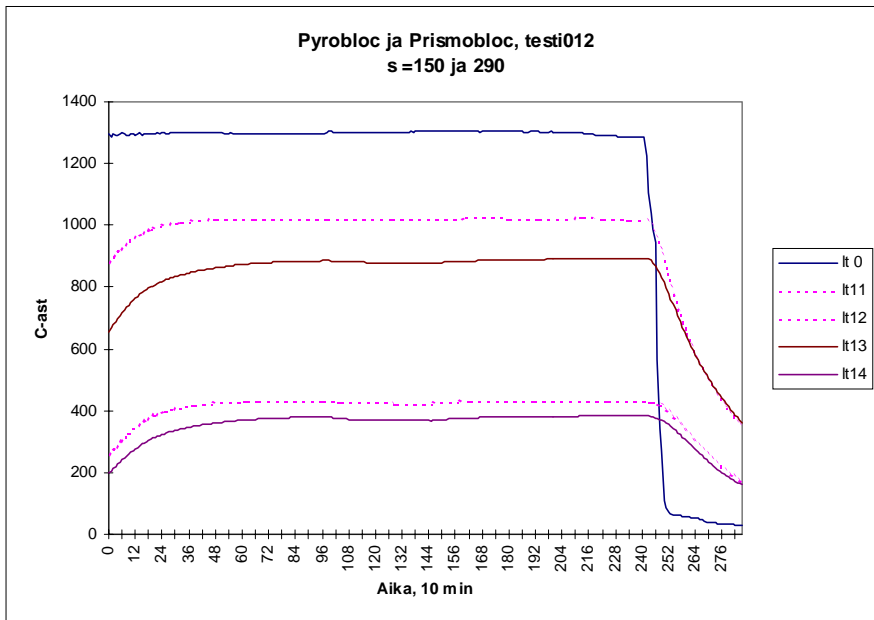
#### 4.2.1.2 Pyrobloc

Vasemman seinän Pyrobloc-rakenteesta esitetään myös testiajo 9:n lämpötilan aikakäyrät (kuva 24). Lämpötilakäyrät osoittavat, että eristeen puolivälissä lämpötila kohoaa 800 °C:seen ja ulkopinnan läheisyydessä noin 350 °C:seen. Lämpötilaerot vastaaviin

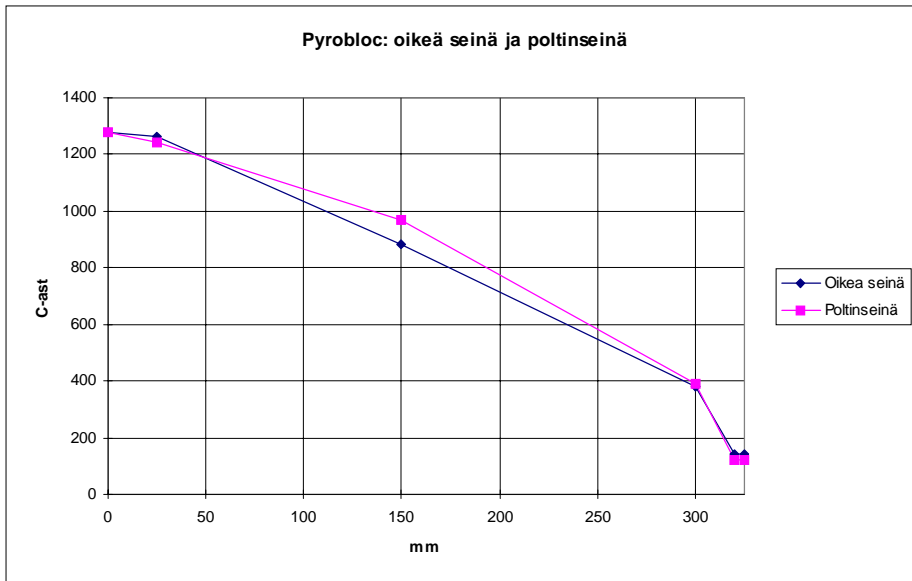
Prismobloc-arvoihin ovat huomattavat. Tämä näkyy myös kuvassa 25, jossa on testiajo 12:n lämpötilat seinämän keskiosassa ja ulkoreunalla sekä Prismoblocille että Pyroblocille. Vasemman seinän Pyrobloc-lämpötilat ovat myös alempia kuin poltinseinän vastaavan rakenteen arvot, kuten todetaan kuvasta 26.



Kuva 24. Oikean seinän Pyrobloc-rakenteen lämpötilakäyrät, testi 9.

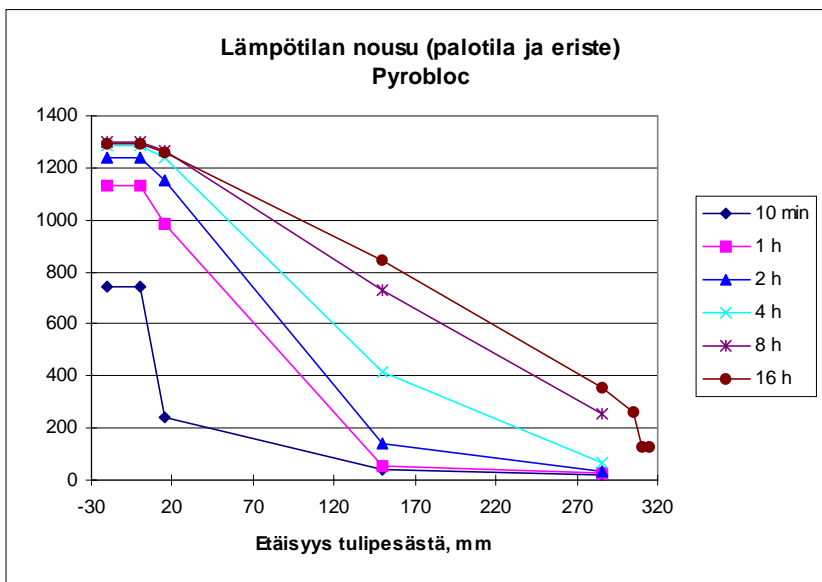


Kuva 25 Pyrobloc- ja Prismobloc-rakenteiden lämpötilavertailu.

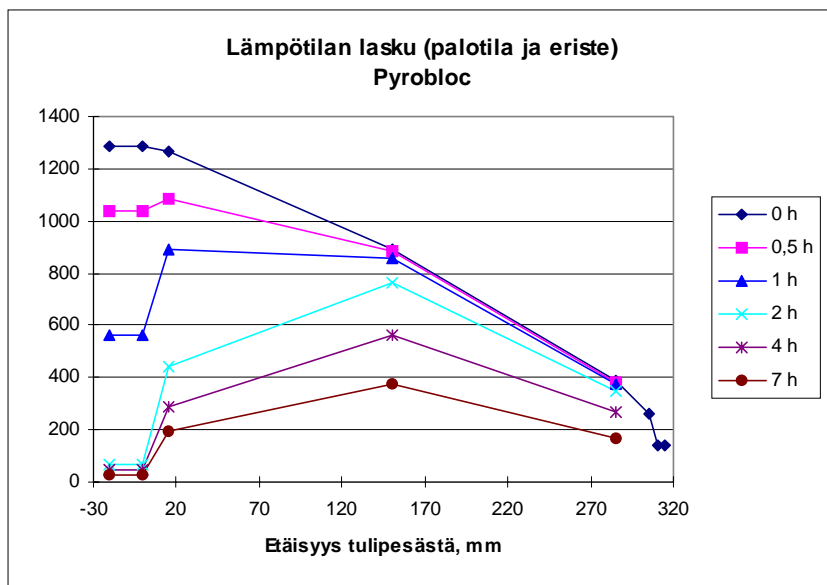


Kuva 26. Pyroblocin lämpötilaprofiili oikeassa seinässä ja poltinseinässä.

Pyrobloc-rakenteelle esitetään kuvassa 27 ja 28 lämpötilat, kun aika on parametrina. Edellisessä kuvassa on kysymyksessä lämpötilan nosto 1 300 °C:seen ja jälkimmäisessä kuvassa lämpötilan lasku. Kuvien perusteella voidaan päätellä, kuinka korkealle lämpötila nousee eristekerroksen eri kohdissa uunin eripituisten ylösajojen seurauksena. Esimerkiksi neljä tuntia ylösajon jälkeen on eristekerroksen keskelle noin 400 °C lämpötila, kun se kahdeksan tunnin kuluttua on n. 700 °C.



Kuva 27. Lämpötilan kehittyminen eristeessä eri ajanhetkillä uunin ylösajossa.



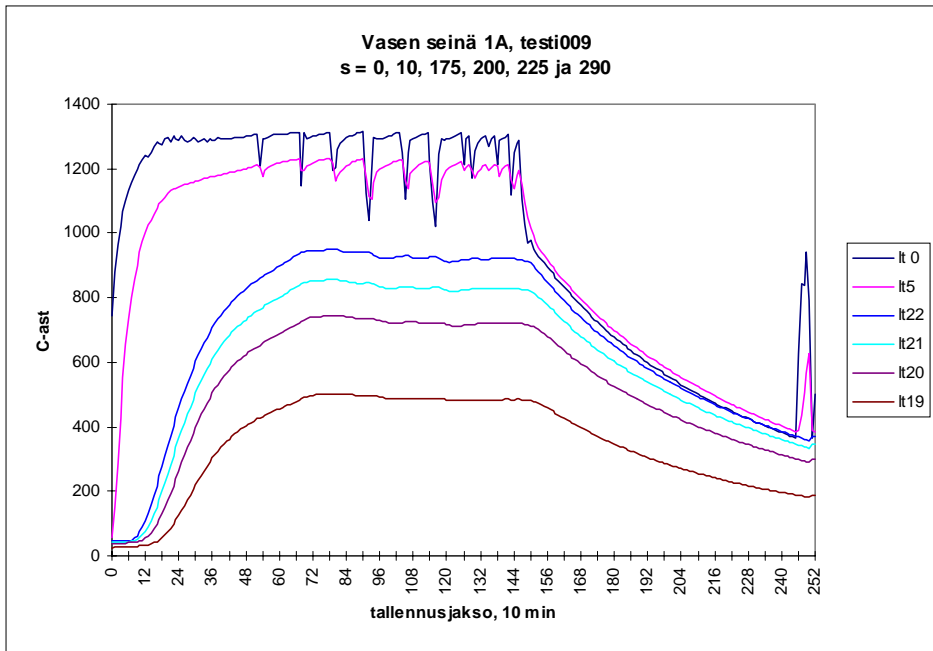
Kuva 28. Lämpötilan kehittyminen eristeessä eri ajanhetkillä uunin alasajossa.

#### 4.2.2 Liimatut eristerakenteet

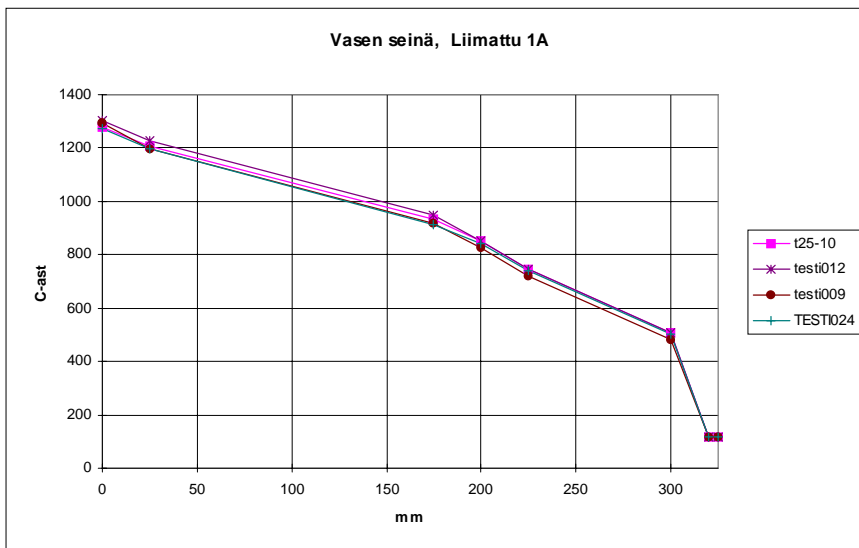
Uunin vasemman seinämän liimarakenne 1A muodostuu useammasta eristekerroksesta ja lämpötilamittauksia oli eristeessä yhteensä viisi. Kuvassa 29 esitetään lämpötilakäyrät ajan funktiona testiajossa 9. Mittaukset ovat kuitueristeen alkuosassa (25 mm) ja kuitueristeen jälkeen olevan kuitueristevyyn kummallakin puolella (175 ja 200 mm) ja sen jälkeen Al-silikaattivillan ja sullovillan välissä (225 mm) ja reunalla (300 mm).

Lämpötilan aleneminen (n. 100 °C) ensimmäisten senttien matkalla on mittausten mukaan selvästi suurempaa kuin moduulirakenteissa. Eristekerroksen ulkoreunalla (300 mm) lämpötilat ovat lähempänä 500 °C:ta, mikä on puolestaan korkeampi arvo kuin moduulirakenteissa. Kuitueristelyvy on 800 - 900 °C lämpötilassa. Stationääristä tilaa osoittavasta kuvasta 30 voidaan päätellä, että eristeen keskiosassa (150 mm) lämpötila on n. 1 000 °C.

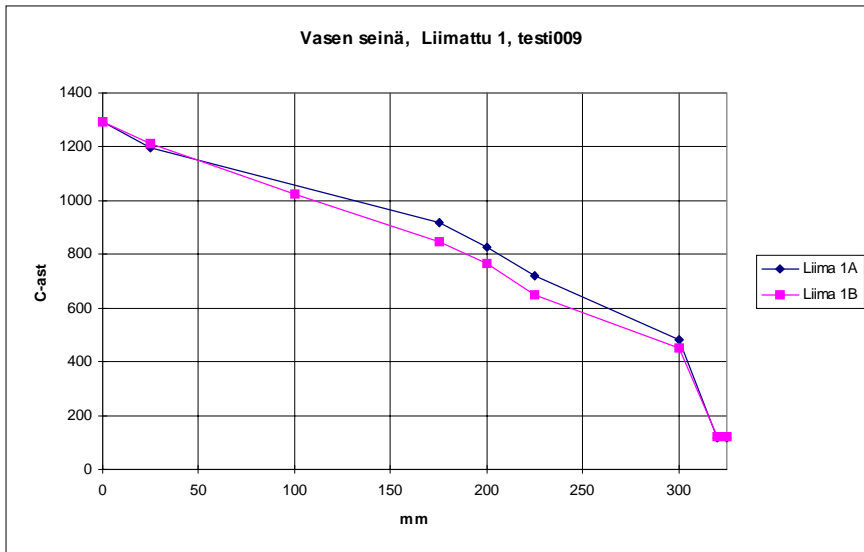
Kuvassa 31 vertaillaan liimatun rakenteen 1 A ja 1B -versioiden lämpötiloja stationäärisessä tilanteessa. Lämpötilat versiossa 1B jäivät jonkin verran alemmiksi kuin 1A:n lämpötilat eristeen keskiosissa, mutta ero pienenee reunalle päin mentäessä.



Kuva 29. Lämpötiläkäyrät vasemman seinän liimatussa 1A-rakenteessa, testi 9.



Kuva 30. Liimatun 1A-rakenteen lämpötilaprofililit eri testiajoissa.



Kuva 31. Vasemman seinän liimattujen 1A- ja 1B-rakenteiden lämpötilaprofiilien vertailu.

### 4.2.3 Ulkopintojen lämpötilat

Koeuunin ulkopintojen lämpötilojen perusteella voidaan paitsi todeta pintalämpötilojen suuruus myös päätellä lämpöhäviöiden eroja eri rakenteiden läpi. Kuvassa 32 esitettävät lämpötilat on mitattu manuaalisesti pintalämpömittarilla ja varmistettu infrapunamittarilla pitkän stabiilin ajojakson loppupuolella. Oikean (moduuli-) ja vasemman (liima-) seinän keskilämpötilat on seuraavassa laskettu kuvassa olevan mittausruudukon leikkauspisteiden lämpötilojen keskiarvona:

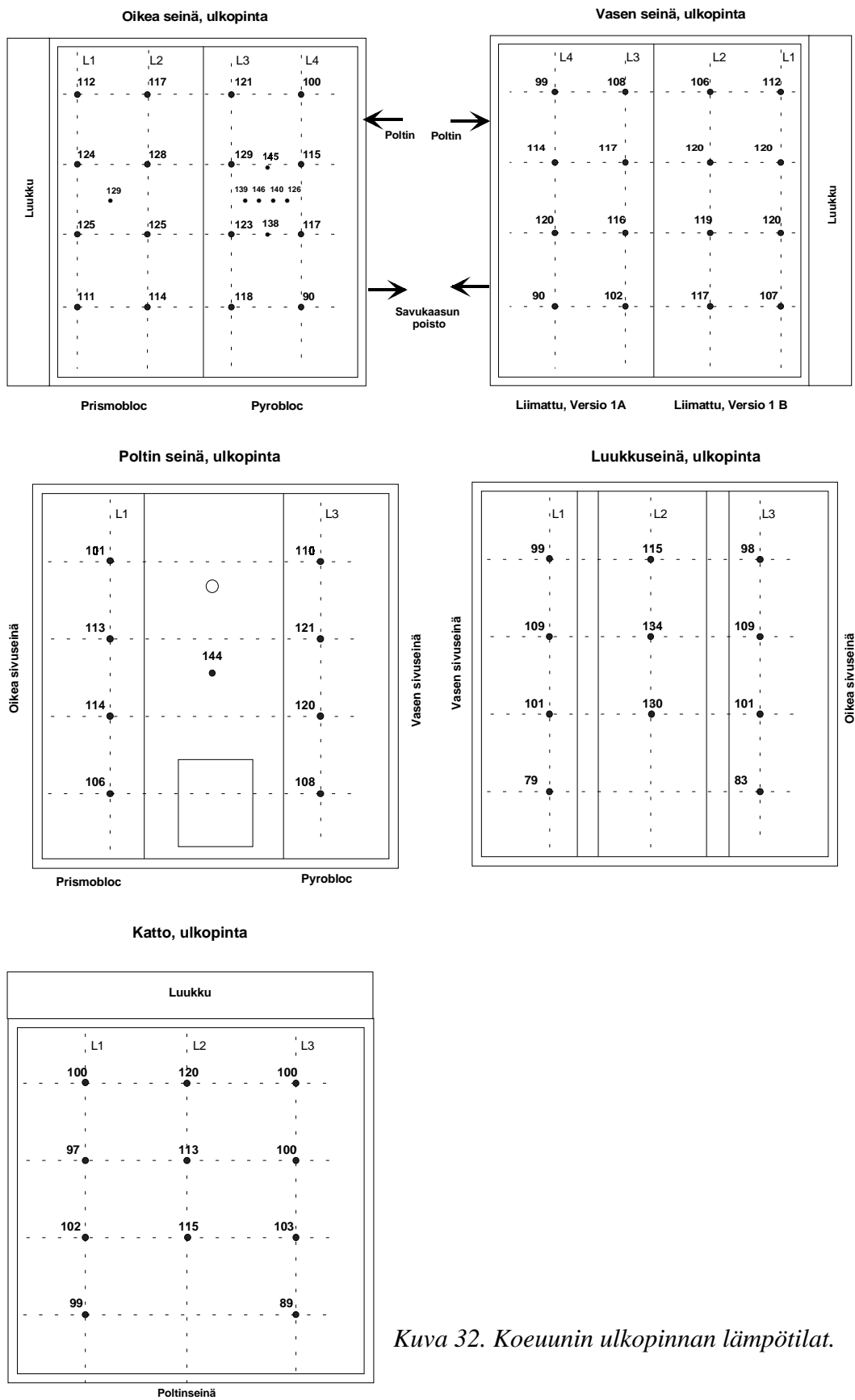
- oikean seinän keskilämpötila            116,8 °C
- vasemman seinän keskilämpötila        112,6 °C
- lämpötilaero                                5,2 °C.

Jos lämpötilaeroja tarkastellaan pystylinjojen L (ks. kuva 32) keskiarvoina, saadaan taulukon 7 mukaiset tulokset.

Taulukko 7. Pintalämpötilojen keskiarvoja pystylinjoittain.

Mittauslinja	Oikea seinä	Vasen seinä	Lämpötilaero
L1	118,1	114,8	3,3
L2	121,2	115,3	5,9
L3	122,6	110,8	11,8
L4	105,6	105,6	0,0





Kuva 32. Koeuunin ulkopinnan lämpötilat.

Sivuseinien mittausten mukaan Pyrobloc-rakenteen kohdalla pintalämpötilat ovat muutamasta asteesta korkeammat kuin Prismoblocin kohdalla ja moduulirakenteissa hieman korkeammat kuin liimarakenteissa. Tarkasteltaessa poltinseinän pintalämpötiloja todetaan, että pystylinjan pintalämpötilojen keskiarvo oli Prismobloc-rakenteen kohdalla (L1) 108,5 °C ja Pyrobloc-rakenteen kohdalla (L3) 114,7 °C. Ero on siis 6,2 °C Prismoblocin hyväksi. Luukkuseinän ulkopinnan eri puolien lämpötilat eivät poikenneet merkittävästi toisistaan. Keskilinjalla sen sijaan lämpötilat olivat korkeampia.

Pintamittausten yhteydessä todettiin Pyrobloc-rakenteen kohdalla selvästi kohonnut lämpötila-alue, jossa lukemat nousivat 146 °C:seen.

### 4.3 Palotilan ja savukaasun mittaukset

Koeuunin erikoismittausten avulla mitattiin palotilan lämpötiloja sekä savukaasujen koostumus. Palotilan mittauksissa käytettiin imupyrometria, jossa anturi on vesijäähdytetty säteilyvaikutuksen eliminoimiseksi. Anturia kannattava, halkaisijaltaan pari senttimetrinen putki pidetään palotilassa alle sadassa asteessa ja näin putken kautta veteen siirtyvä lämpö muodostaa tuntuvan osan polttimen lämpötehosta. Koeuunin tapauksessa tulipesän lämpötila laski imupyrometrin vaikutuksesta sitä enemmän, mitä syvemmällä anturi oli tulipesässä.

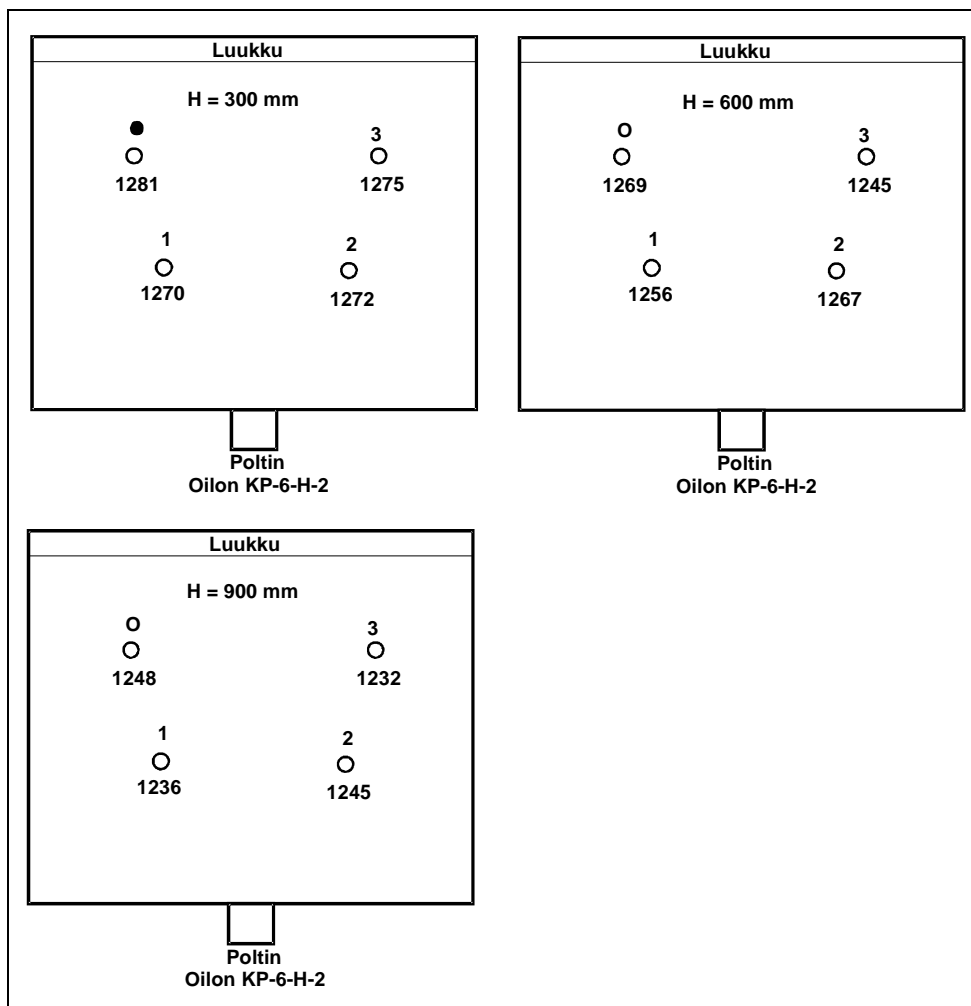
Imupyrometrimittauksia suoritettiin kolmessa tasossa (kuva 33) syvyyksien ollessa 300 mm, 600 mm ja 900 mm katosta lukien. Kuvassa mittauskohta 0 tarkoittaa kiinteän termoelementin ja kohdat 1, 2 ja 3 imupyrometrin mittauskohtia. Lämpötilalukemat on merkitty kuvaan. Todetaan, että uunin vasemmalla sivulla palotilan lämpötilat ovat jonkin verran korkeammat (10 °C tai vähemmän) kuin oikealla sivustalla ja että polttimen tasossa (h = 600 mm) lämpötilat ovat oikealla sivulla lähempänä poltinta olevassa mittauskohdassa parikymmentä astetta korkeammat kuin luukun puoleisessa mittauskohdassa. Muilla korkeustasoilla ero on pienempi.

Savukaasumittausten aikana tulipesän lämpötila oli 1 230 - 1 280 °C. Erikoisuutena koeuunissa oli lisäilman syöttö savukanavaan uunin ja lämmöntalteenottokattilan välillä. Ilmansyöttö oli osan ajasta toiminnassa ja osan suljettuna, ja savukaasun analysointitulokset erosivat vastaavasti toisistaan. Taulukossa 8 esitetään tulokset tilanteessa, jossa ilmansyöttö kanavaan oli pois toiminnasta ja taulukossa 9 on tilanne, jossa lisäilmasyöttö oli käytössä. Lisäksi taulukossa 10 ovat vertailun vuoksi kevytöljykattilan tyyppilliset savukaasukoostumusarvot.

Polttimen toimiessa puoliteholla ja lisäilmasyötön ollessa pois savukaasun koostumusta voidaan pitää hyvänä: NO-pitoisuus on keskimäärin 62 ppm ja CO-pitoisuus 11 ppm. Happipitoisuus on kattilalaitokseen verrattuna korkeampi (8 %) ja vastaavasti hiilidiok-

sidipitoisuus pienempi. Tämä johtune siitä, että koeuuni ei ole luukun reunoista täysin tiivis, vaan ilmaa virtaa alipaineessa toimivaan uuniin. Polttimen ollessa täydellä teholla ilmakerroin korjaantuu lähemmäksi optimaalista arvoa mutta häkäpitoisuus kasvaa selvästi yli kattilalaitoksen arvon.

Jos savukanavan lisäilman syöttö on toiminnassa (taulukko 9), aiheutuu tästä joitakin vaikutuksia polton päästöihin. Koska savukaasumittaus tehtiin lisäilmasyötön jälkeisestä savukaasusta, on vertailussa huomioitava savukaasumäärän kasvu lisäilman vuoksi (n. 46 %, laskettu SO<sub>2</sub>- ja CO<sub>2</sub>-pitoisuuksien avulla), mikä kasvattaa taulukon arvoja vastaavasti. Typpipäästöt eivät muutu juuri lainkaan, mutta CO-pitoisuus kasvaa moninkertaiseksi: puoliteholla 16-kertaiseksi arvoon 175 ppm ja täydellä teholla arvoon 328 ppm eli 3,6-kertaiseksi. Savukanavan paineolosuhteiden muuttaminen vaikuttaa siis voimakkaasti polttoprosessiin huonontaan hyötysuhdetta ja lisäten päästöjä.



Kuva 33. Palotilan lämpötilat imupyrometrimittauksella.

Taulukko 8. Savukaasumittausten tulokset lisäilman syötön ollessa suljettu.

	NO	SO <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	P <sub>ilma</sub>	T <sub>sk</sub>
	ppm	ppm	ppm	%	%	kPa	C
<b>Poltin I-teholla (64 kw)</b>							
keskiarvo	62	13	11	9,5	8,1	96,78	142,1
min	57	11	10	8,5	7,2	96,72	139,9
max	66	14	13	10,2	9,3	96,82	144,7
<b>Poltin II-teholla (95 kW)</b>							
keskiarvo	79	20	92	12,1	4,4	95,95	172,2
min	72	17	52	11,4	3,8	95,94	169,6
max	82	21	145	12,5	5,2	95,95	175,0

Taulukko 9. Savukaasumittausten tulokset lisäilman syötön ollessa toiminnassa.

	NO	SO <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	P <sub>ilma</sub>	T <sub>sk</sub>
	ppm	ppm	ppm	%	%	kPa	°C
<b>Poltin I-teholla (64 kw)</b>							
keskiarvo	33	9	120	6,4	12,3	96,65	143,0
min	30	7	10	5,9	11,5	96,59	141,8
max	38	11	304	7,0	13,0	96,70	144,7
<b>Poltin II-teholla (95 kW)</b>							
keskiarvo	53	14	225	8,7	9,2	96,08	175,0
min	46	12	170	7,6	8,1	95,94	170,3
max	58	16	316	9,5	10,6	96,25	178,6

Taulukko 10. Tyypillisen kattilan päästöt kevytöljypoltossa.

	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>	Hiukkaspit.
	ppm	ppm	%	%	ppm	mg/MJ
keskiarvo	< 100	< 50	13,2	3	< 10	< 10

## 5. Materiaalitekniset koeuunitulokset

### 5.1 Rakenteiden kestävyys

Uunin ulkopuolelta oli koeajojen aikana hyvin rajoitetut mahdollisuudet tehdä havaintoja. Esimerkiksi seinien värin muutoksia tai muuta paikalliseen ylikuumentumiseen viittaavaa ei havaittu. Lämpötilamittauksissa ei myöskään ilmennyt mitään, mikä olisi viittänyt materiaalien tuhoutumiseen missään kohdassa; pintalämpötilatkin nousivat merkittävästi ainoastaan polttimen ja savukaasukanavan sekä luukkuun tehdyn tirkistysaukon ympäristössä, ts. kohdissa, joissa oli lämpövuotoja odotettavissa muiden syiden kuin materiaalien tai rakenteiden tuhoutumisen johdosta. Visuaalisesti havaittiin uunin seinän vääntymisilmiöitä – oikean seinän yläosa vääntyi luukun viereltä silmin havaittavasti, samoin luukun keskiosa. Molemmat tapahtuivat hyvin varhaisessa vaiheessa, ja syyt olivat ilmeisesti muut kuin rakenteiden tai materiaalien pettäminen – seinän tukiraudoituksen lämpiäminen ensimmäisissä kokeissa luukun vuotamisen johdosta ja tirkistysreiän ympäristön kuumentuminen.

Visuaalisia havaintoja tehtiin ennen kaikkea rakenteisiin syntyneistä säröistä jokaisen alasajon aikana. Erilaisia säröjä ilmestyi rakenteisiin jo ensimmäisen koeajon jälkeen. Jatkossa samat säröt kasvoivat, mutta uusia, ainakaan merkittäviä säröjä ei syntynyt.

Liitteessä B on valokuvia, joista voi havaita säröjen kasvun koejakson aikana ja osittain seurata joidenkin säröjen kasvua.

Isoimmat säröt on havaittavissa Pyrobloc-moduuleissa, joissa huopien paksuus on 150 mm ja siten ”säröjen aihioita” vähän. Prismobloc-moduuleissa huopien paksuus on 20 mm ja ”säröjen aihioita” siten tiheämmässä. Jos/kun molempien materiaali on lämpöluokitukseltaan samaa ja kutistumaominaisuuksiltaan samanlaista, on luonnollista, että Pyroblocissa säröt ovat suurempia ja harvemmassa. Pinnointe voi vielä lisätä vaikutusta pitämällä osaa säröistä kiinni, jolloin Pyroblocissa on entistä harvempia säröjen aihioita ja säröt entistä isompia. Erikoisen runsaasti pieniä säröjä oli savukaasukanavan ympärillä olleissa Prismobloc-moduuleissa. Liimattujen rakenteiden pintakerroksessa kuitusuikaleiden paksuus on niin ikään 20 mm ja säröt ovat pieniä.

Isoimmat Prismobloc- ja liimattujen rakenteiden raot olivat kohdissa, joissa oli seinien välinen särmä (liitteen B kuvat 7 ja 9) tai joissa suikaleiden suunta muuttui (liitteen B kuvat 4 ja 10). Lisäksi suurehkoja säröjä oli liimatussa rakenteessa kohdissa, joissa rakenne muuttui erilaiseksi, esim. vasemman seinän keskellä oleva pystysuora särö (liitteen B kuvat 5 ja 11) ja katon keskellä oleva särö (jota paikattiin ensimmäisten koeajopäivien jälkeen). Vasemman seinän yläosassa oleva vaakasuora särö johtui ilmeisesti

siitä, että pinnoite piti katon ja vasemman seinän välisen ”luonnollisen” särön kiinni ja kutistuma vaikutti silloin viereiseen mahdolliseen kohtaan.

Isojen säröjen syvyyttä yritettiin selvittää mm. kokeilemalla ohuilla terästangoilla. Isoimmat Pyrobloc-moduulien väliset säröt ulottuivat lähelle uunin vaippaa, ehkä 20 - 40 mm:n etäisyydelle. Liimatun alueen säröt ulottuivat rakenteen keskellä olevaan Ceraboard-levyyn asti. Isoimpienkaan säröjen kohdalta ei pintalämpötilamittauksissa havaittu lämpövuotoja lämpötilan noston aikana eikä uunin ollessa vakiotilassa 1 300 °C:n lämpötilassa. Oikean seinän Pyrobloc-alueella havaittiin kuitenkin pystysuora alue, jolla lämpötila oli joitakin asteita korkeampi kuin molemmin puolin. Näytettä kairattaessa ei kuitenkaan saatu vahvistusta siihen, että kyseisessä kohdassa olisi ollut epätavallisen suuri moduulien välinen rako.

Pinnoitteet pysyivät hyvin kiinni kuitumateriaalissa. Ainoat hieman lohkeilleet kohdat olivat poltinaukon reunoilla, joista ZrO<sub>2</sub>-pitoinen pinnoite oli paikoin lohkeillut palasina pois (liitteen B kuva 15).

Joitakin liimattuihin rakenteisiin liittyviä havaintoja tehtiin myös seinistä kairatuista näytteistä. Vasemman seinän Ceraboard 1100 -levy oli kuumalta puoleltaan hieman haurastuneen näköinen, samoin Parocin HT900-levy, jonka pintaan oli suoraan liimattu kuituhuopasuikaleet. Viimeksi mainitun väri oli myös muuttunut. Parocin kokeissa tehtyjen värihavaintojen perusteella lämpötila oli käynyt noin 800 °C:n lämpötilassa, simulointimallien ja termoelementtimittauksen mukaan hieman korkeammallakin.

Visuaalisten havaintojen perusteella ei havaittu merkkejä siitä, että mikään koeuunin rakenne olisi ollut 1 300 °C:n lämpötilassa tuhoutumisvaarassa.

1 400 °C:n lämpötilassa tehtäviä kokeita varten isoimmat säröt paikattiin ruiskutettavalla kuitumassalla ja näytteenottokohdat paikattiin huolellisesti. Kun lämpötila nostettiin paikkausten jälkeen 1 400 °C:seen, eivät uudet kutistumasäröt syntyneet entisiin kohtiin vaan mieluummin viereisiin mahdollisiin ”säröjen aihioihin”.

Visuaalisten havaintojen perusteella kaikki rakenteet kestivät vaurioitumatta myös kaksi lyhytaikaista, n. 6 tunnin ajoa 1 400 °C:ssa. Luukkuun kiinnitetyt vastusten ripustuskokeilua varten tehdyt tapit sulivat tässä lämpötilassa, mikä osoittaa, että lämpötilaolot olivat selvästi ankarammat kuin aiemmissa kokeissa.

## 5.2 Materiaalien kestävyys

Materiaalit oli valittu niin, että niiden odotettiin kestävän koeolosuhteet (ainakin 1 300 °C) ja odotettiin ainoastaan rakenteiden välisten erojen tulevan näkyviin. Kuitenkin olo-

suhteet olivat myös materiaalien käyttölämpötilojen ylärajoilla, ja varmuuden vuoksi materiaalien kestävyyttä tarkkailtiin paitsi visuaalisesti ja manuaalisesti myös ottamalla näytteistä joitakin SEM-kuvia.

Ulkonaisia merkkejä siitä, että jokin materiaali olisi tuhoutunut koeolosuhteissa, ei havaittu. Moduuleista kairatuista näytteistä todettiin, että materiaalin joustavuus oli säilynyt 1 300 °C:ssa tehtyjen kokeiden jälkeen. Vain taustaeristeiden kestävyyttä voitiin visuaalisten ja manuaalisten havaintojen perusteella epäillä, lähinnä Ceraboard 1100 -levyn ja HT900-levyn kestävyyttä.

Liitteessä C on viiden kuitulaadun SEM-kuvat sekä 200- että 1 000-kertaisina suurenoksina. Näistä kolme on käytettyjä moduuleja toimitustilaisina, tarkoituksena varmistaa, että kuidut ovat ulkonäöltään samantyyppistä kuitumateriaalia. Lisäksi liitteessä on yksi 1 400-laadun huopanäyte, joka on otettu pinnoitteen pinnan alta siinä vaiheessa, kun ajot 1 300 °C:ssa oli tehty. Lisäksi otettiin kuvat koeajoissa olleista Ceraboard-levystä ja HT900-levystä.

Kolmessa toimitustilaisessa kuituhuopanäytteessä ei havaittu merkittävää eroa (liitteen C kuvat 1 - 3). Myöskään kaksi viikkoa 1300 °C:ssa eivät muuttaneet kuitujen ulkonäköä.

Myös Ceraboard 1100 ja HT900-levyt olivat ulkonäöltään samantyyppisiä kuitumateriaaleja kuin korkealämpötilakuidut, mutta molemmissa oli mukana runsaasti ohuita levykkeitä, ilmeisesti etupäässä sideaineesta johtuvia. Koeajossa olleista näytteistä Ceraboard-kuitujen pinnoissa oli mahdollisesti hieman epätasaisuutta; HT900-näytteissä oli selvästi havaittavissa sintrautuneita yksityiskohtia ja kuitujen kasvua.

## 6. Simuloinnit

Simuloinnissa käytettiin yksidimensioista APROS-virtausohjelmaa. Se laskee dynaamisesti palamisen, savukaasujen virtaukset, lämpötilat ja paineet, konvektiivisen ja säteilylämmönsiirron kaasusta rakenteisiin sekä lämmönjohtumisen rakenteiden läpi. Simulointia sovellettiin sekä koeuuniin, jolloin tuloksia voidaan verrata mittauksiin, että erikokoisiin teollisuusuuneihin, jolloin voidaan tutkia erilaisten parametrien vaikutusta uunien energiataseisiin ja lämpötilakäyttäytymiseen.

### 6.1 Koeuunin simulointi

Koeuunin simulointien tarkoitus oli selvittää eristemateriaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia (lämmönjohtavuus eri lämpötiloissa, lämpökapasiteetti, pinnan emissiviteetti) sekä kelpoistaa simulointimallia vertaamalla simulointituloksia mittauksiin.

#### 6.1.1 Aineominaisuudet

Seuraavissa taulukoissa esitetään valmistajien ilmoittamat eristeiden aineominaisuudet. Simuloinnissa tarvittavat aineominaisuudet ovat lämmönjohtavuus, lämpökapasiteetti ja tiheys. Lämmönjohtavuus annetaan syöttötietona ohjelmaan lämpötilan funktiona olevina polynomeina. Lämpökapasiteetti vaikuttaa simulointituloksiin vain muutostilanteessa ja sille on käytetty vakioarvoa. Kuitueristeen pinnan emissiviteetiksi valmistajat ovat ilmoittaneet 0,9, jota vakioarvoa simuloinnissa käytettiin.

**Prismobloc**-eristeen tiheyden perusteella arvioitu lämmönjohtavuus on esitetty taulukossa 11 (Laitinen 1989).

*Taulukko 11. Prismobloc-eristeen lämmönjohtavuus.*

$\lambda$ (W/m <sup>2</sup> C)	T (°C)
0,10	300
0,18	700
0,23	900



Simuloinnissa lämmönjohtavuudelle käytettiin polynomia

$$\lambda = 0,03 + 2,782 \cdot 10^{-4} T - 1,931 \cdot 10^{-8} T^2 + 1,455 \cdot 10^{-10} T^3 \quad (1)$$

Tiheydelle käytettiin arvoa  $\rho = 194,4 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille (arvio)  $C_p = 1\,000 \text{ J/kg}$ .

**Pyrobloc**-eristeen valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona on esitetty taulukossa 12 (Thermal Ceramics 1998).

*Taulukko 12. Pyrobloc-eristeen lämmönjohtavuus.*

$\lambda \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$	$T \text{ (}^\circ\text{C)}$
0,047	50,0
0,076	300
0,167	700
0,237	900
0,360	1 200

Simuloinneissa käytettiin lämmönjohtavuudelle 5. asteen polynomia

$$\lambda = 0,04236 + 9,7753 \cdot 10^{-5} T - 3,05212 \cdot 10^{-8} T^2 + 3,00046 \cdot 10^{-10} T^3 - 1,322666 \cdot 10^{-13} T^4 + 9,290084 \cdot 10^{-19} T^5 \quad (2)$$

Tiheydelle käytettiin arvoa  $\rho = 240 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille  $C_p = 1\,000 \text{ J/kg}$ .

**Ceraboard 1100**-eristeen lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona on esitetty taulukossa 13 (Thermal Ceramics 1998).

*Taulukko 13. Ceraboard 1100 -eristeen lämmönjohtavuus.*

$\lambda \text{ (W/m}^\circ\text{C)}$	$T \text{ (}^\circ\text{C)}$
0,05	100
0,07	400
0,10	600
0,15	800
0,20	1 000

Simuloinneissa käytettiin lämmönjohtavuudelle polynomia

$$\lambda = 0,04973 - 1,3555 \cdot 10^{-5} T + 1,622 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (3)$$

Tiheydelle käytettiin arvoa  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille arvoa  $C_p = 1\,000 \text{ J/kg}$ .

**Cerachem blanket** -eristeiden (1 260 - 1 425) lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona on esitetty taulukossa 14 (Thermal Ceramics 1998).

*Taulukko 14. Cerachem blanket -eristeen lämmönjohtavuus.*

$\lambda$ (W/m°C)	T (°C)
0,06	200
0,08	400
0,13	600
0,18	800
0,26	1 000

Simuloinnissa käytettiin lämmönjohtavuudelle polynomia

$$\lambda = 0,064 - 1,76215 \cdot 10^{-5} \cdot T + 2,10867 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (4)$$

Tiheydelle käytettiin arvoa  $\rho = 160 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille arvoa  $C_p = 1\,000 \text{ J/kg}$ .

Eristeen **HT-900** lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona on esitetty taulukossa 15 (Parroc 1998).

*Taulukko 15. HT-900 -eristeen lämmönjohtavuus.*

$\lambda$ (W/m°C)	T (°C)
0,060	100
0,142	600
0,210	800

Simuloinnissa käytettiin lämmönjohtavuudelle polynomia

$$\lambda = 0,058686 - 1,2 \cdot 10^{-5} T + 2,514 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (5)$$

Tiheydelle käytettiin arvoa  $\rho = 230 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille arvoa  $C_p = 1\,000 \text{ J/kg}$ .

Eristemassan **D39A** lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona on esitetty taulukossa 16.

*Taulukko 16. D39A-eristeen lämmönjohtavuus.*

$\lambda$ (W/m°C)	T (°C)
1,16	400
1,28	800
1,51	1 200

Simuloinnissa käytettiin lämmönjohtavuudelle polynomia

$$\lambda = 1,26 - 5,25 \cdot 10^{-4} T + 6,875 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (6)$$

Tiheydelle käytettiin arvoa  $\rho = 2\,200 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille arvoa  $C_p = 800 \text{ J/kg}$ .

**Siporex**-eristeelle käytettiin lämmönjohtavuudelle vakioarvoa  $\lambda = 0,12 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , tiheydelle arvoa  $\rho = 525 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille arvoa  $C_p = 1\,000 \text{ J/kg}$ .

**F110L**-eristeen lämmönjohtavuus esitetään taulukossa 17 (Paroc 1998).

*Taulukko 17. F110L-eristeen lämmönjohtavuus.*

$\lambda$ (W/m°C)	T (°C)
0,035	30
0,117	400
0,239	700

Simuloinnissa käytettiin lämmönjohtavuudelle polynomia

$$\lambda = 0,03166 + 1,0286 \cdot 10^{-4} T + 2,76 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (7)$$

Eristystiilen **K-26** lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona esitetään taulukossa 18.

*Taulukko 18. Eristystiilen K-26 lämmönjohtavuus.*

$\lambda$ (W/m°C)	T (°C)
0,27	400
0,33	600
0,39	800
0,49	1 100

Simuloinnissa käytettiin lämmönjohtavuudelle polynomia

$$\lambda = 0,1653 + 2,4275 \cdot 10^{-4} T + 4,762 \cdot 10^{-7} T^2 \quad (8)$$

Tiheydelle käytettiin arvoa  $\rho = 737 \text{ kg/m}^3$  ja lämpökapasiteetille arvoa  $C_p = 800 \text{ J/kg}$ .

### 6.1.2 Simuloinnissa käytetyt seinien eristepaksuudet

Simuloinnissa ei kaikkia koeuunissa käytettyjä eristekombinaatioita simuloitu erikseen, vaan yhdessä simuloitussa seinässä käytettiin vain yhtä eristekombinaatiota. Tällä ei arvioitu olevan kovin suurta vaikutusta kokonaislämpöhäviöihin. Simulointien ensisijaisena tarkoituksena oli tutkia, kuinka hyvin teoreettisilla lämmönjohtavuuksilla suoritettujen lämpötilajakautumien simuloinnit vastaavat mitattuja arvoja.

Simuloinnissa käytetyt eristemateriaalit esitetään taulukossa 19.

*Taulukko 19. Simuloitujen seinien eristeet ja eristepaksuudet.*

Simuloitu rakenne	Eriste 1, paksuus	Eriste 2, paksuus	Eriste 3, paksuus
Seinä 1	Prismobloc, 31 cm	Teräs, 0,5 cm	
Seinä 2	Cerachem Blanket, 20,0 cm	Ceraboard-1100, 12,0 cm	Teräs, 0,5 cm
Seinä 3	Pyrobloc, 31 cm	Teräs, 0,5 cm	
Luukkuseinä	Cerachem blanket, 20 cm	HT-900, 10 cm	Teräs, 0,5 cm
Katto	Prismobloc, 32 cm	Teräs, 0,5 cm	
Lattia	Prismobloc, 14,5 cm	K-26, 7,5 cm	Siporex, 10 cm

### 6.1.3 Kuumennusvaiheen simulointi

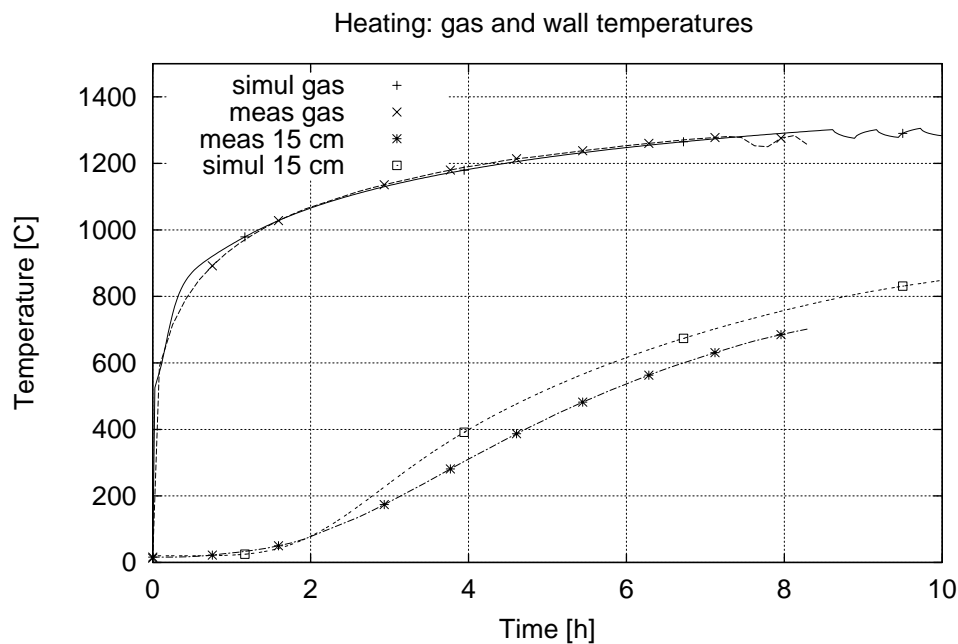
Kuumennusvaiheen simuloinnin alkaessa koeuuni oli alkutilassa (kaasu ja seinät) lämpötilassa 20 °C. Kuumennusvaiheen aikana aluksi käytettiin polttimen tehoa 95 kW. Kun kaasun lämpötila n. 1 300 °C saavutettiin (n. 8 h kuumennuksen alkamisesta), käytettiin simuloinnissa samoin kuin kokeessa kuumennukseen vuorotellen tehoja 64 ja 95 kW. Noin 10 h jälkeen laskennassa käytettiin pelkästään tehoa 64 kW, ja säätämällä ilmamäärää saatiin kaasun lämpötila pysymään lähellä koeuunin mitattua lämpötilaa. Lopullinen lämpötila 36 h:n jälkeen oli 1 287 °C. Tällöin poistuvan kaasun happipitoisuus laskennassa oli n. 8 %, mikä vastaa hyvin savukaasuanalyysin arvoja.

Kuvassa 34 verrataan laskettuja ja mitattuja kaasun ja seinän lämpötiloja toisiinsa. Mitattu lämpötila on Pyrobloc-seinässä, jossa kuitueristeen tiheys on 240 kg/m<sup>3</sup>. Laskettu seinän eriste on keskimääräistä keraamista kuitua, jonka tiheys oli 190 kg/m<sup>3</sup>. Eristeiden laatuero selittää simuloinnin ja mittauksen lämpötilaeron, lähes 100 °C stationäärisessä tilassa, eristekerroksen puolivälin kohdalla. Mittauksen näytteiden taajuus oli 1/10 min, joten kuumennuksen alkamisen aivan tarkkaa ajankohtaa ei tunneta. Kuumennusvaiheen mittapisteiden avulla pystytään kuitenkin ekstrapoloimaan kuumennuksen alkaminen melko tarkkaan, eikä vertailun kannalta merkittävää virhettä tehdä. Kuten kuvasta nähdään, vastaa simuloitu tulos kaasun lämpötilalle erittäin hyvin mitattuja arvoja. Simuloinnissa lämpötilaa alettiin säätää muuttamalla polttimen tehoa 95 kW:sta 64 kW:iin ja takaisin, kun lämpötila oli tasan 1 300 °C. Kokeessa säätö aloitettiin, kun kaasun lämpötila oli muutamaa kymmentä astetta alempi.

Kuumennuksen alkuvaiheessa kaasun simuloitu lämpötila nousee nopeammin kuin mitattu. Tämän oletetaan johtuvan siitä, että simulointimalli aliarvioi konvektiivista lämmönsiirtoa. Lämmönsiirto lasketaan tunnetulla Dittus-Boelter-korrelaatiolla

$$\alpha_{con} = \frac{0,023 \lambda Pr^{0,4} Re^{0,8}}{D_{eq}} \quad (9)$$

Tässä korrelaatiossa tärkeä parametri on Reynoldsin luku Re, joka riippuu virtausnopeudesta lämpöä siirtävän kappaleen lähellä. Laskentamallissa on käytettävissä vain savukaasun keskimääräinen virtausnopeus uunissa, joka ei ota huomioon esimerkiksi kiertovirtauksia uunin sisällä.

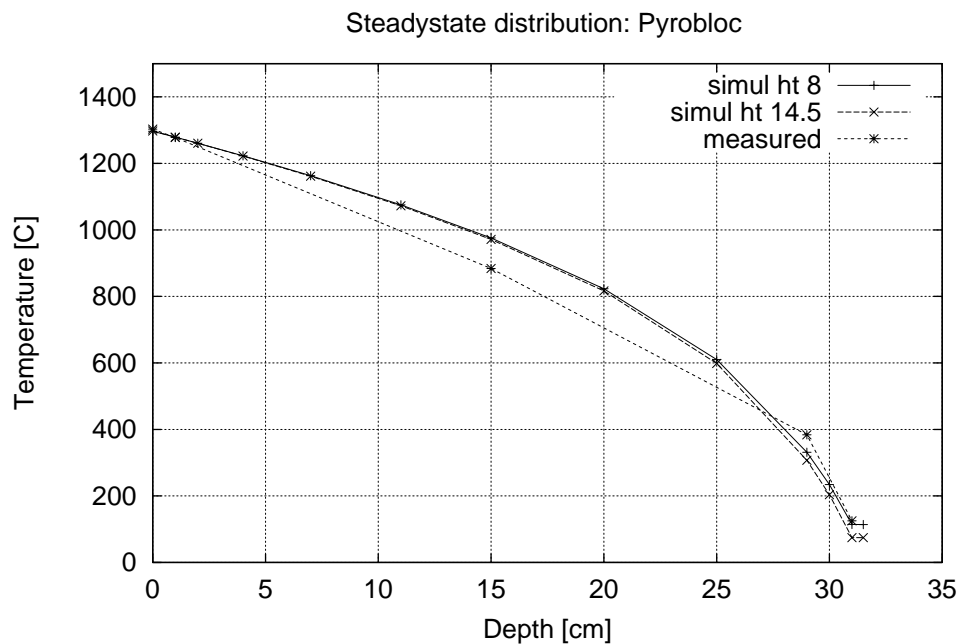


Kuva 34. Kaasun ja eristeen lämpötilä.

#### 6.1.4 Tasapainotilan simulointi

Etsittäessä stationaarista jakautumaa eristetyissä seinissä havaittiin, että simulointia piti jatkaa todella kauan ennen kuin pieni lämpötilojen ryömiminen loppui. Tämä johtui eristeen suhteellisen pienestä lämmönjohtavuudesta ja suuresta eristepaksuudesta. Lisäksi lämmönjohtavuus on vahvasti riippuvainen lämpötilasta, mikä osaltaan hidastuttaa stationääritilan saavuttamista. Stationääritilanne katsottiin saavutetuksi, kun kuumasta kaasusta seiniin menevä lämpövirta oli asettunut samaksi kuin ulkoseinästä ympäristöön menevä lämpövirta. Kokonaislämpöhäviöt simuloinnissa olivat n. 11,5 kW.

Kuvassa 35 on esitetty oikealla olevan seinän lämpötilajakautuma, kun eristeenä on 31 cm Pyrobloc-kuitua. Eristeen lisäksi simulointimallissa on otettu huomioon ulkopinnalla oleva 0,5 cm teräslevy. Simuloinnissa lämpötilat laskettiin kaikkiaan 13 pisteessä, eli koko seinä oli jaettu 12 kerrokseen. Kuumassa osassa ja ulkoseinän lähellä oli käytetty tiheämpää laskentahilaa kuin keskiosassa. Mittaustuloksia oli saatavilla kolmesta kohdasta - kuumasta pinnasta lähtien 1 cm, 15 cm ja 29 cm (2 cm teräslevyn sisäpinnasta) syvyydeltä. Kuvasta havaitaan, että pisteessä 15 cm laskettu lämpötila on 80 °C korkeampi kuin mitattu ja kohdassa 29 cm laskettu lämpötila on n. 60 astetta matalampi kuin mitattu. Tämä viittaisi siihen, että korkeammissa lämpötiloissa (1 300 - 900 °C) laskennassa käytetyt lämmönjohtavuudet ovat liian suuria, matalammissa lämpötiloissa (400 - 800 °C) laskennassa käytetty lämmönjohtavuus olisi liian pieni ja kylmässä osassa (100 - 400 °C) lämmönjohtavuus olisi liian suuri. Kuitenkin, koska mittauksia on

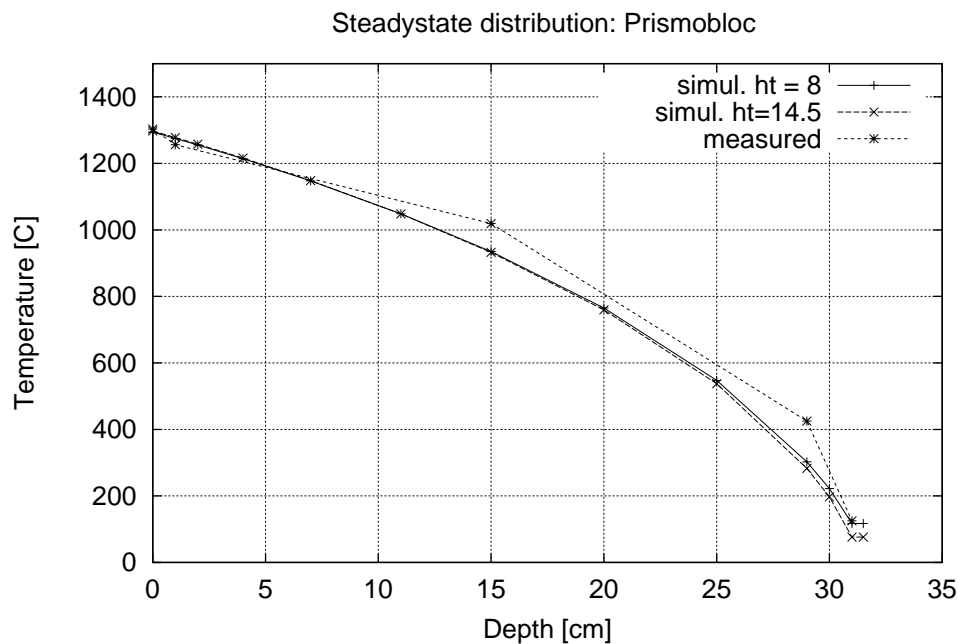


Kuva 35. Mitatut ja lasketut lämpötilajakautumat Pyrobloc-seinässä.

suhteellisen vähän, kolme, ja jakautumaa pinnan suunnassa ei tarkoin tunneta, ei kovin varmoja johtopäätöksiä voida tehdä.

Simuloinnissa tehtiin parametritarkastelu ulkopuolen lämmönsiirtymiskertoimen suhteen, eli stationäärinen tila laskettiin lämmönsiirtokertoimen arvoilla 8 ja 14,5 W/(m<sup>2</sup> K). Havaittiin, että ulkopuolen pintalämpötila muuttui arvosta 114 °C arvoon 74 °C, kun lämmönsiirtokertoimet vastaavasti olivat 8 ja 14,5 W/(m<sup>2</sup> K). Mitatut ulkopinnan lämpötilat oikean seinän pinnalla vaihtelivat 90 - 130 °C, mikä viittaisi pienempään lämmönsiirtokertoimeen. Lämpövirrat seinämän läpi eri tapauksissa olivat 712 W/m<sup>2</sup> ja 718 W/m<sup>2</sup>. Ulkopinnan lämpötilaan ulkopuolen lämmönsiirtokertoimella on melko suuri vaikutus mutta kokonaislämmönsiirtoon varsin pieni vaikutus. Ulkopinnan tasapainolämpötilaan voidaan todennäköisesti jonkin verran vaikuttaa muuttamalla pinnan emissiviteettiä.

Kuvassa 36 on Prismoblocilla eristetyn seinän lasketut ja mitatut lämpötilajakautumat. Seinän eristepaksuudet sekä laskenta- ja mittauspisteet ovat aivan samat kuin edellisessä Pyrobloc-eristeen tapauksessa. Kuvasta havaitaan, että kohdassa 15 cm mitattu lämpötila on n. 70 °C korkeampi ja kohdassa 29 cm mitattu lämpötila oli n. 120 °C korkeampi kuin laskettu. Prismoblocin simulointi osoittaa, että todellinen lämmönjohtavuus poikkeaa jonkin verran laskennassa käytetyistä ja näyttäisi siltä, että matalissa lämpötiloissa todellinen lämmönjohtavuus on selvästi pienempi kuin laskennassa käytetty.



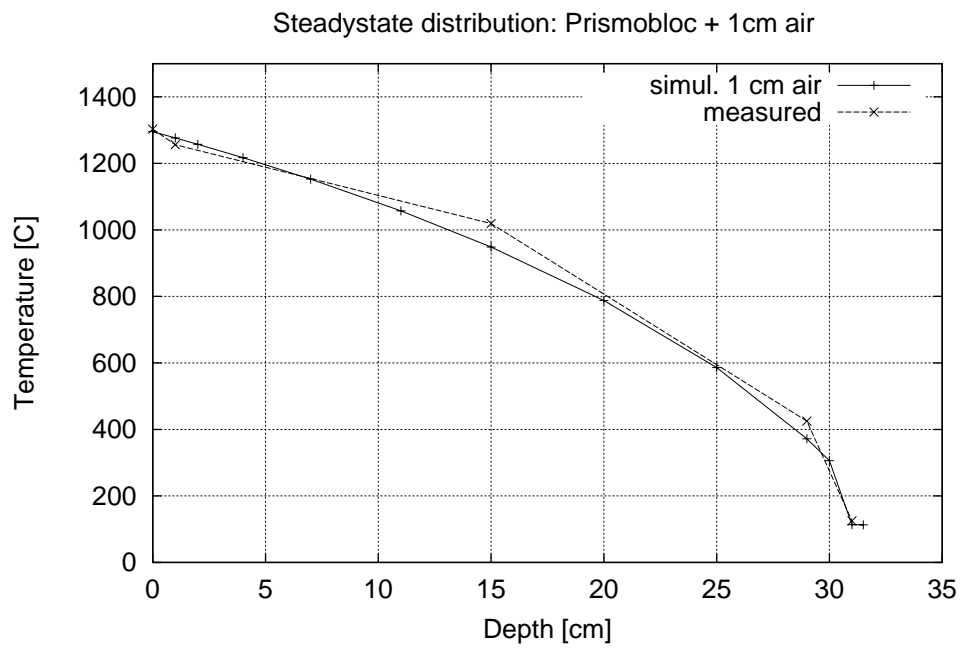
Kuva 36. Mitatut ja lasketut lämpötilajakautumat Prismobloc-seinässä.

Asian selvittämiseksi tehtiin parametritarkasteluna simulointiajo, jossa syvyydellä 30 - 31 cm käytettiin erittäin pientä lämmönjohtavuutta. Havaittiin, että lasketut lämpötilat lähenivät selvästi mitattuja arvoja - kohdassa 15 cm mitatun ja lasketun lämpötilan ero pieneni 55 °C:seen ja kohdassa 29 cm ero pieneni vain 40 °C:seen. Prismoblockin tapauksessa näyttäisi siltä, että matalissa lämpötiloissa todellinen lämmönjohtavuus lähenee ilman arvoja.

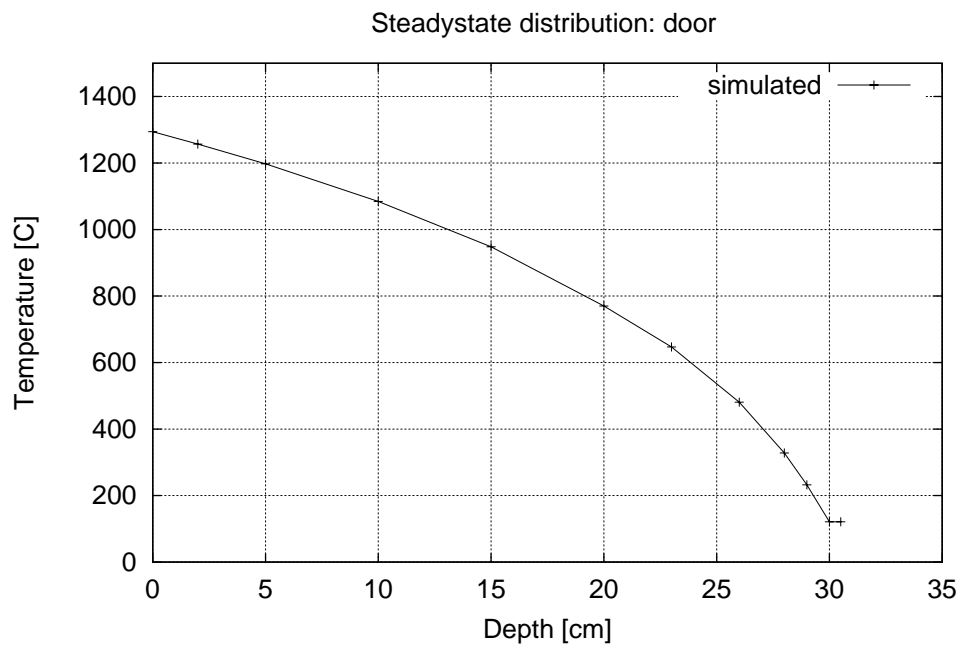
Simuloinnissa saatu stationääritilanteen lämpöhäviö Prismoblocissa oli n 850 W/m<sup>2</sup>. Simuloinnissa oli oletettu ulkoseinän lämmönsiirtokertoimeksi 8 W/(m<sup>2</sup> K). Tällöin ulkoseinän lämpötila oli 125 °C, mikä vastasi melko hyvin mitattua. Laskettu jakautuma on verrattu mittausarvoihin kuvassa 37. Mittaustuloksissa havaitaan, että lähellä ulkoseinää tapahtuu suuri lämpötilamuutos, mikä viittaa siihen, että eristeen lämmönjohtavuus pienenee voimakkaasti lämpötila-alueella 400 - 200 °C.

Kuvassa 38 on simuloitu luukkuseinän lämpötilajakautuma, kun eristeenä on 20 cm Ceraboard-kuitua ja 10 cm HT-900 -eristelevyä. Eristeen lisäksi simulointimallissa on otettu huomioon ulkopinnalla oleva 0,5 cm teräslevy. Simuloinnissa lämpötilat laskettiin kaikkiaan 11 pisteessä eli koko seinä oli jaettu 10 kerrokseen. Kuumassa osassa ja ulkoseinän lähellä oli käytetty tiheämpää laskentahilaa kuin keskiosassa. Mittaustuloksia oli saatavilla vain yhdestä kohdasta - 20 cm syvyydeltä kuumasta pinnasta lähtien. Tämä mitattu lämpötila oli aluksi noin 800 °C ja nousi myöhemmissä ajoissa yli 900 °C:n ja meni lopulta epäkuuntoon. Näin ollen simuloinnin tarkkuudesta ja eristeiden lämmönjohtavuudesta ei voida paljon sanoa.



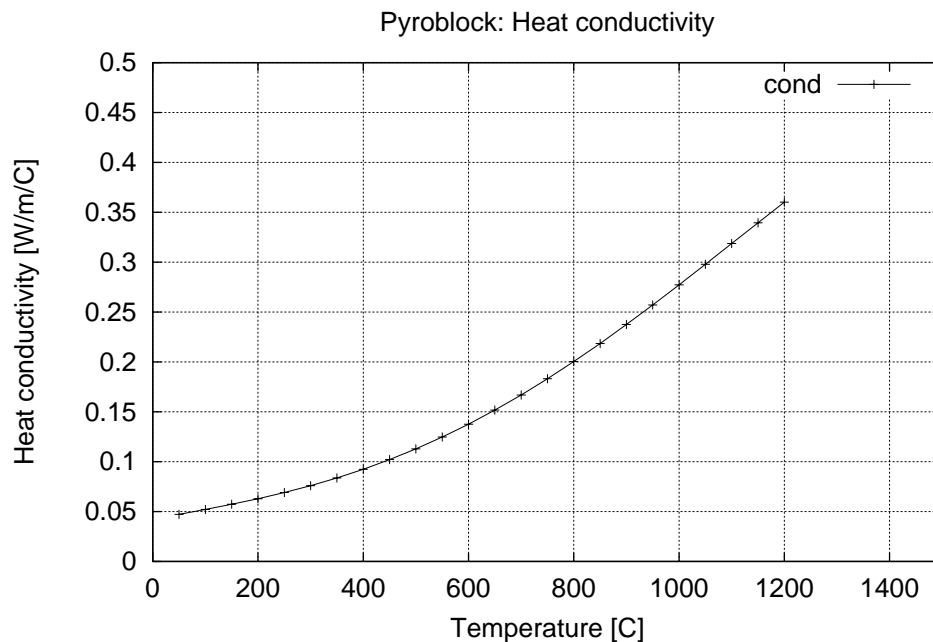


Kuva 37. Lämpötilajakautuma Prismobloc-seinässä (1 cm ilman lämmönjohtavuus).



Kuva 38. Lämpötilajakautuma luukkuseinässä

Kuvassa 39 esitetään valmistajan määrittämä Pyroblocin lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuus. Kuvasta nähdään, että lämmönjohtavuus on vahvasti riippuvainen lämpötilasta kasvaen viisinkertaiseksi lämpötilan muuttuessa 300 °C:sta 1 200 °C:seen. Myös simulointien perusteella havaitaan tämä voimakas lämpötilariippuvuus. Joidenkin eristeiden, esimerkiksi Prismobloc-kuidun lämmönjohtavuuden muutos eri lämpötiloissa voi olla vielä suurempi.



Kuva 39. Pyrobloc-eristeen lämmönjohtavuus.

### 6.1.5 Eristetyn seinämän kokonaiskonduktanssin arviointi

Jotta pystytään paremmin arvioimaan eristeiden merkitystä lämpöhäviöiden kannalta, on syytä tarkastella seinän kokonaislämmönsiirtymistä ja kokonaiskonduktanssia. Stationäärinen lämpövirta seinän läpi voidaan esittää kaavalla

$$\Phi = K A (T_g - T_u) \quad (10)$$

jossa K on seinän kokonaiskonduktanssi, A on pinta-ala,  $T_g$  ja  $T_u$  ovat kaasun ja ulkopuolella olevan ympäristön lämpötilat.

Eristetyn seinän kokonaiskonduktanssi voidaan esittää kaavalla

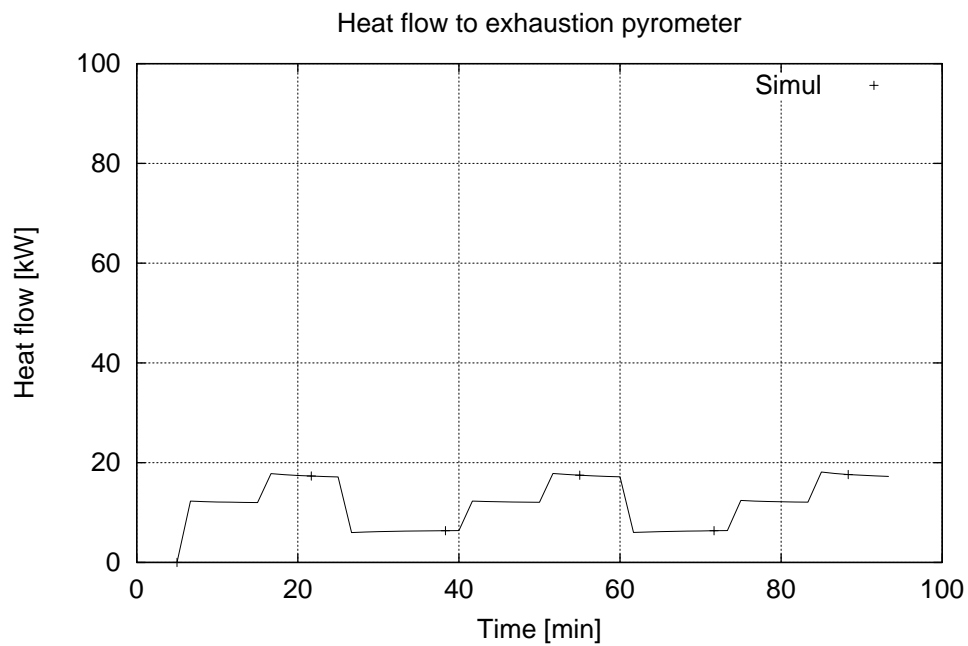
$$K = 1 / \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (11)$$

jossa  $\alpha_1$  on sisäpinnan lämmönsiirtymiskerroin (konvektio + säteily),  $d$  on seinän paksuus,  $\lambda$  on eristeen lämmönjohtavuus ja  $\alpha_2$  on ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin (konvektio + säteily).

Seuraavassa pyritään arvioimaan eri termien suuruusluokat. Sisäpinnan lämmönsiirtymiskertoimen tekee suureksi korkeasta lämpötilasta johtuva säteily, johon verrattuna konvektion osuus on mitätön. Esimerkiksi pelkälle mustalle säteilylle, kun kaasun lämpötila on 1 300 °C ja seinän pintalämpötila 1 280 °C, saadaan sisäpinnan säteilylämmönsiirtymiskertoimeksi 866 W/(m<sup>2</sup> °C). Tekniikan käsikirjan 1 mukaan lämmitysöljyn savukaasun emissiviteetti 1 300 °C:ssa koeuunin dimensioilla on n. 0,16 (Ryti 1973). Jos oletetaan kaasun absorptiosuhteeksi sama kuin emissiviteetti 0,16 ja sisäseinän emissiviteetiksi sekä absorptiosuhteeksi 0,9, saadaan säteilylämmönsiirtokertoimeksi 138 W/(m<sup>2</sup> °C). Tällöin termin  $1/\alpha_1$  arvoksi saadaan 0,007 (m<sup>2</sup> K)/W. Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin (konvektio + säteily) on selvästi sisäpinnan kerrointa pienempi, 5 - 20 W/(m<sup>2</sup> °C). Konvektiiviseksi lämmönsiirtokertoimeksi pystysuoralle seinälle saadaan 6,5 W/(m<sup>2</sup> K) (laskettu Churchillin ja Chun korrelaatiolla: pinnan lämpötila 120 °C ja ympäristön lämpötila 20 °C, korkeus 1,8 m). Mustan säteilyn kerroin on 14 W/(m<sup>2</sup> K) ja emissiviteetin ollessa 0,2 on kerroin n. 3 W/(m<sup>2</sup> K). Termin  $1/\alpha_2$  :n arvoksi saadaan n. 0,05 - 0,15 m<sup>2</sup>K/W. Termin  $d/\lambda$  arvoksi, kun  $d = 0,31$  m ja  $\lambda = 0,15$  W/(m K) (keskiarvo välillä 200 - 1 300 °C), saadaan n. 2 (m<sup>2</sup> K)/W. Edellä esitetystä laskelmasta nähdään, että seinän kokonaiskonduktanssiin selvästi suurin vaikutus tulee keskimmäisestä termistä eli, jos seinän läpi menevää lämpövirtaa halutaan pienentää, pitää eristeen paksuutta lisätä tai eristeen lämmönjohtavuutta pienentää. Sen sijaan ulkopinnan lämpötilaan ulkopuolisella lämmönsiirtokertoimella on suuri vaikutus.

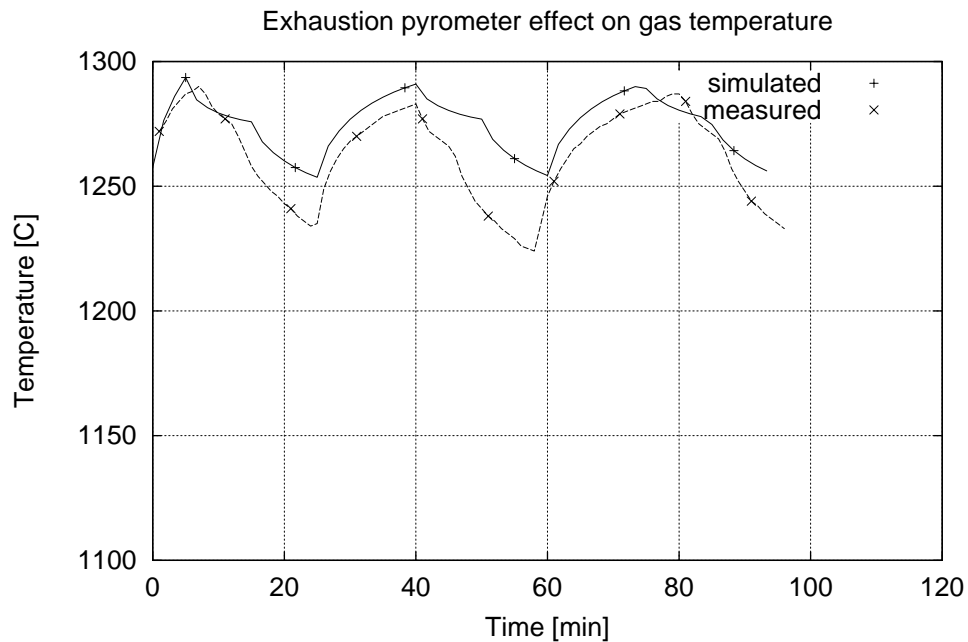
### 6.1.6 Imupyrometrin vaikutus uunin lämpötilaan

Imupyrometri on n. 2 cm halkaisijaltaan oleva jäähdytetty putki, joka työnnetään mitausta varten uunin sisään. Mittaukset suoritettiin siten, että imupyrometri oli työnnetty uunin sisään 30 cm, 60 cm ja 90 cm. Kun mittauksia tehtiin, huomattiin, että uunissa oleva lämpötila-anturin mittaussarvo laski selvästi, kun pyrometri työnnettiin uuniin. Mittausten aikana poltin toimi säätäjän vaikutuksesta asennossa 2 eli suuremmalla teholla 95 kW. Koska kaasun lämpötila on korkea, n. 1 300 °C, on säteily jäähdytettyyn imupyrometriputkeen ( $T < 100$  °C) varsin voimakas. Tilannetta simuloitiin asettamalla sauva, jonka lämpötila oli 70 °C, eri syvyyksille (30 cm, 60 cm, 90 cm) sisälle uuniin. Sauvaa pidettiin vakiolämpötilassa 70 °C ja vain lämmönsiirto kaasusta sauvaan simuloitiin. Järjestely vastasi tilannetta, jossa sauvan jäähdytys pystyi kuljettamaan kaiken sauvan imevän lämmön uunista. Riippuen sauvan uunin sisällä olevasta pituudesta (30 cm, 60 cm, 90 cm) sauva poistama lämpövirta vastaavasti oli noin 6 kW, 12 kW ja 18 kW (kuva 40).



Kuva 40. Lämpövirta imupyrometriin.

Sauvan ollessa 30 cm syvyydessä polttimen teho pystyi nostamaan kaasun lämpötilaa kohti 1 300 °C:ta sekä simuloinnissa että kokeessa. Kun sauva työnnettiin 60 cm syvyyteen, kaasun lämpötila laski sekä simuloinnissa että todellisuudessa. Edelleen, kun sauva työnnettiin syvyydelle 90 cm, nopeutui kaasun lämpötilan lasku (kuva 41).



Kuva 41. Imupyrometrin vaikutus kaasun lämpötilaan.

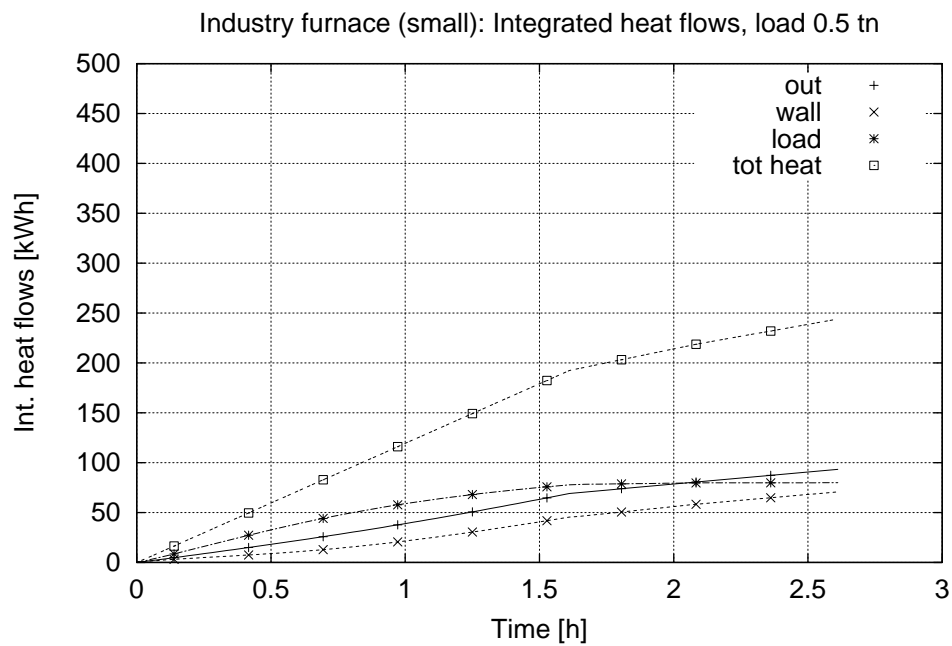
Vaikka imupyrometrin poistama lämpövirta ei ole kovin suuri polttimen kokonaistehoon 95 kW verrattuna, se riittää laskemaan kaasun lämpötilaa melko nopeasti. Tämä johtuu siitä, että suurin osa polttimen tehosta, n. 83 kW:sta, menee savukaasun mukana ulos ja vain 10 - 12 kW menee seinän kautta. Jos kaasuvirtauksesta 0,04 kg/s ( $c_p=1,2$  kJ/(kg°C)) poistetaan energiaa 18 kW, sen vaikutus lämpötilaan on 375 °C. Todellisuudessa, jos pyrometri ei ole uunin sisällä, polttimen teho 95 kW pystyy selvästi nostamaan uunin lämpötilaa, joten pyrometrin vaikutus ei ole läheskään niin voimakas. Myös kuumat seinät tasaavat kaasun lämpötilan pudotusta.

## 6.2 Teollisuusuunien simuloinnit

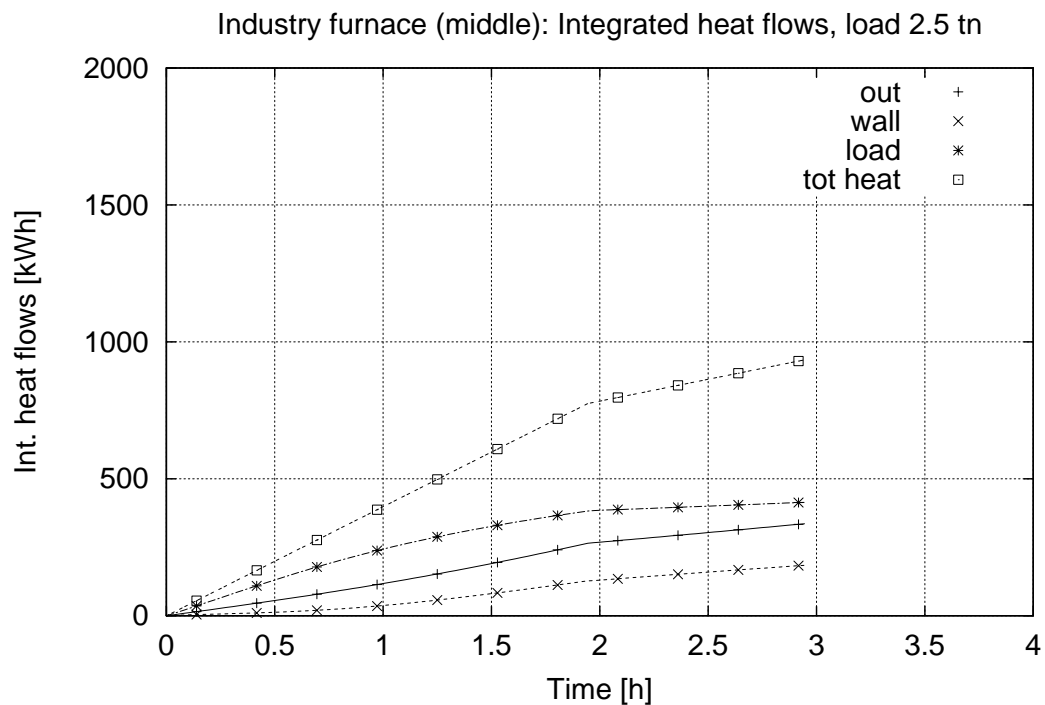
Todellisen teollisuusuunin simuloinneilla oli tarkoitus tutkia eri tekijöiden vaikutusta energian kulutukseen. Simuloiduissa uuneissa käytettiin koeuunin simuloinnissa käytettyjä aineominaisuuksia kuitueristeelle. Eristepaksuutena kaikissa tapauksissa oli 30 cm. Simuloinneilla kartoitettiin sitä, miten erikokoisilla uuneilla syötetty kokonaisenergia (poltossa syntyvä lämpö) jakautui kuorman kuumennuksen, seiniin menevän lämpövirran ja savukaasujen mukana menevän lämpövirran kesken. Tutkittavina parametreinä olivat uunin koon lisäksi kuumennettavan kuorman koko ja kuumennusenergia. Kuorman emissiviteettinä käytettiin 0,9:ää, mikä vastaa hapettuneen teräksen arvoa.

### 6.2.1 Uunin koon vaikutus

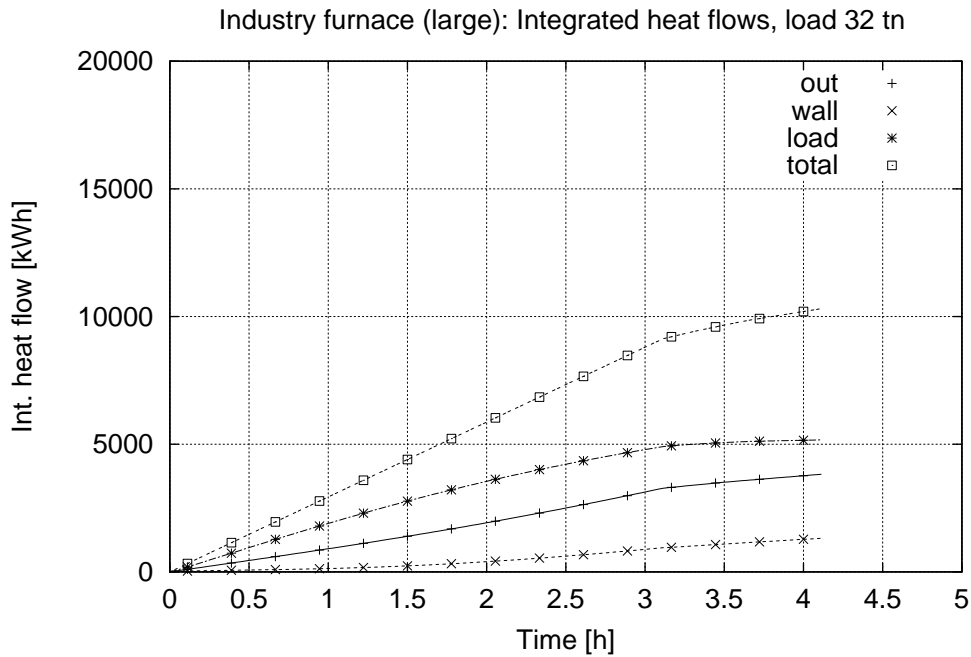
Simuloitujen uunin koot olivat 5,2 m<sup>3</sup>, 44 m<sup>3</sup> ja 572 m<sup>3</sup> eli uunien ulkomitat olivat metreinä 2,4 x 2,2 x 2,4 ; 4,0 x 6,0 x 3,0 ja 12 x 12 x 5. Uunien koot oli valittu sellaisiksi, että ne edustivat tyypillistä pienuunia, keskikokoista ja isoa uunია. Simulointiesimerkkinä käytettiin tapausta, jossa kappale kuumennettiin 1 000 °C:seen ja pidettiin sen jälkeen tunnin ajan 1 000 °C:ssa. Uunin alkutilaksi oletettiin tila, jossa edellisen kuumennuksen jäljiltä uunin sisäpinta oli jäähtynyt noin 600 °C:seen. Uunien koon vaikutuksen vertailemiseksi valittiin kuumennettavat kuormat samassa suhteessa kuin uunien tilavuus eli 0,5 tn, 2,5 tn ja 32 tn. Kuumennusteho valittiin siten, että kuumennusaika tuli kussakin tapauksessa suurin piirtein yhtä pitkäksi eli tehona oli 120 kW, 400 kW ja 3 000 kW. Simuloidut kumulatiiviset kokonaislämpötehot, kuormaan menevät tehot, seinään menevät tehot ja savukaasun mukana ulos menevät tehot on esitetty kuvissa 42 - 44. Kuvista nähdään että, kun uunin koko kasvaa, lisääntyy myös kuorman kuumennukseen menevän energian suhteellinen osuus. Tämä selittyy pääasiassa sillä, että seinien pinta-alan suhde uunin tilavuutta kohti pienenee uunin koon kasvaessa. Tällöin seiniin menevä suhteellinen lämpöhäviö pienenee.



Kuva 42. Kumulatiiviset lämpötehot pienuunissa (kokonaisteho, kuormaan menevä, seinään menevä, savukaasun ulos kuljettama), kuorma 0,5 tn.



Kuva 43. Kumulatiiviset lämpötehot keskikokoisessa uunissa (kokonaisteho, kuormaan menevä, seinään menevä, savukaasun ulos kuljettama), kuorma 2,5 tn.



Kuva 44. Kumulatiiviset lämpötehot suuressa uunissa (kokonaisteho, kuorman menevä, seinään menevä, savukaasun ulos kuljettama), kuorma 32 tn.

Uunikoon simulointituloksista esitetään yhteenveto taulukossa 20. Kuumennettavan kuorman koko muuttuu samassa suhteessa kuin uunien tilavuudet. Kuumennusaika on eri tapauksissa suunnilleen yhtä pitkä, jolloin kuumennusteho kasvaa kuorman mukaan. Taulukossa esitetään, kuinka uunin koko vaikuttaa kuorman kuumennushyötysuhteeseen, seinämien kautta tapahtuviin lämpöhäviöihin ja pakokaasuhäviöihin. Kuorman kuumennushyötysuhteella tarkoitetaan kappaleeseen sitoutuvan lämpöenergian suhdetta uuniin tuotuun kokonaisenergiaan lämpökäsittelyjakson aikana eli kappaleen kuumenuksen ja sitä seuraavan noin tunnin pitoaikana. Hyötysuhde kasvaa ja eristyshäviöt pienenevät ja pakokaasuhäviöt pysyvät lähes vakiona kokoluokan kasvaessa.

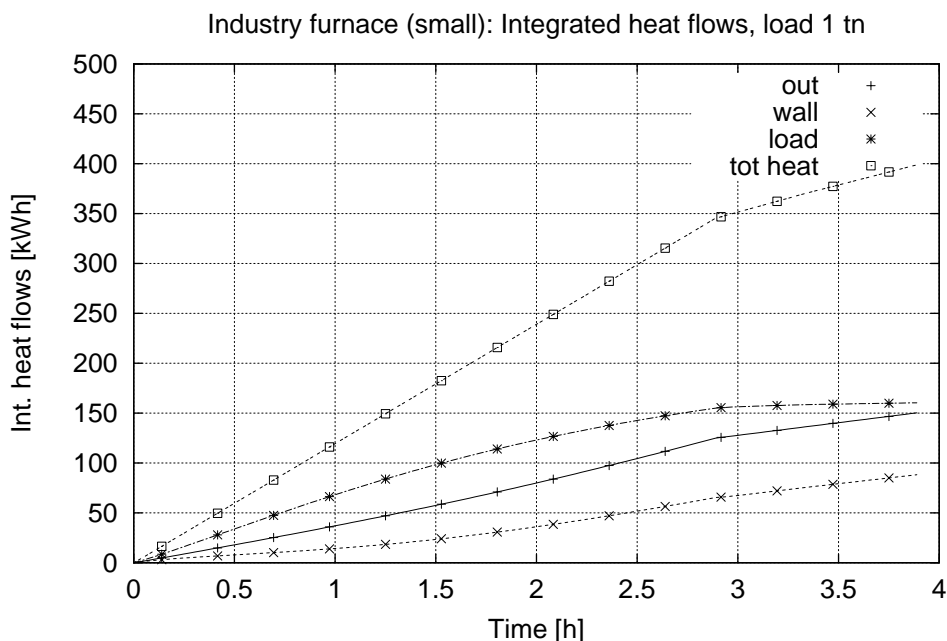
Taulukko 20. Uunin kokoluokan vaikutus energiataseisiin.

Uunin koko (m <sup>3</sup> )	Kuorman koko (tn)	Kuumennushyötysuhde, %	Eristehäviö %	Savukaasuhäviö %
5,2	0,5	33	29	38
44,0	2,5	44	21	35
572,0	32,0	50	12	38

## 6.2.2 Kuorman koon vaikutus

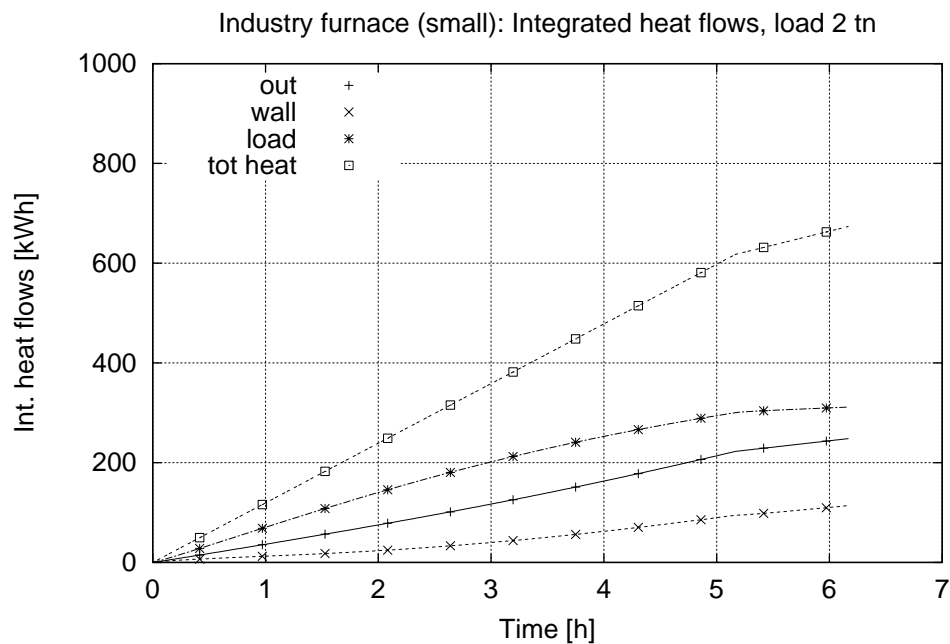
Käyttäen pienuunia simuloitiin sama tapaus kuin edellisessä kohdassa oli esitetty. Edellä lasketun 0,5 tn kuorman lisäksi nyt käytettiin kuormina 1,0 tn ja 2,0 tn:a. Kuumennustehona käytettiin samaa kuin edellisessä tapauksessa eli 120 kW:a. Kuvissa 45 - 46 on esitetty tapaukset 1,0 tn ja 2,0 tn, joita voidaan verrata kuvaan 42 (0,5 tn). Kuvista voidaan todeta, että kuumennusaika luonnollisesti kasvaa, kun kuorman kokoa kasvatetaan. Kuvista havaitaan myös, että kappaleen kuumentamiseen menevän suhteellisen tehon osuus kasvaa, kun kuorman kokoa kasvatetaan. Tämä johtuu siitä, että suurempi kappale kuumenee hitaammin ja siihen menevä lämpövirta on suurempi, jolloin häviöiden osuus vastaavasti pienenee. Jos kuumennusajan tekniset vaatimukset eivät ole esteenä, kannattaa uuniin ladata mahdollisimman paljon kuormaa.

Yhteenvetona kuorman koon vaikutuksesta uunin energiataseisiin esitetään taulukossa 21 hyötysuhde- ja häviöprosentit panostyyppisessä lämpökäsittelyssä. Tarkastelu suoritettiin pienuunin tapauksessa. Kuten havaitaan, kannattaa energian käytön kannalta kuumentaa mahdollisimman suurta kuormaa kerralla.



Kuva 45. Kumulatiiviset lämpötehot pienuunissa (kuorma 1 tn).





Kuva 46. Kumulatiiviset lämpötehot pienuunissa (kuorma 2 tn).

Taulukko 21. Kuorman koon vaikutus energiataseeseen panosajossa.

Kuorman koko (tn)	Kuumennusteho (kW)	Kuumennus-hyötysuhde, %	Eristehäviö %	Pakokaasuhäviö %
0,5	120	33	29	38
1,0	120	40	22	38
2,0	120	46	17	37

### 6.2.3 Kuumennustehon vaikutus

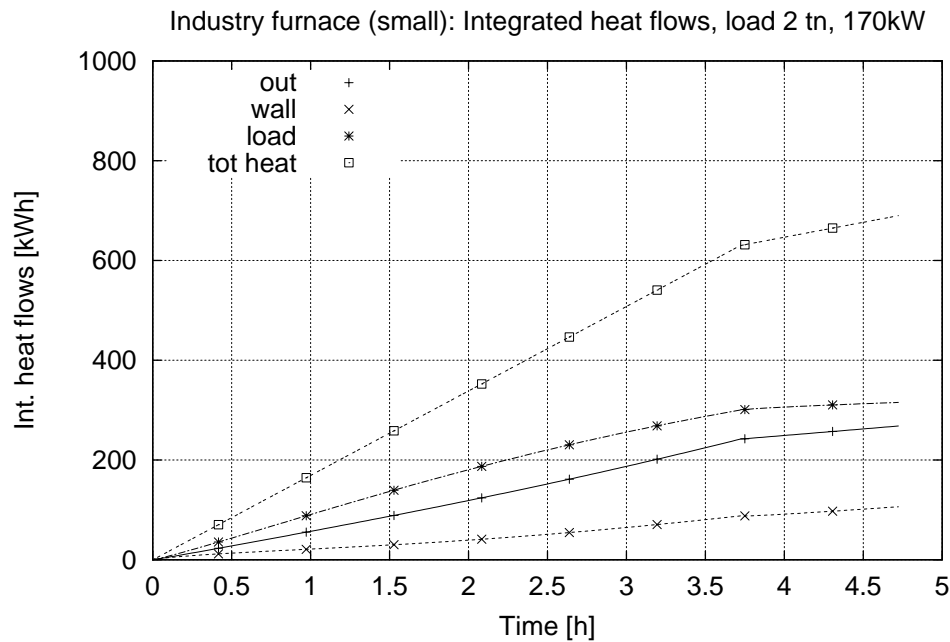
Käyttäen pienuunia simuloitiin edelleen samaa tapausta käyttäen kuormana 2,0 tn:a ja kuumennustehon 120 kW lisäksi tehoja 170 kW ja 220 kW. Simuloinneissa saavutetut kumulatiiviset tehot tapauksissa 170 kW ja 220 kW on esitetty kuvissa 47 ja 48. Tehon 120 kW simulointitulokset on esitetty kuvassa 46. Simulointien perusteella havaitaan, että energian kulutuksen kannalta ei eri kuumennustehojen käytöllä ollut mitään merkitystä. Ainoastaan kuumennusajat vaihtelivat, mutta integroidut lämpötehot päätyivät samaan arvoon.

Integroidut lämpötehot esitetään hyötysuhde- ja lämpöhäviöprosenttisarvoina taulukossa 22. Hyötysuhde on kaikissa tapauksissa 46 % ja eristehäviöiden osuus pienenee ja vastaavasti savukaasuhäviöt kasvavat kuumennustehon kasvaessa. Kuten nähdään, ei si-

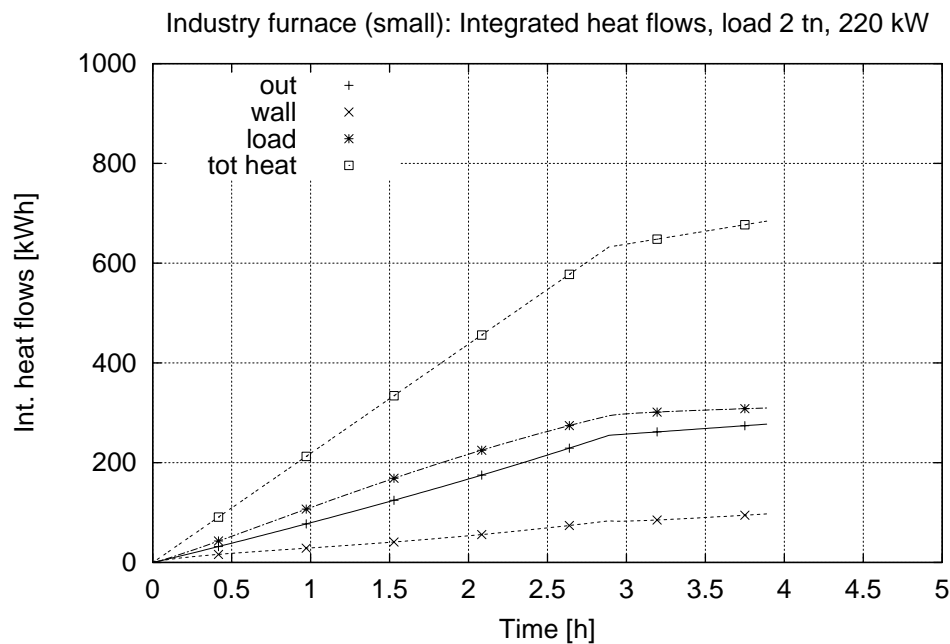
muloinneilla saatu eroja kuumennushyötysuhteeseen käytettäessä eri suuruisia kuumennustehoja. Todellisuudessa konvektiivinen lämmönsiirto jonkin verran paranee, kun käytetään suurempaa kuumennustehoa. Simuloinnissa konvektiivinen lämmönsiirto lasketaan käyttäen keskimääräisiä virtausnopeuksia, minkä vuoksi konvektio ei juurikaan tehostu, kun polttotehoa kasvatetaan.

Taulukko 22. Kuumennustehon vaikutus energiahyötysuhteisiin.

Kuumennusteho (kW)	Kuorma (tn)	Kuumennushyötysuhde, %	Eristehäviö %	Savukaasuhäviö %
120	2,0	46	17	37
170	2,0	46	15	39
220	2,0	46	13	41



Kuva 47. Kumulatiiviset lämpötehot pienuunissa (kuorma 2,0 tn, kuumennusteho 170 kW).

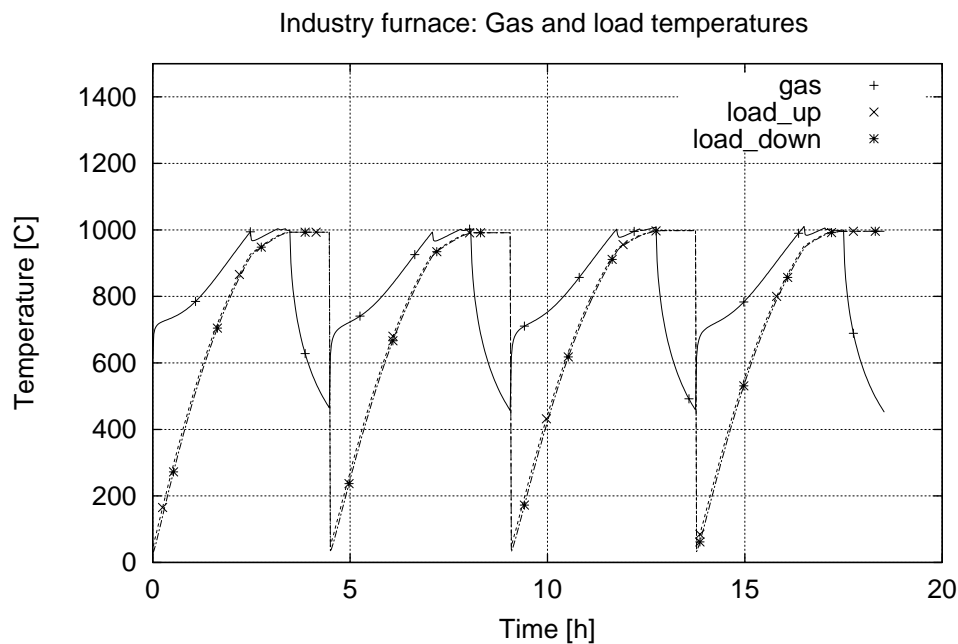


Kuva 48. Kumulatiiviset lämpötehot pienuunissa (kuorma 2 tn, kuumennusteho 220 kW).

#### 6.2.4 Panosuunin vuorokausisimulointi

Panosuunin vuorokausirytmien simuloinnissa käytettiin samaa suurta uunia kuin edellisissä kohdissa. Kuumennettava kuorma simuloinnissa oli levymainen teräskappale - pinta-ala  $78,5 \text{ m}^2$  ja paksuus  $4,0 \text{ cm}$ , jonka alkulämpötila oli  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lämmön oletettiin tulevan vain kappaleen yläpintaan, josta se siirtyi johtamalla läpi kappaleen. Kappaleessa lämpötila laskettiin neljässä pisteessä eli lämmönjohtumisen laskennassa kappale oli jaettu kolmeen yhtä paksuun kerrokseen. Simuloinnissa oletettiin vuorokauden jaksolle useita kuumennuksia. Kun kaasun lämpötila saavutti  $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ , pyrittiin kaasun lämpötilaa pitämään tunnin ajan vakiona pienentämällä polttotehoa maksimiarvosta  $2\,600 \text{ kW}$ . Sen jälkeen luukku avattiin, kappale otettiin pois ja uunin annettiin jäähtyä ja uuden samanlaisen kappaleen kuumennus aloitettiin. Kaikkiaan simuloitiin neljä peräkkäistä kuumennusta.

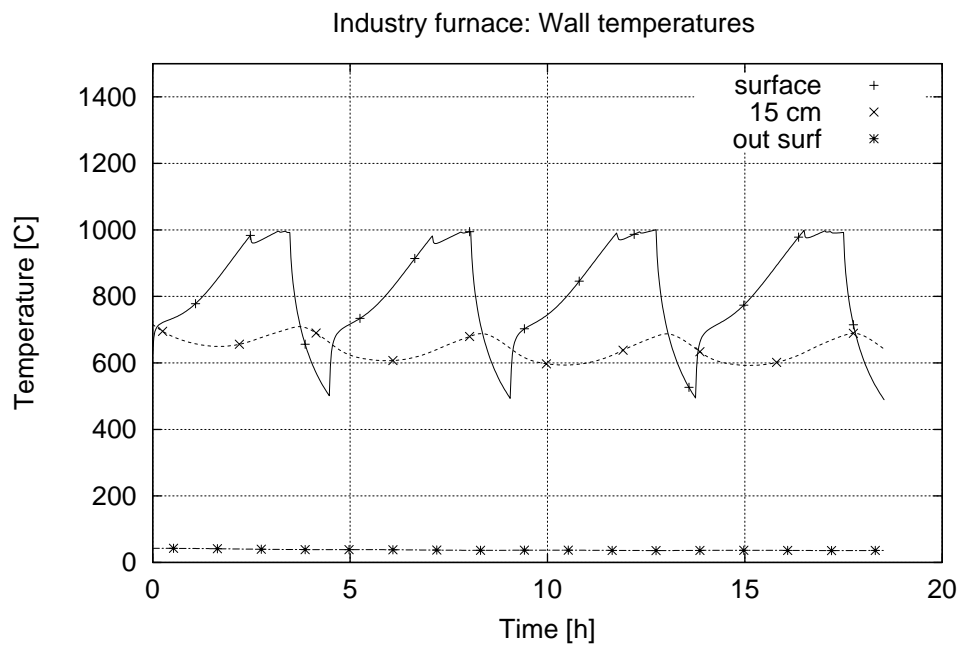
Kuvassa 49 on esitetty simuloidut kaasun sekä kuormalevyn ylä- ja alapintojen lämpötilat. Havaitaan, että kestää noin  $2,5 \text{ h}$ , ennen kuin kappale on lämmennyt lähelle  $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ :ta. Koska kappaleen kuumeneminen on melko hidasta ja kappale on suhteellisen ohut ( $4 \text{ cm}$ ), ei ylä- ja alapintojen lämpötilojen välillä ollut suurta eroa. Kun uunin kaasun lämpötila alkaa laskea, on oletettu, että kappale on poistettu uunista. Tällöin vaikka kappaleen lämpötila on eri kuin kaasun lämpötila, ei kappale luovuta kaasuun lämpöä. Kaasun jäähtyminen johtuu kaasun virtauksesta ulos ja korvaavan ilman virtauksesta sisään.



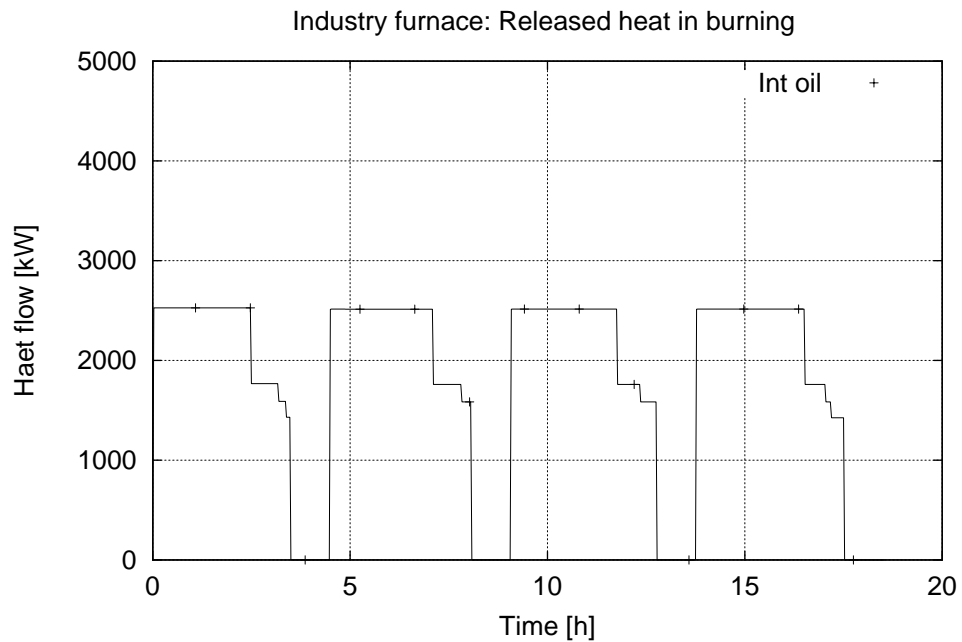
Kuva 49. Kaasun ja kuorman pintalämpötilat panosuunin vuorokausisimuloinnissa.

Kuvassa 50 on esitetty lämpötilat eri syvyydellä seinässä. Havaitaan, että kuuman pinnan lämpötila seuraa melko lähellä kaasun lämpötilaa. Eristeen keskellä (15 cm) oleva lämpötila vaihtelee jonkin verran. Heilahtelun suuruus on noin 80 °C ja johtuen hitaasta lämmönjohtumisesta eristeessä heilahtelu on eri vaiheessa kuin pintalämpötila. Ulkopinnassa ei suuria lämpötilan vaihteluita esiinny, vaan lämpötila pysyy lähellä vakiota 36 - 40 °C.

Kuvassa 51 on esitetty palamisessa vapautuvan lämpötehon vaihtelu. Kuumennuksen aikana on pidetty vakiootehoa 2 600 kW. Kun kaasu oli saavuttanut 1 000 °C lämpötilan, tehoa pienennettiin vaiheittain. Kun kuumennettava kappale otettiin ulos, poltin sammutettiin kokonaan.

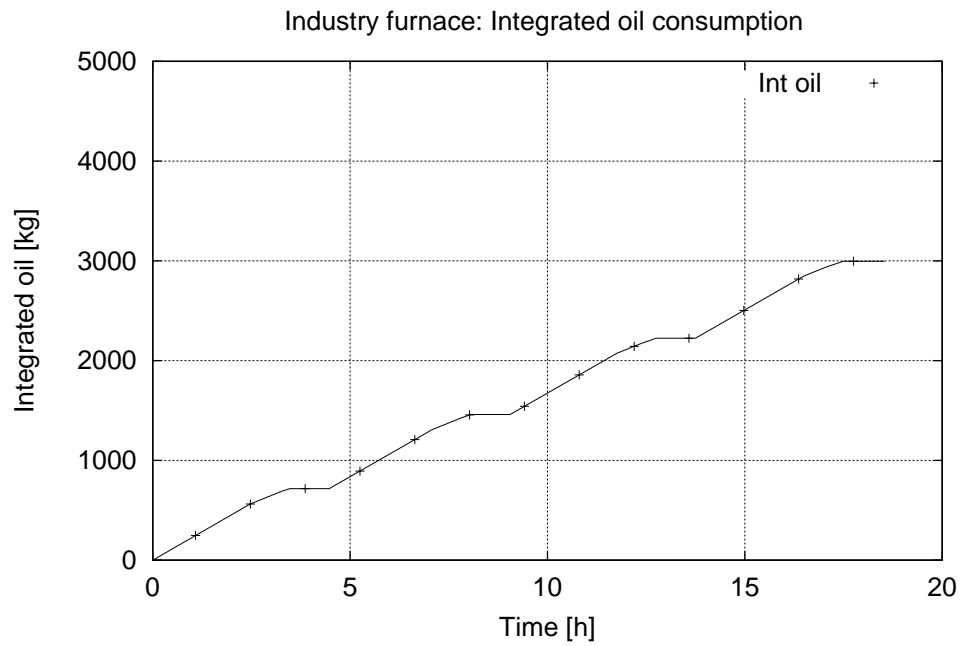


Kuva 50. Panosuunin seinämän lämpötilat vuorokausisimuloinnissa (pinnassa, 15 cm syvyydellä, ulkopinnassa).



Kuva 51. Palamisteho vuorokausisimuloinnissa.

Kuvassa 52 on esitetty integroitu polttoöljyn kulutus. Öljyn kulutuskäyrästä voidaan erottaa kuumennuksen eri vaiheet.



Kuva 52. Integroitu öljyn kulutus vuorokausisimuloinnissa.

## 7. Korkealämpötilaiset uunit Suomessa

### 7.1 Käyttökohteet ja sovellutukset

Termistä prosessointia, jossa lämpötila on noin 1 000 °C tai enemmän, käytetään useilla teollisuuden aloilla, erityisesti metalli-, kemian- ja rakennusaineteollisuudessa. Näissä tapauksissa uunirakenteiden ja eristeiden tarkoituksena on sopivien olosuhteiden luominen prosessille ja prosessin eristäminen ympäristöstä. Usein uuni toimii myös muottina tai astiana tai muuna kantavana rakenteena. Myös energian tuotannossa on kaikissa polttoprosesseissa lämpötila yli tuhat astetta, mutta palotilaa ympäröivien seinämien tarkoituksena on normaalisti lämmön siirtäminen toiseen väliaineeseen, useimmiten veteen. Kuitenkin myös energiategollisuuden polttoprosesseissa on osia, joissa on korkea lämpötila, mutta lämmönsiirto toiseen väliaineeseen ei ole tavoitteena.

#### 7.1.1 Metalliteollisuus

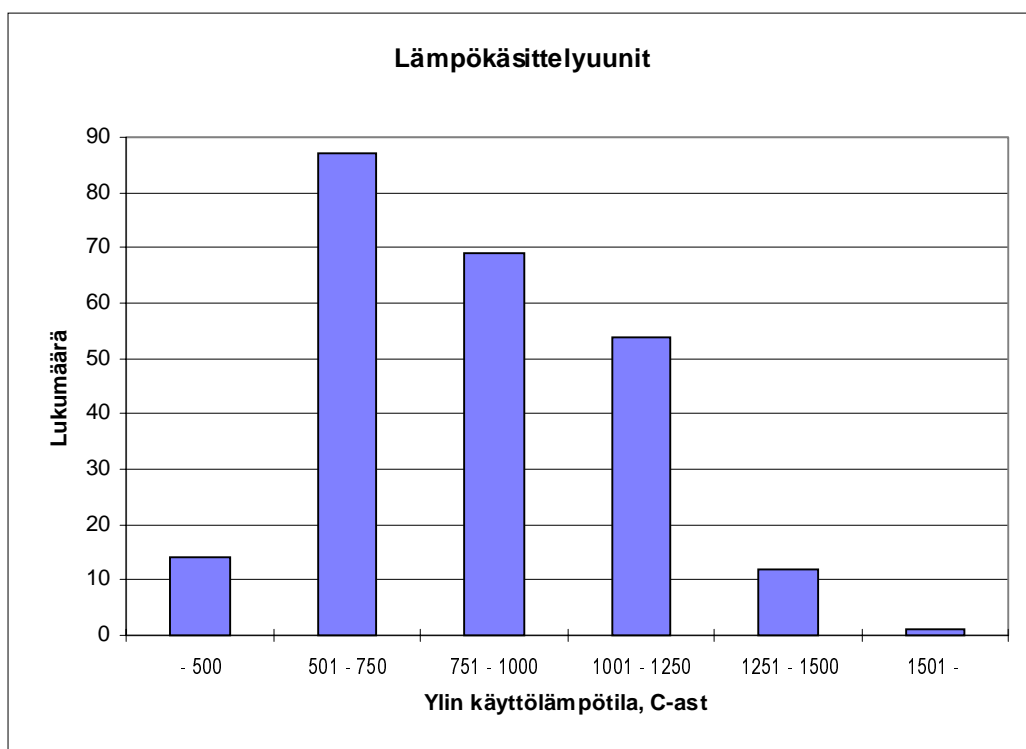
Perusmetalliteollisuudessa sulan metallin käsittelyä tapahtuu raakaraudan ja teräksen valmistuksessa sekä ferrokromin ja jaloteräksen valmistuksessa. Näissä prosesseissa uunin ominaisuuksille asetetaan sellaisia mekaanisen ja kemiallisen kestävyuden vaatimuksia, että kuitueristeet eivät tule kysymykseen eristerakenteissa.

Metallien valmistuksessa sulan metallin valun jälkeen seuraa muokkaus- ja lämpökäsittelyvaiheita, joiden tuloksena syntyy erilaisten metallilaatujen välituotteita tai puolivalmisteita. Näissä prosessivaiheissa lämpötila on ylimmillään 1 200 - 1 300 °C ja uunin seinärakenteet muodostavat eristävän kerroksen ympäristön suuntaan. Lämmönlähde ja muodostuvat savukaasut ovat normaalisti neutraaleja eristeille. Joissakin tapauksissa metallien käsittelyatmosfäärille voidaan asettaa erityisvaatimuksia, jotka rajoittavat kuitueristeiden käyttöä, mutta yleisesti ottaen kuitueristeet soveltuvat näiden uunien eristeeksi. Uunit ovat yleensä jatkuvatoimisia, ja lämpötilan alasajoja tarvitaan toimituserien muuttuessa, huoltotöiden yhteydessä ja tuotantotaukojen aikana. Tärkein vaatimus uunin rakenteille on, että ne toimivat luotettavasti eivätkä aiheuta tuotantokeskeytyksiä. Energiainsäästö ja nopeat prosessin ohjausmahdollisuudet ovat vaatimusten toisella sijalla.

Metallituotteiden jatkojalostuksessa ja puolivalmisteiden tuotannossa lämpökäsittelyuunit ovat yleisiä. Lukumääräisesti teollisuusuuneja on eniten juuri tällä sektorilla. Tyypillisiä lämpökäsittelymenetelmiä ovat esimerkiksi jännitysten päästö, kaasuhiilletys, karkaisu ja nuorrutus, pehmeäsihekkutus, kiiltohekkutus jne. Metalliteollisuuden keskusliiton keräämien tietojen mukaan (MET 1997) Suomessa oli vuonna 1997 yli kolmekymmentä yritystä, jotka suorittivat metallituotteiden lämpökäsittelyä. Uuneja oli käytössä noin 250.

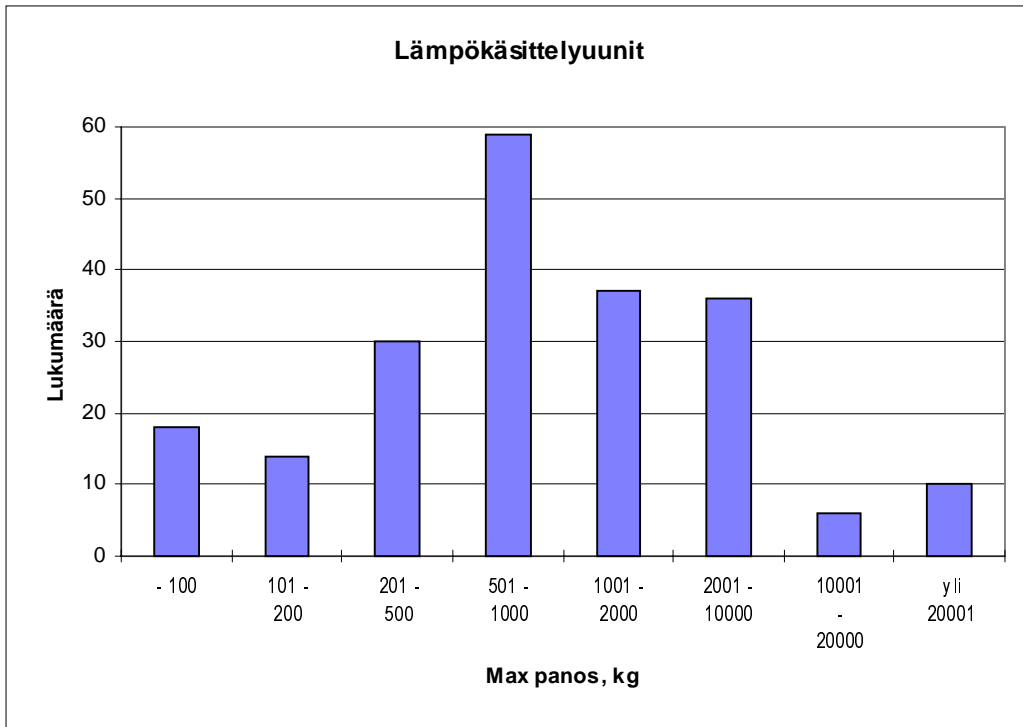
Kuvassa 53 esitetään lämpökäsittelyuunien käyttölämpötila. Ylimmät käyttölämpötilat on luokiteltu ryhmiin, ja lukumäärien mukaan yleisin lämpötila-alue on 500 - 750 °C ja toiseksi yleisin on 750 - 1 000 °C. Yli 1 000 °C:ssa toimivia uuneja on 67 kpl. Jos uunien kokoa arvioidaan maksimipanoksen avulla, on yleisin kokoluokka 500 - 1 000 kg (kuva 54), mutta aina 10 000 kg:aan asti uuneja on runsaasti. Suurimmillaan uuni on tilaston mukaan 200 t:n kappaleelle. Uuni on tällöin moduulirakenteinen ja siirretään käyttöpaikalleen kuumennettavan kappaleen määräämään paikkaan. Uunit ovat tyypiltään hyvin erilaisia. Ne voivat olla kammiouuneja, vaunu-uuneja, kellouuneja, nostokupu-uuneja, tunneliuuneja, moduuliuuneja jne.

Enemmistö uunien käyttöönottoajankohdasta on vuosina 1980 - 85 (kuva 55). Sitä nuorempia uuneja on n. 40 %, mutta myös vanhempia on useita. Osa uuneista on luonnollisesti varakapasiteettina. Energialähteitä tarkasteltaessa sähkö on ylivoimaisessa asemassa, kuten kuvasta 56 todetaan. Uuneista 83 %:ssa käytetään sähköä. Maakaasun osuus on 9 %.

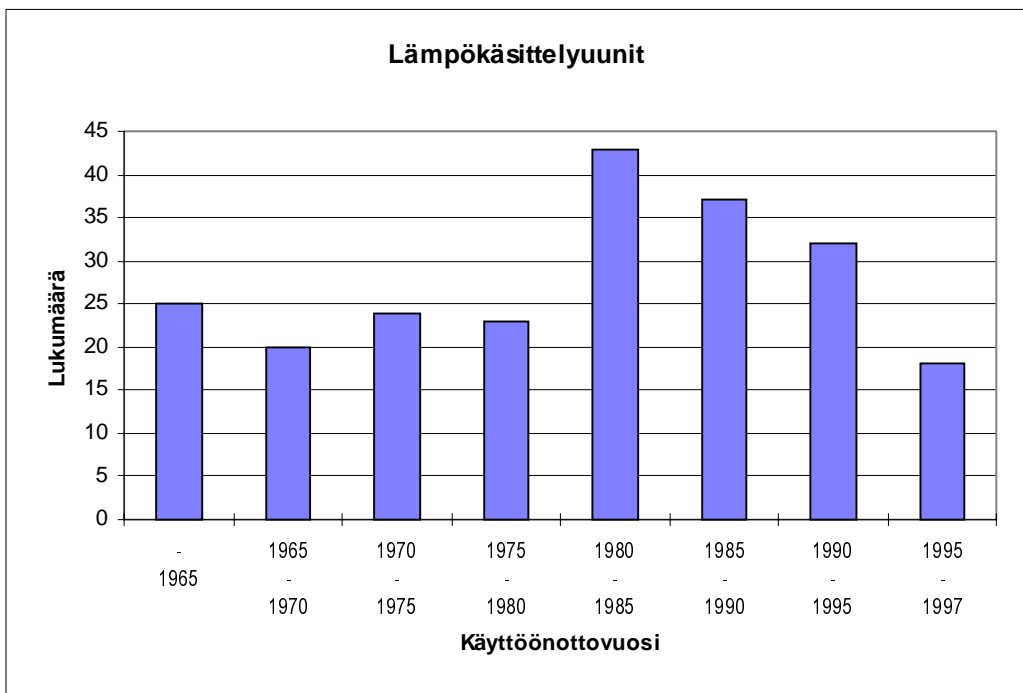


Kuva 53. Lämpökäsittelyuunien käyttölämpötilat.

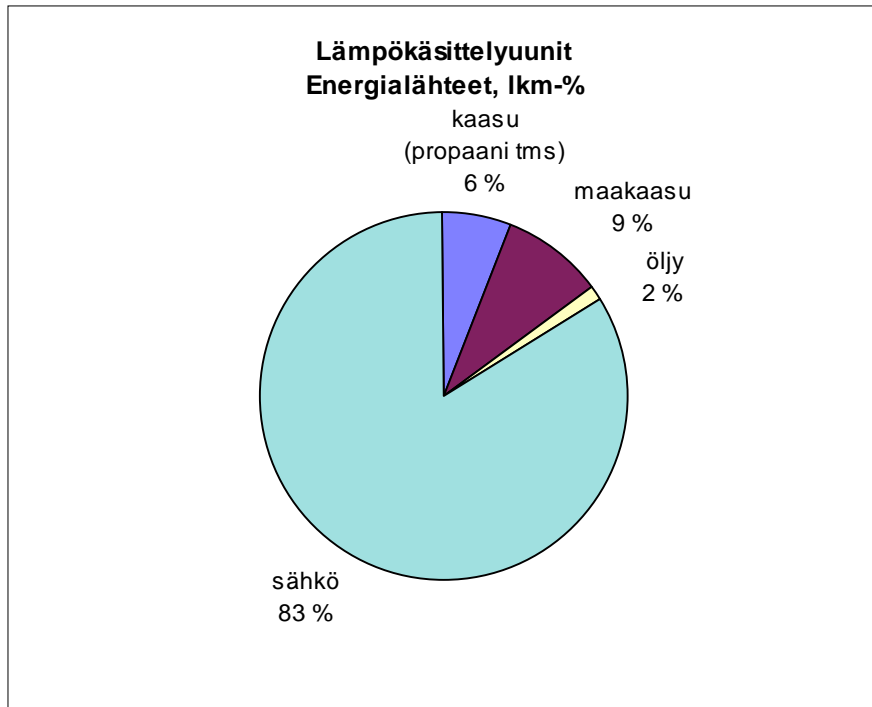




Kuva 54. Lämpökäsittelyyunit koko panoskoon mukaan ryhmiteltynä.



Kuva 55. Lämpökäsittelyyunit ikä käyttöönottovuoden mukaan ryhmiteltynä.



Kuva 56. Energialähteet lämpökäsittelyyuneissa.

### 7.1.2 Kemianteollisuus

Öljynjalostus- ja petrokemian teollisuudessa on lukuisia tuotteiden valmistusprosesseihin liittyviä reaktioita, joissa lämpötila on 500 - 1 000 °C. Lämpö siirretään reaktioaineisiin lämmönsiirtimen läpi ympäröivästä palo- ja pakokaasutilasta. Savukaasujen lämpötila on jonkin verran korkeampi kuin prosessin lämpötila. Koko prosessi eristetään ympäristöstä lämpöeristeellä lämpöhäviöiden pienentämiseksi ja kantavien rakenteiden suojaamiseksi korkeilta lämpötiloilta. Lämpöeristeinä käytetään jo nykyään yleisesti kuitueristeitä.

Raakaöljyn tislauksessa lämpötilat ovat pääosiltaan alle 500 °C. Tislauskolonnissa tislautumatta jäävä pohjaöljy käsitellään lämpökrakkauslaitoksessa raskaan polttoöljyn valmistamiseksi. Eräissä krakkausmenetelmissä lämpötilat ovat ylimmillään 500 - 700 °C.

Petrokemian teollisuudessa tärkein tuote Suomessa on eteeni, joka raaka-aineet saadaan raakaöljyn jalostuksesta. Eteenilaitoksen krakkausyuneissa prosessilämpötila nousee ylimmillään noin 900 °C:seen ja tulipesän lämpötila on ylimmillään 1 200 °C. Polttoaine on pääasiassa metaania. Lämpöeristykseen tavoitteena on lämpöhäviöiden pienentäminen ja oikeiden olosuhteiden pitäminen prosessissa. Tislaus- ja krakkausyunit ovat jatkuvatoimisia, ja eristeiden uusiminen ja korjaus on voitava tapahtua suunnitelmallisesti vuosihuoltojen yhteydessä. Uunin sisätiloihin on tarvetta mennä pari kertaa vuo-

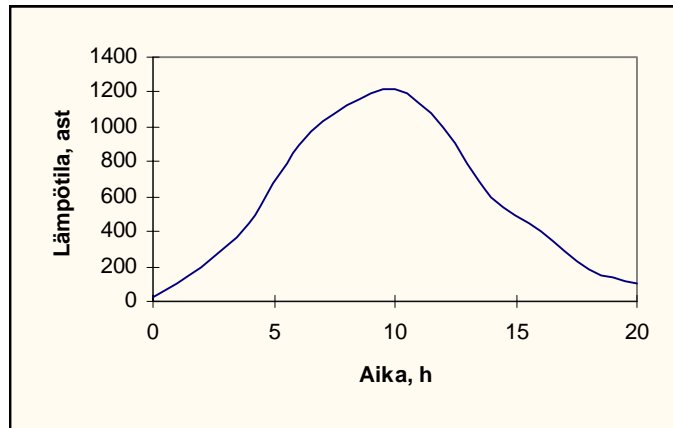
nessa, ja pitempiaikainen seisokki on 4 - 5 vuoden välein. Uunien alaosat ovat tiili-massa-rakenteisia ja kuitueristettä käytetään ylempissä osissa.

Teollisuuskemikaalien valmistuksessa on useita vaiheita, joissa lämpötila nousee 1 000 °C:n tuntumaan. Rikkihapon valmistuksessa rikkipitoisen malmin pasutus tapahtuu leijukerrosmenetelmällä, jossa palaminen tapahtuu n. 900 °C lämpötilassa. SO<sub>2</sub>-kaasu johdetaan tämän jälkeen katalyysireaktoriin, jossa prosessista vapautuu lämpöä ja lämpötila kohoaa ylimmillään noin 600 °C:seen. Myös typpihapon valmistuksessa on eksoterminen reaktio ammoniakkin hapettuessa katalyytin avulla. Lämpötila nousee reaktiossa noin 900 °C:seen. Pigmenttien, lähinnä TiO<sub>2</sub>:n, valmistuksessa on vaihe, jossa pigmenttimassan lämpötila nousee putkiuunissa 1 000 °C:n tienoille ja putkia ympäröimä palotila sitäkin korkeammalle.

### **7.1.3 Lasi- ja keramiikkateollisuus**

Lasinvalmistuksessa raaka-aineiden sulatus tapahtuu jatkuvatoimisessa vannauunissa tai käsityöalalla upokasuunissa. Lämpöenergia tuotetaan joko polttoaineilla, lähinnä öljyllä ja maakaasulla, tai sähköllä. Lasin sulattaminen vaatii korkean lämpötilan, 1 400 - 1 600 °C. Poistokaasuilla esilämmitetään palamisilmaa, joiden lämpötila voi olla aluksi jopa 1 400 °C. Lasin raaka-aineiden sulatuksen jälkeen lasi tulee muovauslinjaan, jossa lasituote saa lopullisen muotonsa. Lämpötila pidetään tällöin 1 000 - 1 200 °C:ssa. Pakkauslasin valmistuksessa käytetään muotteja, joissa lasi muotoillaan pulloksi, purkiksi tms. Tasolasin valmistuksessa lasi valutetaan vaakasuoralle pinnalle käyttäen yläpuolista lämmitystä. Lasi voidaan valmistuksen yhteydessä myös karkaista esimerkiksi ajoneuvojen lasia valmistettaessa. Lämpökarkaisussa lasi kuumennetaan lähelle pehmenemispistettä ja jäädytetään nopeasti ilmapuhalluksen avulla. Lasin valmistuksen kaltainen prosessi on myös vuorivillan valmistuksessa, jossa raaka-aineiden sulatus tapahtuu uunissa, jossa lämpötila on lähellä 1 500 °C.

Keramiikan valmistuksessa pääraaka-aineet ovat savi, kaoliini (plastiset) sekä kvartsi, maasälpä, dolomiitti, wollastoniitti ja bauksiitti (ei-plastiset). Keramiikkatuotteita ovat talous- ja hienokeramiikka, sähkötekninen posliini, saniteettiposliini ja laatat. Keramiikan poltto tapahtuu ylimmillään noin 1 200 °C:ssa ohjatun ja noin 20 tuntia kestävässä prosessin avulla. Kuvassa 57 esitetään tyypillinen lämpötilakäyrä keramiikan valmistuksessa. Uunit ovat tyypiltään rulla- tai lavaperiaatteella toimivia tunneli- tai kammiouuneja.



Kuva 57. Lämpötilan ohjauskäyrä keramiikan poltossa.

Saniteettikeramiikan valmistajia on Suomessa yksi yritys, IDO Kylpyhuone Oy, joka kuuluu Metra Oy:n Sanitech-ryhmään. Mainittu ryhmittymä on Euroopan suurin ja maailman toiseksi suurin saniteettituotevalmistaja. IDO Kylpyhuone Oy:llä on käytössä kolme tunneliuunia, joiden pituus on 90 metriä ja keskiosassa lämpötila nousee 1 230 °C:seen. Uunit on rakennettu 1969 ja ne ovat nestekaasutoimisia (butaani). Yrityksellä on lisäksi pienempi kammiouuni, 45 m<sup>3</sup>, joka on kymmenen vuotta vanha ja kuitueristeinen (Nyström 1999).

Keraamisten laattojen, lasitetun kaakelin ja klinkkerin, valmistus on Suomessa keskittynyt Pukkila Oy:lle, joka puolestaan kuuluu kansainväliseen Ricchetti Groupiin. Ricchetti on Euroopassa kolmanneksi suurin laattavalmistaja. Pukkila Oy:n tehtailla on kaksi 60 metriä pitkää rullauunia (rullien väli n. 100 mm). Lattialaattojen valmistuksessa ylin lämpötila on 1 210 °C ja seinälaattojen valmistuksessa 1 070 °C. Uunit on valmistettu tiilestä ja massasta. Tuotantotaukojen ajaksi lämpötila lasketaan 900 °C :seen ja varsinainen alas- ja ylösajo kestävät kumpikin 2,5 vuorokautta. Polttoaineena on propaani. (Virta 1999).

Käyttökeramiikan valmistuksessa Hackman Designor Oy Ab:llä on käytössä kuusi uunia, joista kaksi on 86 m pitkiä tunneliuuneja. Tunneliuunit ovat tiilirakenteisia, ja kolme keskikokoista panosuunia ovat kuitueristeisiä. Uuneista vanhin on rakennettu 1979. Polttoaineena on maakaasu. Suomessa on lukuisia määriä myös muita käyttökeramiikan valmistajia.

Ensto Ceramics Oy Ab on osittain erikoistunut teknilliseen keramiikkaan, mm. suodatimiin. Yrityksessä on neljä uunia, joissa lämpötila on ylimmillään 1 700 °C. Uunit ovat tiili- ja kuitueristeisiä. Kuitueristeiset uunit kestävät paremmin panosajon lämpötilavaihteluita. Polttoaineena on propaani (Hänninen 1999).

#### 7.1.4 Rakennusaineteollisuus

Rakennusaineteollisuudessa korkealämpötiloja esiintyy sementin ja kalkin tuotannossa sekä tiilien ja kevytsoran tuotannossa. Sementin valmistuksessa käytetään pitkää, hitaasti pyörivää kierto-uunia, johon esilämmitetty raaka-aine syötetään sisään yläpäästä ja polttoaine ja palamisilma syötetään alapäästä. Uunin kuumimmissa osissa lämpötila kohoaa 1 400 - 1 500 °C:seen. Uunissa muodostuva sementtiklinkkeri jauhetaan edelleen sementiksi. Kalkin poltto tapahtuu kuilu-uunissa tai kierto-uunissa. Uunin polttovyöhykkeessä lämpötila on yleensä yli 1 100 °C. Myös kevytsoran valmistus tapahtuu kierto-uunissa ja lämpötila on yli 1 000 °C.

Poltettujen tiilien valmistus tapahtuu lähes samalla tavalla kuin keramiikan (kuva 57), mutta lämpötilataso on polttovaiheessa 100 - 150 °C alempi. Tunneliuunin läpi johdetaan tiilikappaleet, jolloin ne kuivuvat hapettavassa poltossa punasävyisiksi ja pelkistävissä poltossa väri vaihtelee tummanruskeasta sinimustaan. Uunit ovat jatkuvatoimisia.

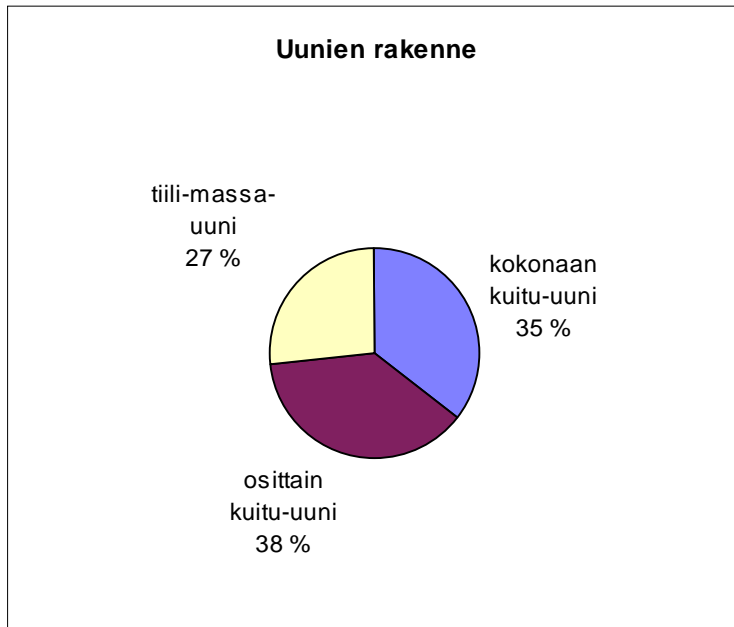
Poltettuja tiiliä valmistaa tällä hetkellä Suomessa kolme yritystä. Markkinoista 50 -60 % on Optiroc Oy:llä ja valmistus tapahtuu kolmessa tehtaassa, uuneja on yhteensä neljä. Polttoaineena käytetään maakaasua ja polttoöljyä. Uunit ovat tiilirakenteisia. Kevytsoraa Optiroc Oy valmistaa yhdellä tehtaalla, jossa on kaksi jatkuvatoimista pyörivää uunia. (Laine 1999). Tiileritehtaat (Seppälän Tiili Oy) omistaa kolme tiilitehdasta, joissa on yhteensä neljä tunneliuunia. Tiilituotannon markkinaosuus on n. 35 %. Polttoaineena on raskasöljy ja uunit ovat tiilirakenteisia. Vanhempien uunien lämpöeristystä on parannettu sisäpintaan asetetuilla kuitueristeillä. Kolmas tiilivalmistaja on Raikkonen Oy muutaman prosentin markkinaosuudella.

### 7.2 Kysely uunien käytöstä

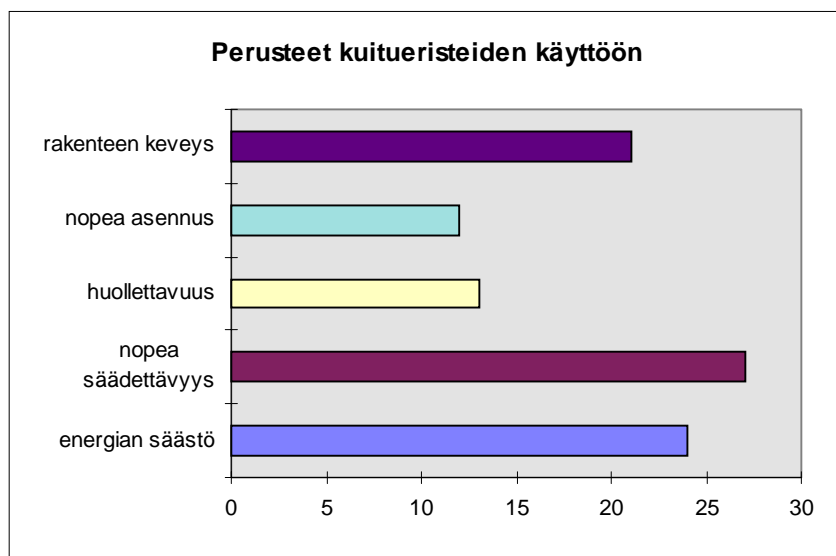
Kuitu- ja tiiliuunien markkinatilanteen selvittämiseksi tehtiin uuneista kirjallinen kysely lämpökäsittelyuuneja käyttäville yrityksille. Kysely lähetettiin noin kolmellekymmenelle yritykselle, joista vastasi 32 %. Vastaukset kattoivat 52 uunin tiedot.

Uunit ovat kyselyn mukaan 35-prosenttisesti kuiturakenteisia ja 27 % on tiiliuuneja (kuva 58). Suurin ryhmä käsittää osittaisesti kuiturakenteiset uunit. Kuitueristettä on tällöin käytetty yleisimmin sisäpuolisena eristeenä koko uunissa tai katossa, ja kuitueristeen osuus on 20 - 80 % uunin koko eristyksestä.

Perusteet kuiturakenteiden käyttöön esitetään kuvassa 59. Suurin hyöty katsotaan saatavan kuiturakenteisen uunin nopeasta säädettävyydestä. Toisella sijalla on energiansäästö ja kolmannella sijalla rakenteen keveys. Myös huollettavuus ja nopea asennus esitettiin kuitueristeiden eduiksi.



Kuva 58. Lämpökäsittelyuunien rakenne kyselyn mukaan.



Kuva 59. Kuitueristeiden käytön perusteet 35 uunin otoksessa.

Kysyttäessä kuitueristeiden haitoista ja esteistä niiden käytölle suurin vastausryhmä oli ”toimiva uuni, jota ei ole tarvinnut uusida”. Ryhmä käsitti 85 % tiiliuuneista. Joissakin uuneissa syynä on mekaaninen kestävyys, muutamassa syynä on hinta. Myös työturvallisuus katsotaan parissa tapauksessa kuitueristeiden ongelmaksi. Muutaman uunin ongelmaksi esitetään sähkövastusten kiinnitys.

### 7.3 Kuitueristeiden mahdollisuuksia energiateollisuudessa

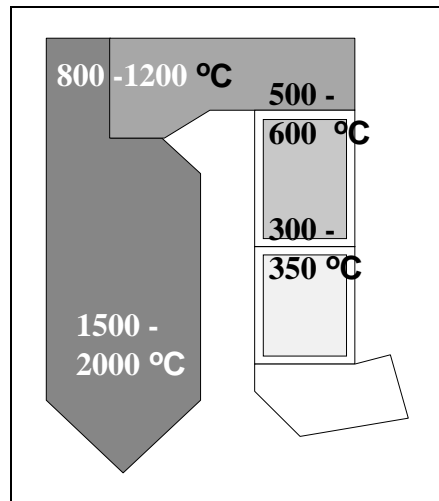
Kuitueristeiden positiivisista ominaisuuksista tärkeimpiä energiantuotantolaitosten näkökulmasta ovat korkean lämpötilan kestävyys, keveys, villamaisuus ja helppo asennettavuus. Lisäksi eristettyjen seinien valmistus voidaan toteuttaa tehdasvalmisteisesti. Nämä ominaisuudet omaava aine, jos se olisi ollut pitkään tiedossa, olisi muuttanut poltto-prosessiin perustuvia lämmöntuotantolaitoksia niin, että ne olisivat enemmän tehdasvalmisteisia, helpommin asennettavia, helpommin huollettavia sekä halvempia materiaali- ja rakenneratkaisuja sisältäviä kokonaisuuksia. Kuitueristeiden elinkaaren alkupää on kuitenkin vain kymmenen vuoden takana ja kuitueristeilläkin on rajoituksensa. Koska kattilalaitoksissa on olemassa toimivat ratkaisut, ei ole ollut pakottavaa tarvetta löytää uudentyypisiä ratkaisuja.

Tyypillisessä kattilalaitoksessa savukaasujen lämpötilat ovat ylimmillään 1 500 - 2 000 °C (kuva 60). Höyrystinosassa savukaasujen lämpötila laskee 800 - 1 400 °C:seen. Höyrin tulistusvaiheessa lämpötila alenee 500 - 600 °C:seen ja edelleen veden esilämmityksessä noin 300 - 400 °C:seen. Tämän jälkeen lämpöä otetaan vielä talteen ilman esilämmittimessä. Kuitueristeiden käyttöalue lämpötilan puolesta ulottuu siten kattilalaitoksessa lähes kattilan loppuosaan asti. Kattilan lämpötilataso riippuu mm. polttoaineesta, ja kosteutta sisältävillä polttoaineilla on tulipesän putkistopintaa rajoitettava, jotta lämpötila saadaan pysymään riittävän korkeana ja palamisolosuhteet edullisina.

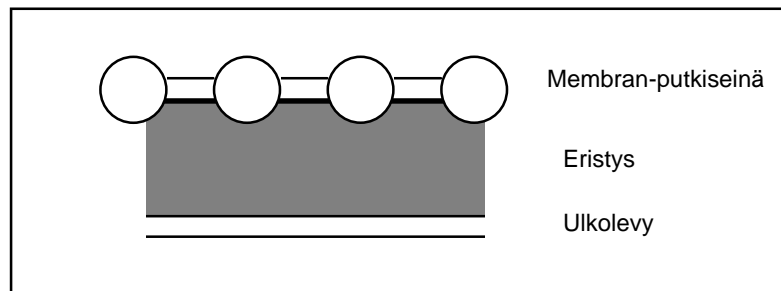
Palotilan seinämärakenteeksi on vakiintunut kuvan 61 mukainen ns. membran-rakenne, joka on sekä kaasutiivis että tehokas lämmönsiirtopinta. Putkiseinämän takana oleva lämpöeristys ei juurikaan edellytä korkealämpötilakestävyyttä. Jos jäähdytysputkia ei voida käyttää lämpötilan liiallisen alenemisen vuoksi, voidaan lämmöneristys toteuttaa lämpötilankeston puolesta kuitueristeellä. Myös seinämien kulmakohdissa voitaisiin ajatella kuitueristettä ja ulkopinnan rakentamista kaasutiiviiksi teräslevyllä, jolloin teräslevyltä ei vaadita korkeata lämpötilakestävyyttä. Tällöin voitaisiin saavuttaa asennukseen ja kustannuksiin liittyviä etuja.

Kattilan yläosissa on veden tulistusputkistot, jotka ovat savukanavaan sijoitettuja höyryputkia. Savukaasun lämpötila on vielä niin korkea, että kanavan tavanomaiset lämpöeristerakenteet vaativat suojaputkiston, esimerkiksi tulistinputkia (kuva 62). Jos tulistinosan ja veden esilämmitysosan savukanavien seinämät voitaisiin rakentaa kuitueristeestä, olisi rakenne kuvan 63 mukaisesti yksinkertainen, tehdasrakenteinen, helposti asennettava ja kevyt. Myös materiaalikustannussäästöt olisivat ilmeiset, kun teräsraakenteiden lämpötilavaatimusta voidaan alentaa. Jäähdyttämättömään savukanavaan olisi helppo rakentaa myös tarkastus- ja huoltoluukkuja, joiden kautta pääsy käsiksi tulistinputkiin olisi olennaisesti helpompaa kuin putkirakenteisen seinän kautta.

Tulistinputkien kannatus on korkean lämpötilan vuoksi ongelmallinen ja melko monimutkaisia rakenteita on kehitetty. Kannattimien suojaaminen kuitueristeellä muuttaisi olennaisesti lämpötilatasoa ja erillisiltä vesijähdytteisiltä kannatusputkilta voitaisiin välttyä. Kattilalaitoksen seinässä on lisäksi lukuisa joukko läpivientejä, joiden rakenne saataisiin yksinkertaisemmaksi kuitueristeiden avulla.

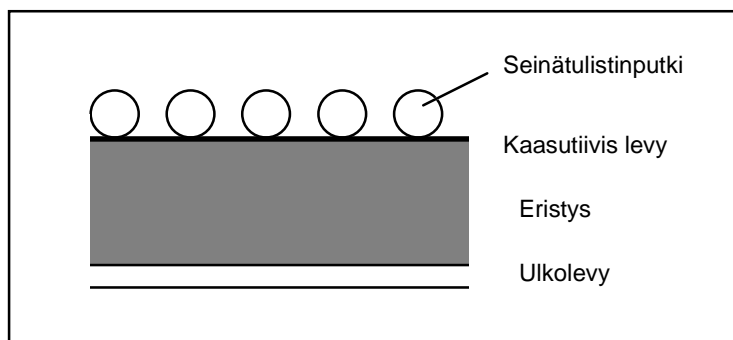


*Kuva 60. Voimalaitoskattilan lämpötila-alueet.*



*Kuva 61 Höyrystysosan seinämärakenne kattilalaitoksessa.*





*Kuva 62. Esimerkki tulistinosan seinämärakenteesta kattilalaitoksessa.*

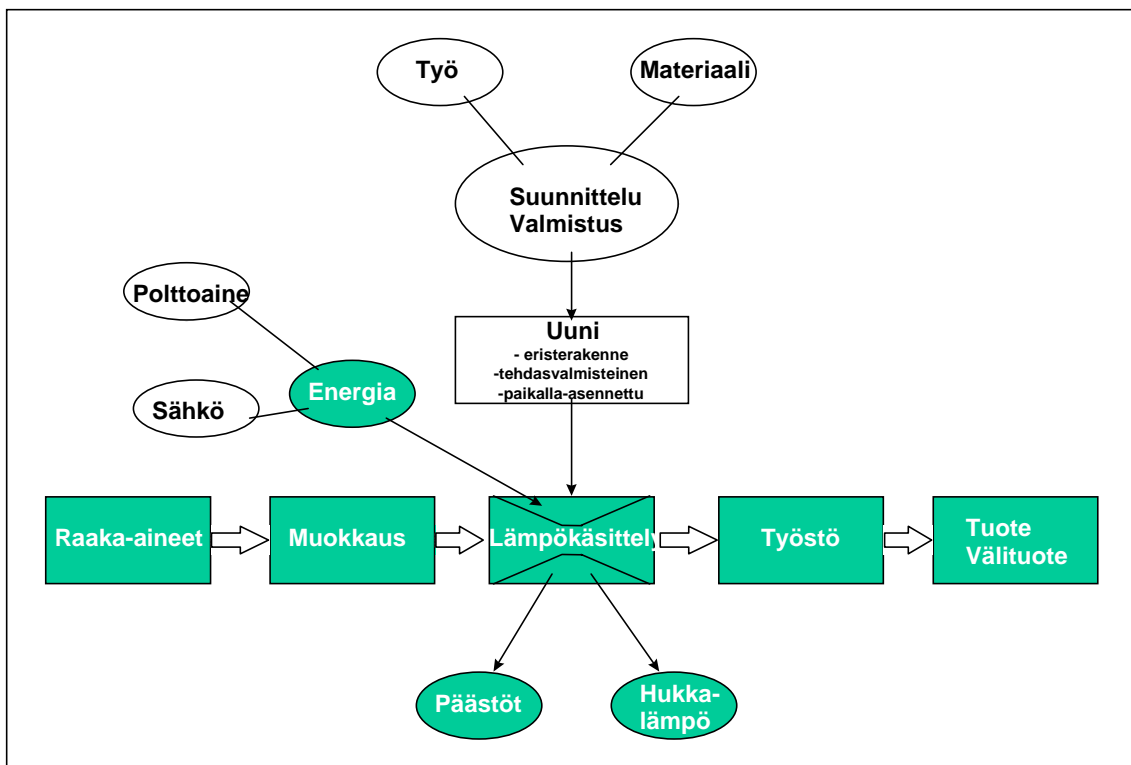


*Kuva 63. Kuiturakenteinen mahdollinen seinämärakenne.*

Kombilaitoksissa savukaasut ovat kuumimmillaan kaasuturbiinissa, ja höyrykattilaan tullessaan kaasu on jäähtynyt 500 - 600 °C:seen. Savukaasut tulevat kattilan tulistinosaan, jolloin savukanavan voitaisiin ajatella olevan kuitueristeinen kanava, jossa tulistinputkien ripustus voidaan toteuttaa helposti. Veden höyrystinosassa savukaasujen lämpötila on alentunut n. 250 °C:seen ja korkealämpötilaeristystä ei tarvita. Kombilaitoksessa on lisäksi pakokaasukanava kaasuturbiinin ja höyrykattilan välissä, jossa lämpötilat ovat korkeita ja lämpöpinnat jäähdyttämättömiä ja kuitueristeille on näissä osissa käyttömahdollisuuksia.

## 8. Kustannustarkastelua

Teollisuusuunien tai energiatuotantolaitosten korkealämpötilaeristeiden kustannusvertailuissa on tärkeää riittävän laaja tarkastelu, jotta mukaan saadaan olennaisesti valintaan vaikuttavat kustannukset. Kuvassa 64 esitetään kokonaiskustannusten muodostuminen vertikaalisena vaiheena uunin rakentamisesta ja horisontaalisena vaiheena tuotantoprosessin ja uunin käyttökustannuksista. Käyttökustannuksista muodostuu merkittävä tekijä, jos uuni aiheuttaa tuotantokatkoja tai muita rajoituksia tuotantolinjalle. Uusilta uuneilta voidaan edellyttää, että ne toimivat vuosihuoltojen välin häiriöittä, vanhojen uunien korvausinvestointia tarkasteltaessa on seisokkiriskit otettava huomioon.



Kuva 64. Prosessiuunin kannattavuuteen vaikuttavat ketjut.

Uunien merkittävin käyttökustannus muodostuu energian käytöstä. Energiakulutus muodostuu kappaleen kuumentamisesta ja polttoaineita käytettäessä savukaasuhäviöistä, mikäli lämmön talteenottoa ei ole toteutettu. Vain pienempi osa lämpöhäviöistä tapahtuu eristerakkeen läpi, kuten luvussa 5 on tarkasteltu. Lämpöhäviöitä muodostuu myös uunista poistuvan kappaleen jäähtyessä, mikäli vapautuvaa lämpöä ei voida hyödyntää. uunien energialähteenä on lukumääräisesti yleisimmin sähkö, mutta varsinkin suurissa uuneissa käytetään myös kaasua, maakaasua tai nestekaasua. Sähköä käytettäessä läm-

pöhäviöitä ei muodostu savukaasuna lämpökäsittelyuunin yhteydessä. Sähkön hinta on perinteisesti ollut kalliimpi kuin polttoaine-energia ja hintakehitys on ollut hyvin enustettavissa, mutta sähkömarkkinoiden vapauduttua hinnat ovat laskeneet ja ne vaihtelevat sopimuksen mukaan. Sähköpörssistä on ajoittain saanut hyvinkin halpaa sähköä, ja näin ollen energian hinta on voimakkaasti tapauskohtainen.

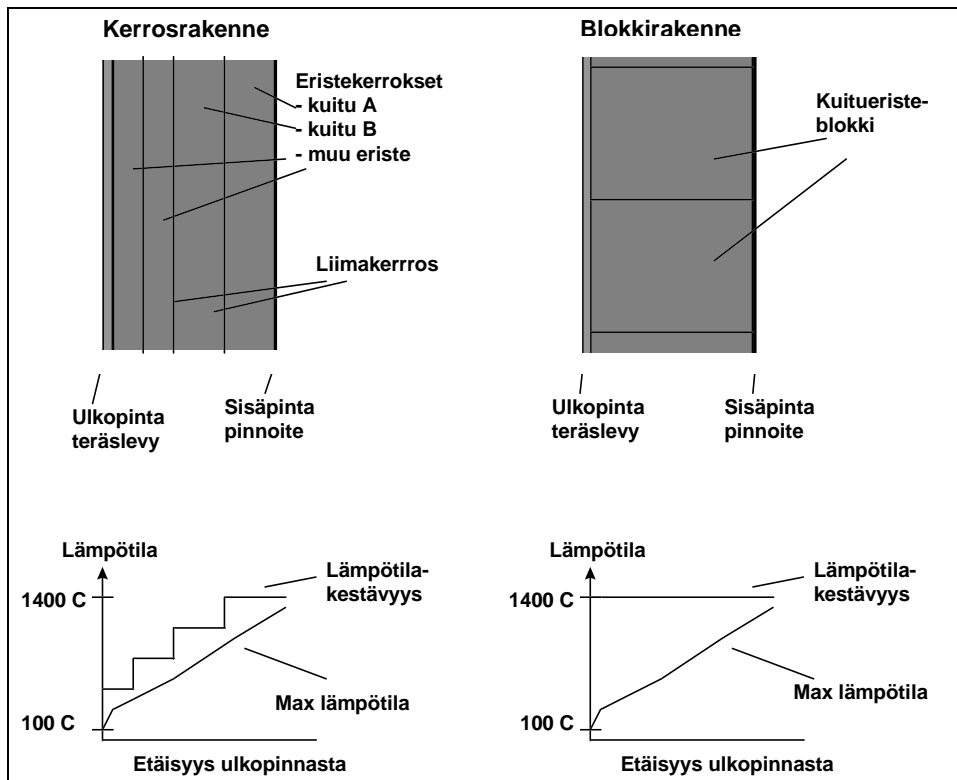
Uunin käyttötapa vaikuttaa kustannusten muodostumiseen ja uunin valintaan. Jatkuva-toimiselta uunilta edellytetään kestävyyttä ja pieniä lämpöhäviöitä seinämien läpi. Pa-nostyyppisissä uuneissa, joita käytetään mahdollisesti vain arkipäivinä ja päivävuorois-sa, lisävaatimuksia asettavat lämpötilan nopeat vaihtelut. Energiaa säästetään, jos uunia ei tarvitse pitää korkeassa lämpötilassa käyttötauojen aikana. Myös huoltotyöt voidaan suorittaa nopeammin, jos lämpötilamuutoksilla ei ole nopeusrajoituksia.

Korkealämpötilauunien eristeseinämät, kun tarkastellaan keraamisia kuitueristeitä, voi-daan rakentaa joko blokki- tai kerrosrakenteisena. Kuvassa 65 esitetään periaateratkai-sut. Blokkirakenne muodostuu yhtenäisistä, laatikkomaisista moduuleista, joissa kussa-kin eriste on samaa laatua. Kerrosrakenteisessa seinämässä eristehuovat liimataan toi-siinsa ja erilaisia eristelaatuja voidaan käyttää lämpötilajakautumasta riippuen. Edellä mainitussa kuvassa esitetään periaatteellisesti eristeiden lämpötilakestävyuden vaikutus seinämän kerrostumiseen. Taloudellinen peruste liimarakenteen käyttöön muodostuu eristeiden kustannuksista. Kuitueristeen, jonka laatuluokitus on 1 400 °C, hinta on noin 12-kertainen mineraalivillaan verrattuna ja 3 - 4-kertainen 1 200 °C:n kuitueristeeseen verrattuna.

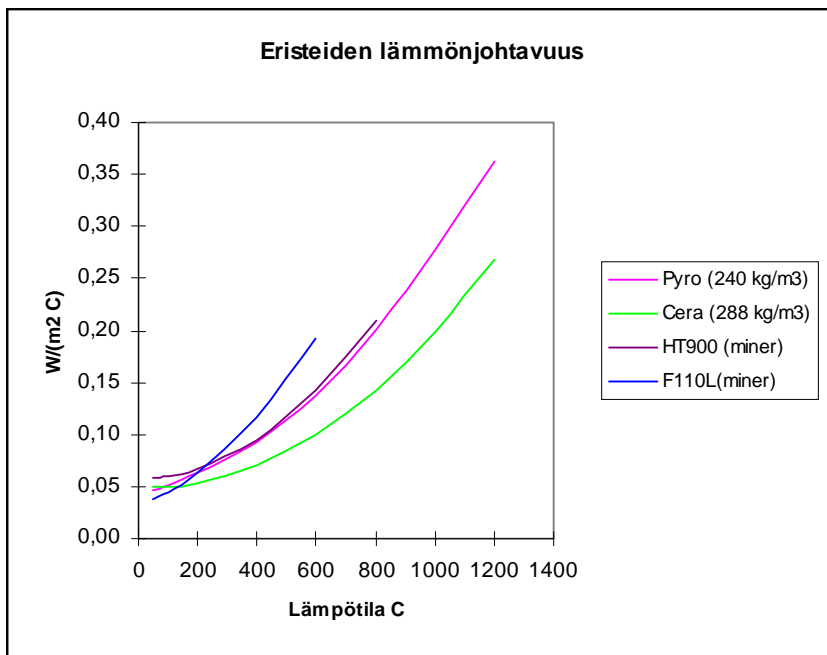
Uunin eristyksen kokonaiskustannuksista työkustannukset voivat nousta jopa puoleen. Tapauskohtaisesti vaihtelut ovat suuria riippuen rakentamisolosuhteista ja uunin muo-dosta ja mitoituksista sekä lukuisista yksityiskohdista: Tehdasvalmistuksella alennetaan kustannuksia, läpivientien määrä vaikuttaa työmäärään, standardimitoituksella alenne-taan kustannuksia, nurkka- ja kulmamäärä pinta-alaan nähden vaikuttavat kustannuksiin jne.

Eristeiden lämmönjohtavuus riippuu lämpötilasta ja eristeominaisuuksista. Lämmön-johtavuus on 1 000 °C:ssa 4 - 5-kertainen verrattuna lämmönjohtavuuteen 200 °C:ssa. Eristelaatujen keskinäiset erot samassa lämpötilassa ovat olennaisesti pienempiä. Kuitu-eristeiden tiheys vaikuttaa siten, että suurempi ominaispaino parantaa eristyskykyä, esi-merkiksi kuvan 66 mukaan tiheyden muutos 240 kg:sta/m<sup>3</sup> 288 kg:aan/m<sup>3</sup> parantaa eristävyyttä 40 %, jos lämpötilataso on 1 000 °C. Sadan asteen kohdalla keskinäiset lämmönjohtavuuserot ovat enää alle 20 %. Kuitueristeen suurempi ominaispaino mer-kitsee kuitenkin korkeampaa hintaa, mikä on otettava huomioon materiaalivalintoja tehtäessä.

Teollisuusuunien korvaus- ja korjausinvestointeja tehtäessä on yleisenä suuntauksena ollut siirtyminen kuitueristeiden käyttöön, elleivät käyttöolosuhteet edellytä tulenkestävien tiilien ja massojen käyttöä. Uunin osittainen muuttaminen kuitueristeiseksi, esimerkiksi sisäpuolisella kuitukerroksella, tuottaa kustannussäästöjä, jos tuotantolinja saadaan tehokkaampaan käyttöön ja uunin kestävyys paranee lämpötilavaihteluiden vaikutuksille. Myös lämpöhäviökustannukset pienenevät lisäeristysten ansiosta.



Kuva 65. Kerros- (liima-)rakenne ja blokki- (moduuli-)rakenne kustannusten kannalta.



*Kuva 66. Eristeiden lämpötilan ja eristetyypin vaikutus lämmönjohtavuuteen.*

## 9. Yhteenveto

### 9.1 Tutkimuksen sisältö

Tässä työssä käsitellään aluksi kirjallisuuden pohjalta alumiinisilikaattikuitujen lämmönkestoa sekä kemiallista kestävyyttä ja eroosiokestävyyttä korkeissa lämpötiloissa. Kuiduista tehdyt tuotteet ja rakenteet esitellään ja samassa yhteydessä myös kirjallisuustietoja niiden hyvistä ja huonoista puolista. Lisäksi tarkastellaan kuitujen mahdollisesti aiheuttamia terveysongelmia ja esitellään kuitujen vaarallisuuden vähentämiseksi tehtyjä toimenpiteitä.

Kokeellinen työ tehtiin tutkimusta varten rakennetulla normaalikokoisella koeuunilla, jossa oli useita erilaisia eristerakenteita. Pääpaino oli moduulirakenteiden ja useista kerroksista liimaamalla valmistettujen rakenteiden vertailulla. Uunissa oli kaksi erilaista moduulirakennetta ja liimatusta rakenteesta oli useita variaatioita. Kaikki rakenteet pinnoitettiin palotilan puolelta. Rakenteet oli suunniteltu kestäväksi 1 300 °C:n lämpötila ja rakenteiden kuumimpien osien kuitumateriaalit olivat lämpötilaluokitukseltaan samalaista kuitumateriaalia. Pääosa testiajoista tehtiin 1 300 °C:n lämpötilassa, mutta lopuksi tehtiin kaksi lyhyttä ajoa 1 400 °C:n lämpötilassa.

Uunin palotilasta ja seinistä mitattiin lämpötiloja eri syvyyksiltä ja ajoittain myös ulkopintalämpötiloja. Savukaasuista tehtiin analyysit ja mitattiin kertaluontoisesti imupyrometrillä uunin sisälämpötiloja. Eristerakenteiden kestävyyttä tarkkailtiin visuaalisesti ja ajojen jälkeen eristeistä otettiin näytteitä, joita tarkasteltiin elektronimikroskoopilla. Uunin lämpötilamittaustuloksia käytettiin eristelaatujen lämpöteknillisten tietojen tarkistamiseen ja simulointien kalibrointiin.

Koeuunin simuloinneilla pyrittiin selvittämään mittaustuloksiin tukeutuen eristemateriaalien lämpöteknisiä ominaisuuksia. Simulointien avulla kelpoistettiin käytettyä simulointimallia ja samalla simuloinnit auttoivat merkittävästi mittaustulosten arvioinneissa. Kelpoistettua simulointimallia hyödynnettiin projektissa tehdyissä teollisuusuu-  
nien parametritarkasteluissa.

Eri teollisuuden aloilla käytettävistä korkealämpötilauuneista kerättiin tietoa ja näiden pohjalta kyselyn avulla arvioitiin, kuinka paljon kuitueristeitä käytetään ja kuinka paljon käyttöä on mahdollisuus lisätä. Raportissa käsitellään myös korkealämpötilojen eristeiden investointitarkasteluissa huomioonotettavia kustannustekijöitä.

## 9.2 Tärkeimmät tulokset

Koeuunin testiajojen perusteella todetaan, että eristerakenteissa oli kuitumateriaalien kutistumisen seurauksena havaittavissa runsaasti erilaisia säröjä. Isoimmat säröt olivat moduuleissa, jotka koostuivat kahdesta 150 mm paksusta puolikkaasta – näissä kutistuman vaikutus näkyi harvoissa kohdissa, mutta sitäkin suurempana. Raot ulottuivat melkein läpi koko eristekerroksen. Niissä moduuleissa, jotka koostuivat 20 mm:n paksuisista huovista, säröt olivat paljon pienempiä. Myös liimatun rakenteen säröt olivat pieniä ja ulottuivat ainoastaan rakenteen keskiosissa oleviin kovetettuihin levyihin asti. Mikään särö ei ollut niin suuri, että uunin pinta olisi kuumentunut olennaisesti lämpövuotojen takia. Tähän vaikuttaa osaltaan se, että keraaminen kuitu laajenee kuumetessaan ja säröt ajon aikana sulkeutuvat.

Eristeen sisäosista otetuista näytteistä todettiin, että liimattujen rakenteiden mikään taustaeristekään ei ollut tuhoutunut; ainoastaan vuorivillalevyn pintaosan väri oli muuttunut. Liimattujen rakenteiden taustaeristeiden paksuus onkin mitoitettava huolellisesti etukäteen, ettei taustaeriste pääse ylikuumentumaan.

Eristerakenteet kestivät myös lyhyet ajot ”ylikorkeassa” 1 400 °C:n lämpötilassa. Pinnotteisiin syntyi ajoissa ainoastaan säröjä; vähäistä pinnoitteen irtoamista oli havaittavissa poltinaukon reunoilla.

Materiaalien tuhoutumisesta ei löydetty ulkonaisia merkkejä eikä myöskään SEM-kuvien perusteella muutoksia tapahtunut vielä 1 300 °C:n lämpötilassa. Vain taustavuorauksena olleessa vuorivillalevyssä oli joitakin sintraantumiseen viittaavia yksityiskohtia.

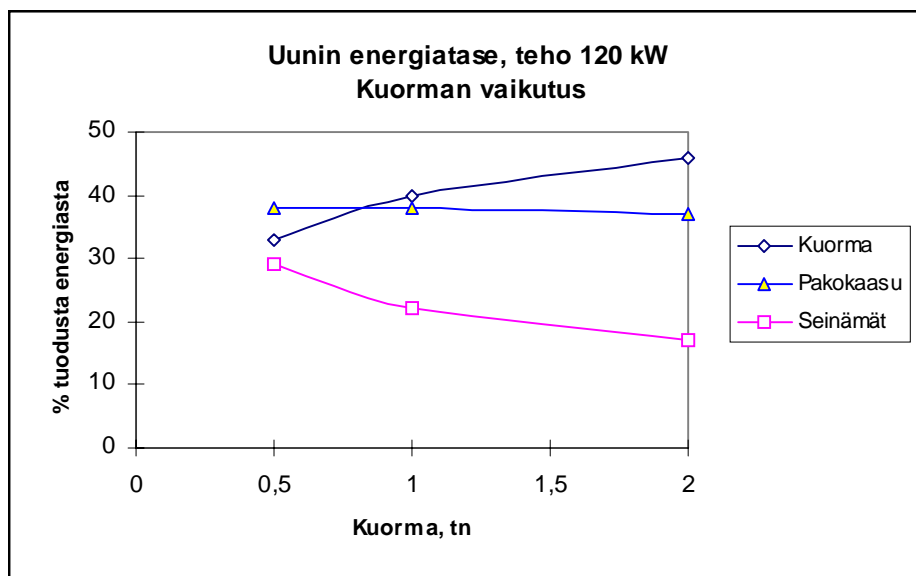
Simulointimallin oikeellisuutta testattaessa havaittiin, että simuloitu palotilan lämpötila vastasi erittäin hyvin mitattuja lämpötiloja. Tästä voidaan päätellä, että seinien kuumenemisnopeus, joka riippuu lämmönjohtavuudesta ja lämpökapasiteetista, vastaa keskimäärin hyvin todellisia arvoja.

Parametritarkasteluilla osoitettiin, että kuitueristeen lämmönjohtavuuden voimakkaalla lämpötilariippuvuudella on käytännön merkitystä: Eristekerroksen lämpötila alenee sisäpuoliskolla loivasti, esimerkiksi 150 mm matkalla 1 300 °C:sta 900°C:seen, mutta lähellä ulkopintaa vastaava 400 °C:n alenema saavutetaan 30 mm eristekerroksella. Myös eristeiden väliset erot on otettava huomioon: eristekerroksen puolivälissä voi lämpötilaero olla yli sata astetta. Hyvä eristyskyky matalissa lämpötiloissa ja suuri lämpötilagradientti lähellä uunin ulkopintaa alentavat uunin pintalämpötilaa tehokkaasti. Pintalämpötilan aleneminen eristekerrosten ansiosta 120 °C:sta kymmenellä asteella vähentää lämpöhäviötehoa 20 %, kun uuni toimii 1 200 °C lämpötilassa.

Analyttisesti ja simulointien avulla arvioitiin pintojen lämmönsiirtokertoimien ja eristeen lämmönjohtavuuden vaikutusta koeuunin seinämän läpi tapahtuvaan kokonaislämmönsiirtoon. Havaittiin, että lämpöhäviöt seinän läpi koeuunissa riippuvat pääasiassa eristeen ominaisuuksista ja paksuudesta. Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin on vain pieni vaikutus lämpöhäviöön. Sen sijaan ulkopinnan lämpötilaan lämmönsiirtokerroin vaikuttaa tuntuvasti: hyvät olosuhteet lämmönsiirtymiselle pinnasta ilmaan alentavat tehokkaasti ulkopinnan lämpötilaa.

Teollisuusuunien simuloinnilla tutkittiin lämpökäsittelyuunien erilaisten parametrien vaikutusta kuumennukseen käytettävän energian kulutukseen. Tarkasteltuja parametreja ovat uunin koko, uunin kuormitusaste ja lämmitysteho. Uunin käytölle laskettiin kuumennushyötysuhde, seinien kautta tapahtuva lämpöhäviö ja savukaasulämpöhäviö. Kuumennushyötysuhde on kuormaan menevän lämpöenergian suhde käytettyyn kokonaispalamisenergiaan, kun kappale saatetaan 1 000 °C lämpötilaan ja pidetään siinä noin tunnin ajan.

Kuvassa 67 esitetään, kuinka uunin kuormitusaste vaikuttaa energiataseisiin polttoaineella lämmitetyssä uunissa. Savukaasujen mukana poistuva lämpöhäviö pysyy lähes vakiona ja on 35 -38 % tuodusta energiasta. Kappaleen kuumennushyötysuhde kasvaa olennaisesti kuormitusasteen kasvaessa ja lämpöenergialle voidaan saavuttaa yli 45 % hyötysuhde. Vastaavasti eristyshäviöiden osuus pienenee kuormitusasteen kasvaessa. Eristyshäviöissä päästää parhaimmillaan alle 20 %:iin.

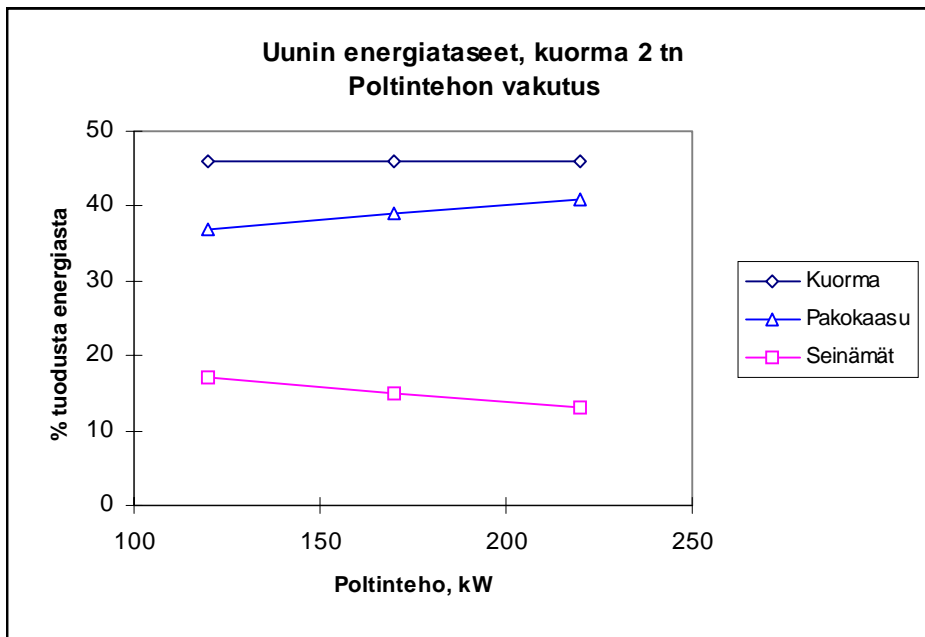


Kuva 67. Kuormituksen vaikutus uunin energiataseisiin.

Käyttäen simuloinneissa pienehköä uunia ja samankokoista kuormaa tutkittiin kuumennustehon vaikutusta energiataseisiin (kuva 68). Kuumennustehoa suurentamalla voidaan pienentää kuumennusaikaa ja eristyshäviöiden osuutta. Kuten nähdään, ei simuloinneilla



saatu eroja kuumennushyötysuhteeseen käytettäessä erisuuruisia kuumennustehoja. Hyötysuhde on noin 46 % kaikilla tehoilla. Todellisuudessa konvektiivinen lämmönsiirto paranee jonkin verran tehon kasvaessa ja näin myös kuumennushyötysuhde. Eristyshäviöt ja savukaasuhäviöt kompensoivat toisensa eli tehon kasvaessa savukaasuhäviöt kasvavat ja eristyshäviöt pienenevät.



Kuva 68. *Poltintehon vaikutus uunin energiataseisiin.*

Suomessa teollisuusuuneja käytetään ja korkealämpötilan kestäviä eristeitä tarvitaan lukumääräisesti eniten metalliteollisuuden lämpökäsittelyissä, mutta myös muilla teollisuuden aloilla, kuten petrokemian- ja kemianteollisuudessa, keramiikka- ja lasiteollisuudessa sekä rakennusteollisuudessa tarvitaan korkeita lämpötiloja, ylimmillään 1 700 °C, ja lämpökäsittelyvaihe eristetään ympäristöstään kuumankestävillä eristeillä.

Jo tällä hetkellä keraamisia kuitueristeitä käytetään yleisesti lämpökäsittelyuuneissa niiden lukuisten käyttöön liittyvien etujen, kuten hyvän lämpötilanvaihteluiden kestävyys, keveyden, helpon asennettavuuden ja huollettavuuden, vuoksi. Kehittyvien työmenetelmien ja rakennusratkaisujen ansiosta kuitueristeiden käytön voidaan arvioida entisestään kasvavan. Jos tuotantoprosessi edellyttää lämpökäsittelyvaiheessa erityistä mekaanista tai tiettyä kemiallista kestävyttä eristeeltä, ei kuitueristeitä kuitenkaan voida käyttää. Energiateollisuudessa ei toistaiseksi juurikaan ole hyödynnetty kuitueristeitä. Kuitenkin voimalaitos- ja eräissä lämmityskattiloissa on osia, lähinnä tulipesässä ja savukaasukanavissa, joiden seinämät voisivat olla eristykseltään kevytrakenteisia, ja näin kuitueristeellä saavutettaisiin edullisimpia rakenteita valmistaa ja huoltaa. Kuitenkin on varmistettava, että kuitueristeille on sopivat olosuhteet savukaasujen puolelta.

## Lähdeluettelo

Arnold, F., Heuer, V. & Walter, G. 1996. Zur Wirkung von Strömungsbeanspruchungen auf die Beständigkeit von Faserbauteilen in Industrieöfen. *Gaswärme International*, 45/6, s. 285 - 289.

Bhattacharya, AK., Ahuja, AK., Dasgupta, AK. & Chatterjee, KC. 1996. Application of ceramic fibre in steel plant furnaces for energy conservation. *SEAISI, Quarterly January*, s. 67 - 74.

Carborundum. 1998. Carbowool, esitteet. Carborundum, *Insulation Technology*.

Crowley, M. S. 1989. Heat transfer in ceramic fiber systems. Teoksessa: Trostel, L.J. *Proceedings, Unitecr 89, Anaheim, Nov 1989*. S. 1354 - 1366.

Deren, G. 1995. Refractory-Ceramic-Fibre furnace linings. *American Ceramic Society Bulletin*, 74/5, s. 65 - 68.

Dietrichs, P. & Krönert, W. 1981. Einfluss unterschiedlicher Gasatmosphären auf keramische Faserwerkstoffe. XXIV Internationales Feuerfest-Kolloquium, Aachen 24. September 1981. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule. S. 109 - 173.

Dinwoodie, J. 1996. Saffil alumina fiber: Manufacture, properties and application in high temperature furnaces. *Canadian ceramics quarterly*, 65/1, s. 23 - 29.

Elstner, I. & Jeschke, P. 1987. Hochtemperaturwärmedämmstoffe. II Deutsch-Französische Tagung über Technische Keramik. Aachen 4 - 6 März 1987. Aachen: Institut für Gesteinshuttenkunde. S. 202 - 239.

Elstner, I., Eschner, A. & Nebe, U. 1996. Calcium aluminate wool. A new fibre for high temperature thermal insulation - a healthy solution for up to 1250 °C. *Unitecr '95 Congr.* 3. S. 427 - 431.

Fuehres, M. 1995. Hochtemperaturwärmeisolierung. *Isoliertechnik*, 6, s. 8 - 29.

Ganz, R. 1982. Untersuchungen zur Anwendungsgrenztemperatur von keramischen Hoch-temperaturfasern des Systems Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule. 125 s. (Dissertation.)

Horie, E. 1987. *Ceramic fibre insulation. Theory and Practice*. Tokyo: The Energy Conservation Center. 149 s.

- Hänninen, T. 1999. Suullinen tiedonanto. Ensto Ceramics Oy Ab.
- Laine, M. 1999. Suullinen tiedonanto. Optiroc Oy.
- Laitinen, K. 1989. Metalliteollisuuden uunit. Kuitueristeiden käyttö. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 51 s. + liitt. 47 s. (VTT Tutkimuksia 581.)
- MET. 1997. Lämpökäsittelyn resurssit 1997. Tilastokansio. Metalliteollisuuden keskusliitto.
- Noll, W. 1974. Asbest. Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie. 4. Neuarbeitete und erweiterte Auflage. Weinheim: Verlag Chemie, Band 8, s. 67 - 79.
- Nurmi, H. 1985. Käyttökokemuksia Ovako-Dalsbrukin teelmäunin "tapetoinnista". Eristepäivät, Eristysmateriaalit korkealämpötilauuneissa, 11. - 12.12.1985. Metallurgian kannatusyhdistys ry (MEKA). 7 s.
- Nyström, K. 1999. Suullinen tiedonanto. IDO Kylpyhuone Oy.
- Paroc 1998. Tuote-esite. Partek Paroc Oy Ab
- Petzold, A. & Ulbricht, J. 1991. Aluminiumoxid, Rohstoff - Werkstoff - Werkstoffkomponente. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH. 284 s. ISBN 3-342-00532-7.
- Ryti, H. 1973. Säteilylämmönsiirto. Tekniikan käsikirja 1. 8. p. Jyväskylä: Gummerus. 417 s. ISBN 951-20-0250-7
- Salmi, J. 1993. Kuituvuorausten kestävyys polttoainelämmitteisissä teollisuusuuneissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 49 s. + liitt. 11 s. (VTT Julkaisuja 784.)
- Schupp, M. 1981. Eigenschaften und Anwendungen keramischer Fasern bis etwa 1 200 °C Anwendungstemperatur. Teil 1. Gas-Wärme international, Band 30, Heft 7/8.
- Thermal Ceramics. 1998. Tuote-esite.
- Traupe, A. 1995. Vom Asbest zur kunstlichen Mineralfaser. Risiken und Schutzmassnahmen. VGB Kraftwerktechnik, 75/3, s. 209 - 214.
- Virta, V. 1999. Suullinen tiedonanto. Pukkila Oy.

**Liite A:**  
**Keraamiset kuitueristeet, Koeuuni**  
**Rakenteisiin ja rakentamiseen liittyvät valokuvat**



*Kuva 1. Koeuuni ulkoapäin, oikea seinä ja luukkuseinä.*



*Kuva 2. Koeuuni ulkoapäin, vasen seinä ja luukkuseinä.*



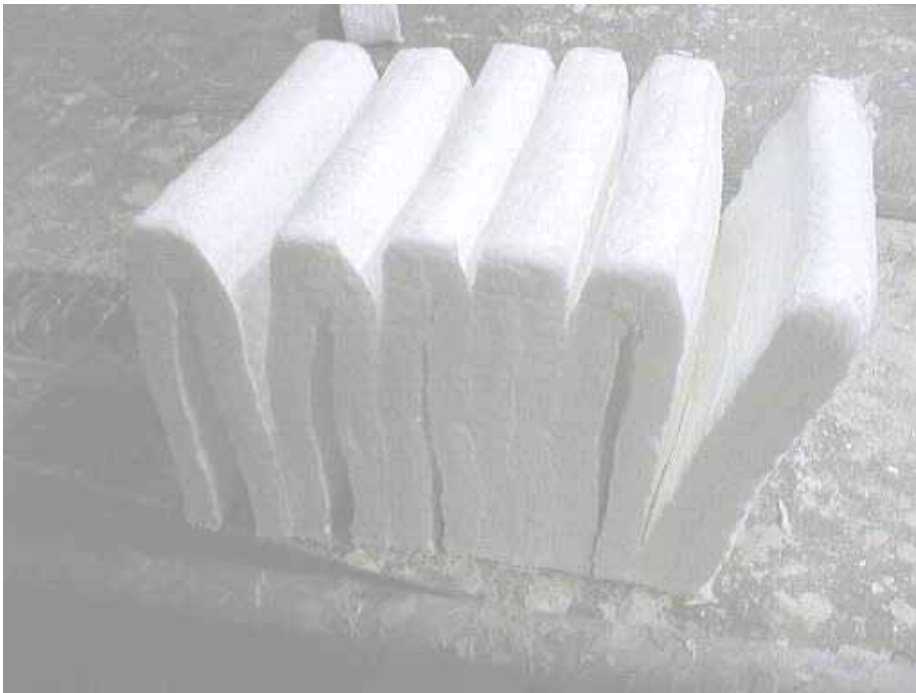
*Kuva 3. Pyrobloc-moduuli ja sen kiinnitysosat.*



*Kuva 4. Prismobloc-seinää rakennusvaiheessa.*



*Kuva 5. Termoelementtilankoja Pyrobloc-moduulien pinnassa.*



*Kuva 6. Prismobloc-moduuli avattuna (vanhempi toimituserä).*



*Kuva 7. Taustaeristeen asennusta.*



*Kuva 8. Eristekerroksia taustaeristeessä.*



*Kuva 9. Katon kerrosrakenteita.*



*Kuva 10. Liimarakenteita vasemmassa seinässä.*



*Kuva 11. Luukun yläosaa, sähkövastusten kiinnitysjärjestelmä.*





*Kuva 12. Pinnoitteen ruiskutusta.*



*Kuva 13. Yleiskuva uunin sisätiloista (ennen pinnoitusta ja testiajoja).*

**Liite B:**  
**Kuitueristeet korkealämpötiloissa**  
**Valokuvia koeuunista testien aikana**



*Kuva 1. Poltinseinä sen jälkeen, kun uuni oli käynyt ensimmäisen kerran lähellä 1 300 °C:ta. Vasemmalla Pyrobloc-moduulit, oikealla Prismoblocit. Selkeimmin havaittava särö on vasemmalla puolella noin polttimen ja vasemman seinän puolivälissä oleva pystysuora särö. Muut säröt ovat vielä melko vähäisiä. Vaakasuorat säröt näkyvät kuvassa ”liian selvästi”, mahdollisesti valaistussyistä.*



*Kuva 2. Uunin sisäosaa kahden lyhyen koeajoyritteen jälkeen, kun uuni oli käynyt kaksi kertaa muutaman tunnin ajan 1 300 °C:n seutuvilla. Oikean seinän vasemmalla puolella on selkeitä säröjä näkyvissä. Katon läpi työnnetyn termoelementin suojaputket ovat katkenneet ja tipahtaneet.*



*Kuva 3. Poltinseinän vasen puolin noin viikon katkonaisen koeajojakson jälkeen. Pystysuora särö Pyrobloc-moduulien välissä on kasvanut silmiinpistäväksi isoksi. Myös vaakasuorat säröt ovat kohtalaisia.*



*Kuva 4. Oikean seinän oikean puoleista reunaa, Prismobloc-moduuleja, noin viikon katkonaisen koeajojakson jälkeen. Kuvassa on pystysuorassa iso särö kohdassa, jossa moduulien suunta muuttuu (vasemmalla huovat pystysuorassa, oikealla vaakasuorassa). Muut säröt ovat pieniä.*



*Kuva 5. Vasemman seinän keskiosan liimattua rakennetta noin viikon katkonaisen koeajojakson jälkeen. Kuvassa on havaittavissa pystysuora särö sekä joitakin vaakasuoria.*



*Kuva 6. Uunin poltinseinän, vasemman seinän ja katon välinen nurkka. Sivuseinän yläosassa on suurehko vaakasuora särö, samoin poltinseinän ja vasemman seinän välissä. Myös poltinseinän vasemman puolen pystysuora särö on näkyvissä. Katon säröt ovat pieniä*



*Kuva 7. Yleiskuva poltinseinän alaosasta kahden viikon koeajojen jälkeen 1 300 °C:ssa. Vasemman puolen pystysuora särö sekä oikeassa kulmassa oleva särö ovat todella suuria verrattuna muihin säröihin.*



*Kuva 8. Poltinseinän vasemman puolen Pyrobloc-rakenteessa oleva pystysuora särö lähikuvassa. Mittanauhan mukaan arvioituna leveys on lähes 10 mm.*



*Kuva 9. Poltinseinän ja oikean seinän kulmassa oleva iso rako lähikuvassa. Myös oikean seinän Pyrobloc-moduulien väliset säröt näkyvät hyvin.*



*Kuva 10. Oikean seinän luukun puoleista osaa, Prismobloc-rakennetta kahden viikon koeajojen jälkeen. Säröt ovat samoissa kohdin kuin aiemmin kuvassa 4.*



*Kuva 11. Vasen seinä ja vähän kattoa kahden viikon koeajojen jälkeen. Katon lähellä oleva särö on ”iso”, seinän keskellä pystysuora särö ”kohtalainen”, muut säröt pieniä.*



*Kuva 12. Vasemman seinän keskiosaa kahden viikon koeajojen jälkeen lähikuvassa.*



*Kuva 13. Etupäässä kattoa kahden viikon koeajojen jälkeen. Katossa ei ole isoja säröjä.*





*Kuva 14. Katon etuosan liimattuja rakenteita kahden viikon koeajojen jälkeen. Säröt ovat pienehköjä.*



*Kuva 15. Poltinkartio kahden viikon koeajojen jälkeen. Pinnoite on paikoin lohkeillut.*



*Kuva 16. Vasenta seinää sen jälkeen, kun uunilla on ajettu kahden viikon koeajot 1 300 °C:ssa ja otettu näytteitä. Osa näytteistä otettiin kairaamalla (oikean puoleiset pyöreät reiät), yksi veitsellä.*



*Kuva 17. Seinistä otettuja näytteitä. Pystyssä luukusta otettu näyte, josta näkyy HT900-levyn värin muuttuminen korkean lämpötilan vaikutuksesta.*



*Kuva 18. Uunin luukussa ollut vastusten kiinnitystappien kokeilu. Tapit kestivät hyvin 1 300 °C:n lämpötilassa tehdyt kokeet, mutta sulivat, kun lämpötila nostettiin 1 400 °C:seen.*



*Kuva 19. Poltinseinän vasen puoli yhden korkealämpötila-ajon (1 400 °C) jälkeen. Uusi särö on syntynyt ”puolen Pyrobloc-moduulin” verran aiemmasta säröstä oikealle, seuraavaan ”särön aihioon”.*

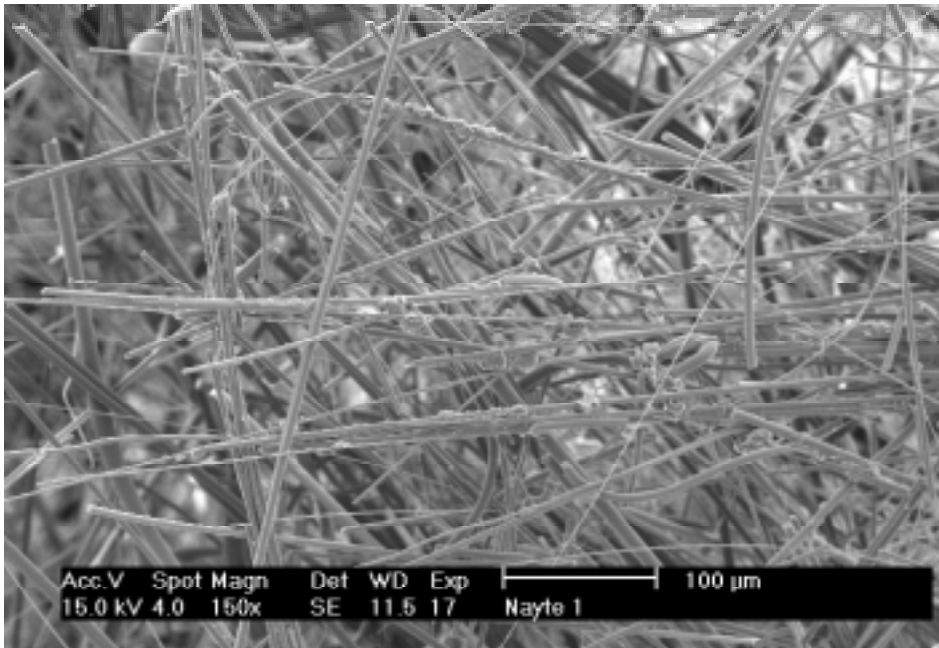


*Kuva 20. Poltinseinän ja oikean seinän välinen särjä yhden korkealämpötila-ajon (1 400 °C) jälkeen. Uusi särö on syntynyt pääasiassa yhden kuituhuovan leveyden verran aiemmasta säröstä vasemmalle.*

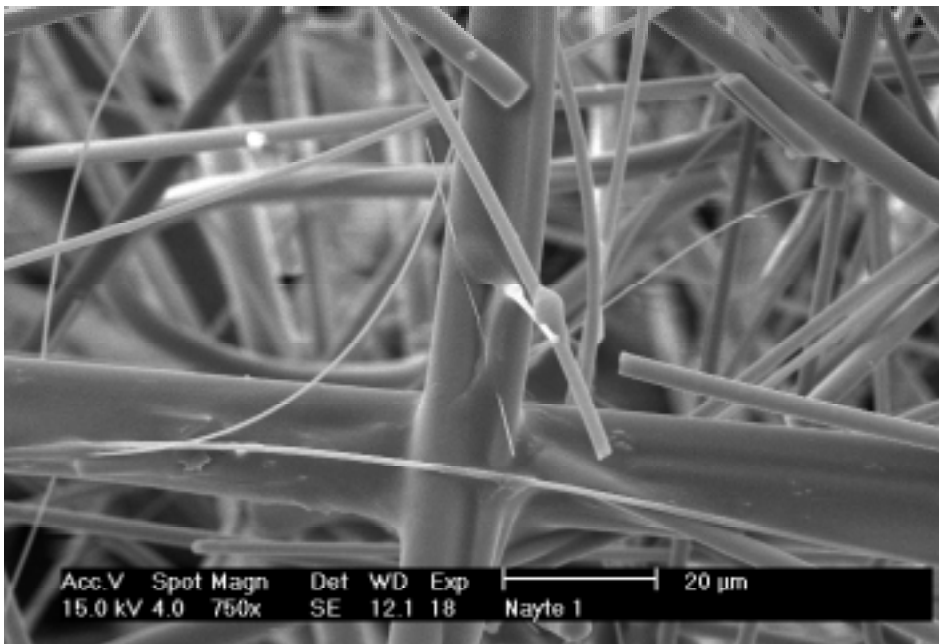


*Kuva 21. Uunin kattoa kahden ajon (yhteensä n. 12 tuntia 1 400 °C:ssa) jälkeen. Säröt ovat jonkin verran kasvaneet, ja paikatun kohdan viereen on syntynyt uusi särö.*

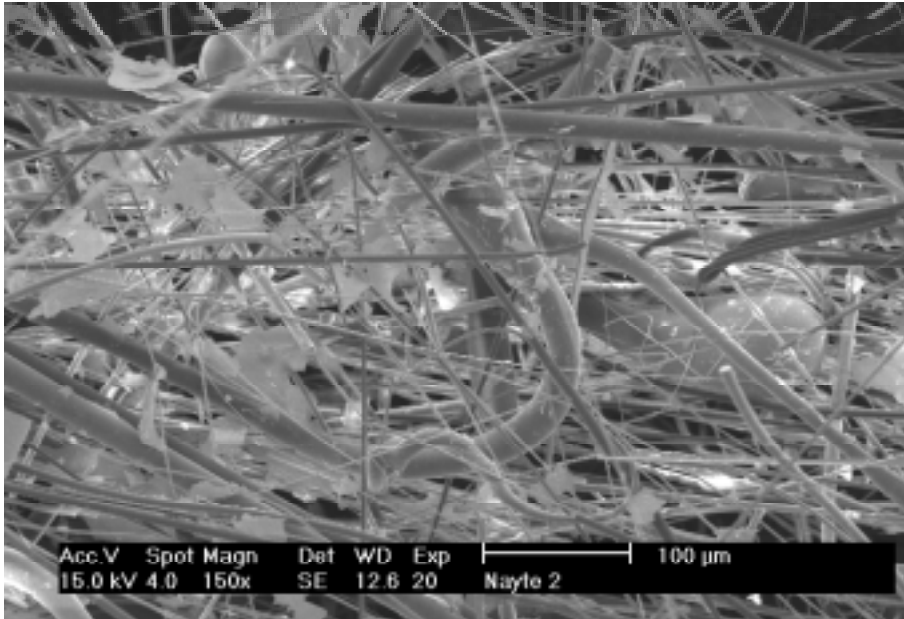
**Liite C:**  
**Kuitueristeet korkealämpötiloissa**  
**SEM-kuvasarja koeuunin eristeistä**



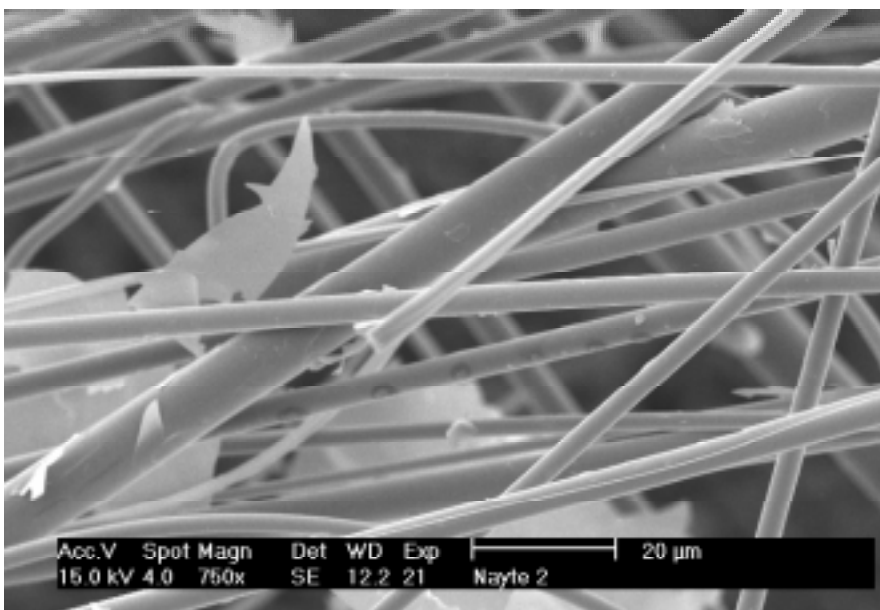
*Kuva 1.1. Aiemman toimituserän Prismobloc-moduuli ("Prismobloc, vanha") toimitus-tilaisena. Suurin osa kuiduista on suuntautunut vasemmasta ylhäältä oikealle alas, eivät kuitenkaan läheskään kaikki. Helmiä tai muita epäsäännöllisiä muodostumia vähän. 200-kertainen suurennos.*



*Kuva 1.2. Aiemman toimituserän Prismobloc-moduuli ("Prismobloc, vanha") toimitus-tilaisena. Yksityiskohta, jossa ristikkäiset kuidut ovat selvästi normaalia paksumpia. Normaalikuidun paksuudeksi voitaneen arvioida 3 - 5 mm. 1 000-kertainen suurennos.*

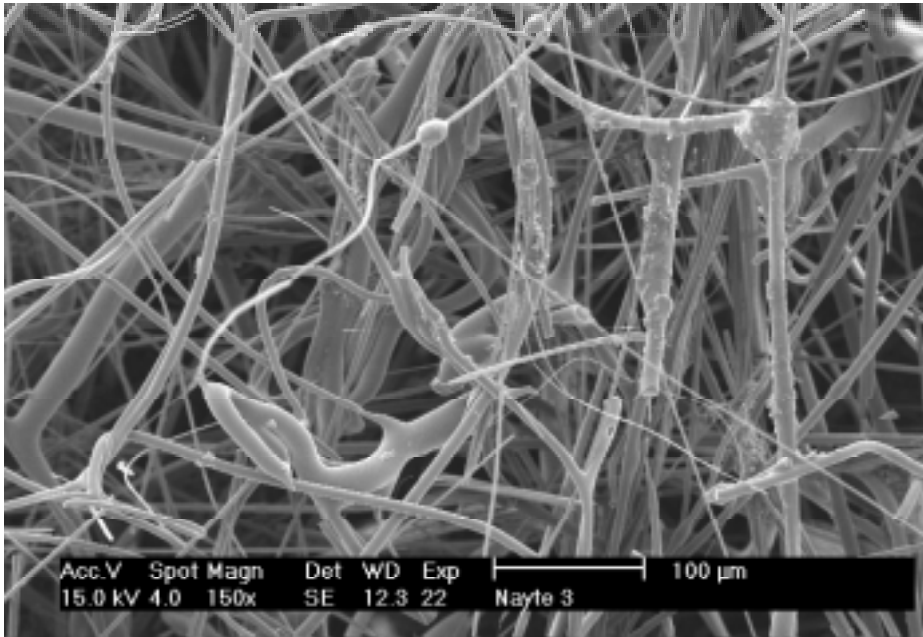


*Kuva 2.1. Pyrobloc-moduuli toimitustilaisena. Paksuja kuituja, helmiä ja sideainelvykkeitä on jonkin verran enemmän kuin edellisessä. Suunta pääasiassa vasemmalta oikealle. 200-kertainen suurennos.*

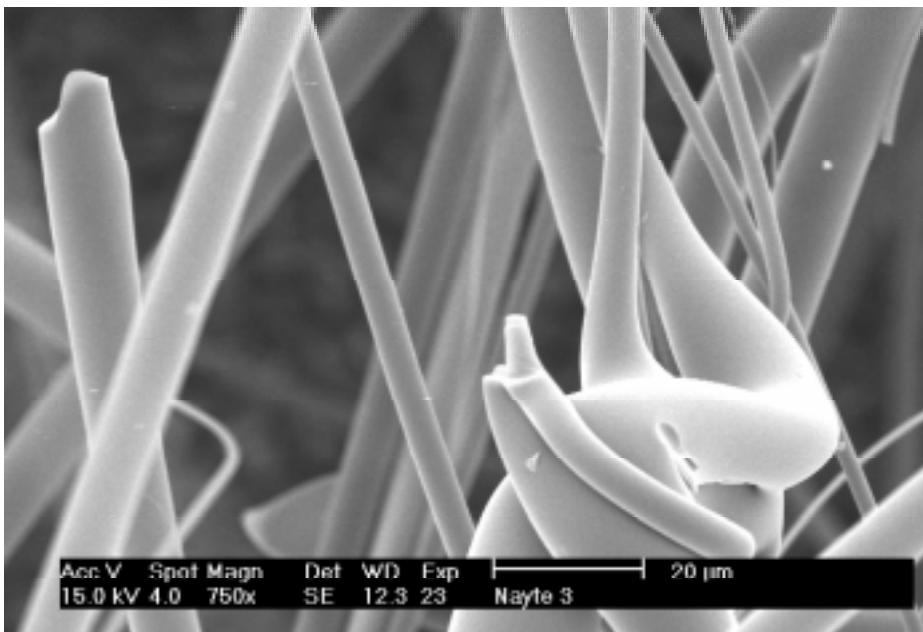


*Kuva 2.2. Pyrobloc-moduuli toimitustilaisena. Useimmat kuidut ovat paksuudeltaan arviolta 3 - 5 μm, mutta paksumpiakin on joukossa. 1 000-kertainen suurennos.*



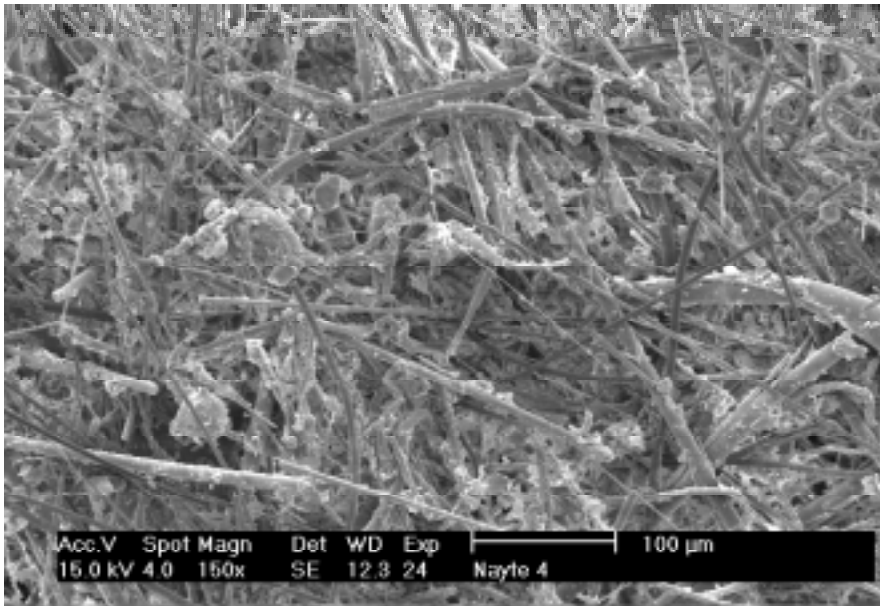


*Kuva 3.1. Uusi Prismobloc-moduuli toimitustilaisena. 200-kertainen suurennos.*



*Kuva 3.2. Uusi Prismobloc-moduuli toimitustilaisena. Pääasiassa paksummista kuiduis-  
ta koostuva yksityiskohta. 1 000-kertainen suurennos.*

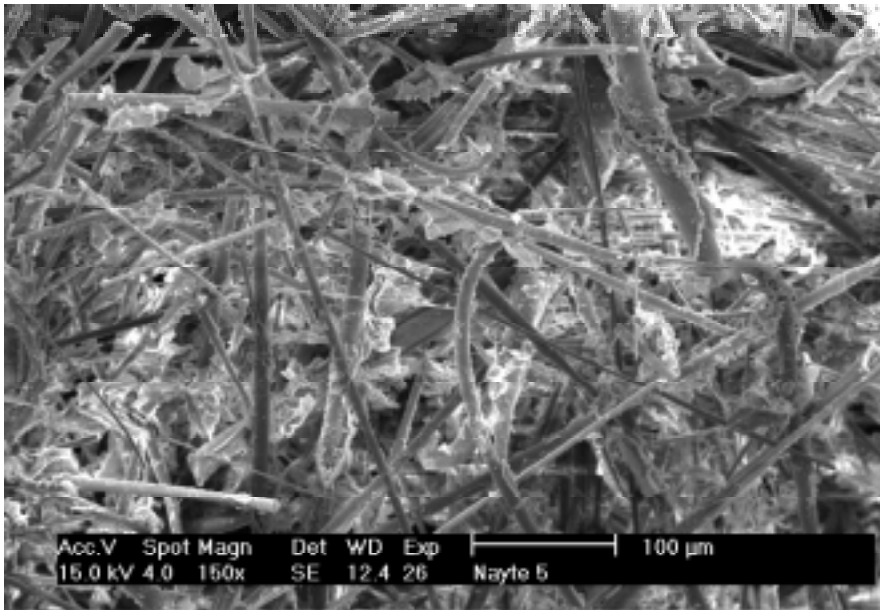




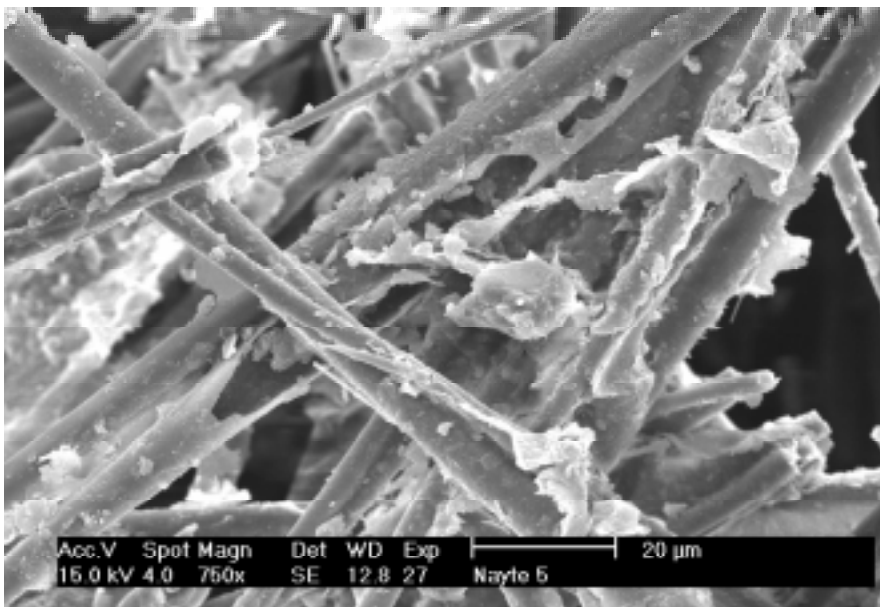
*Kuva 4.1. Ceraboard-levy toimitustilaisena. Suurimmaksi osaksi kuituja, mutta seassa on myös melkoisesti ilmeisesti sideaineesta johtuvia epäsäännöllisiä muodostumia. 200-kertainen suurennos.*



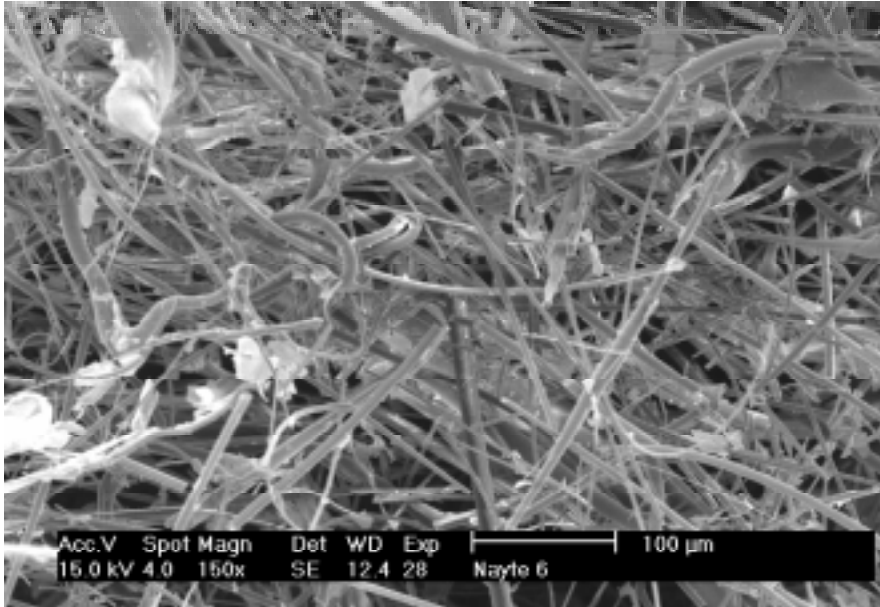
*Kuva 4.2. Ceraboard-levy toimitustilaisena. Suurimmaksi osaksi sileäpintaisia kuituja, mutta seassa on myös melkoisesti ilmeisesti sideaineesta johtuvia epäsäännöllisiä muodostumia. 1 000-kertainen suurennos.*



*Kuva 5.1. HT900-levy toimitustilaisena. Kuiturakennetta, mukana myös runsaasti epä-säännöllisiä rakenteita, ilmeisesti sideaineita. 200-kertainen suurennos.*



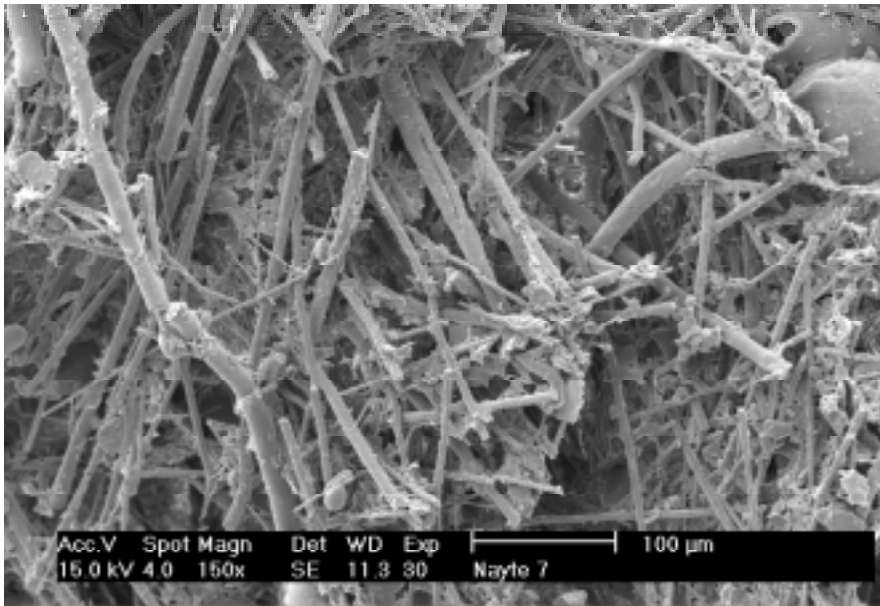
*Kuva 5.2. HT900-levy toimitustilaisena. Kuiturakennetta, mukana myös runsaasti epä-säännöllisiä rakenteita, ilmeisesti sideaineita. Kuitujen pinnat eivät ole täysin sileät (kuten esim. kuvissa 1.2, 2.2 ja 3.2). 1 000-kertainen suurennos.*



*Kuva 6.1. 1 400-laadun kuitumateriaalia koeajojen jälkeen. Kuidut ovat olleet yli kaksi viikkoa n. 1 300 °C:ssa. Kuidut ovat lähes vahingoittumattoman näköisiä! (vertailukohteita esim. kuvat 1.1, 2.1 ja 3.1). 200-kertainen suurennos.*



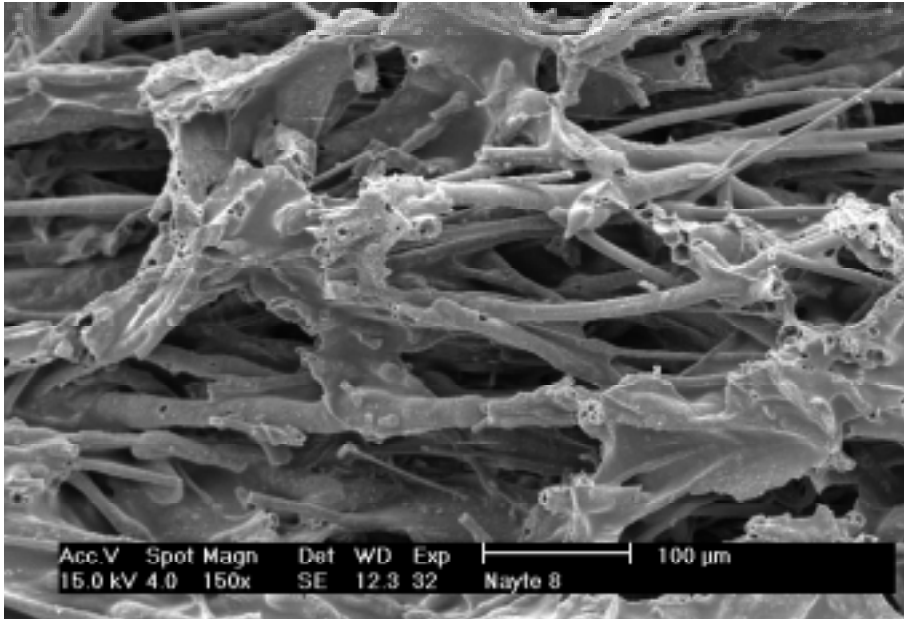
*Kuva 6.2. 1 400-laadun kuitumateriaalia koeajojen jälkeen. Kuidut ovat olleen yli kaksi viikkoa n. 1 300 °C:ssa. Kuidut ovat lähes vahingoittumattoman näköisiä! Pinnassa on joitakin epätasaisia kohtia. Näitä on kuitenkin niin vähän, että esimerkiksi kiteytymisestä tai yhteensintrautumisesta ei voi tehdä johtopäätöksiä (vertailukohteita esim. kuvat 1.2, 2.2 ja 3.2). 1 000-kertainen suurennos.*



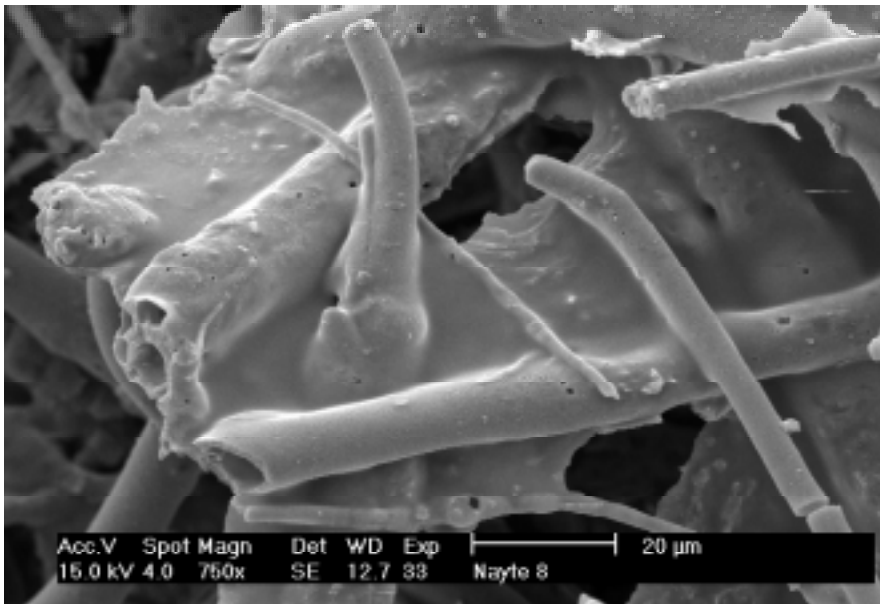
*Kuva 7.1. Ceraboard 1100 -levy kahden viikon koeajojen jälkeen. 200-kertaisessa suurennoksessa ei näy selviä eroja toimitustilaiseen tuotteeseen (kuva 4.1) verrattuna.*



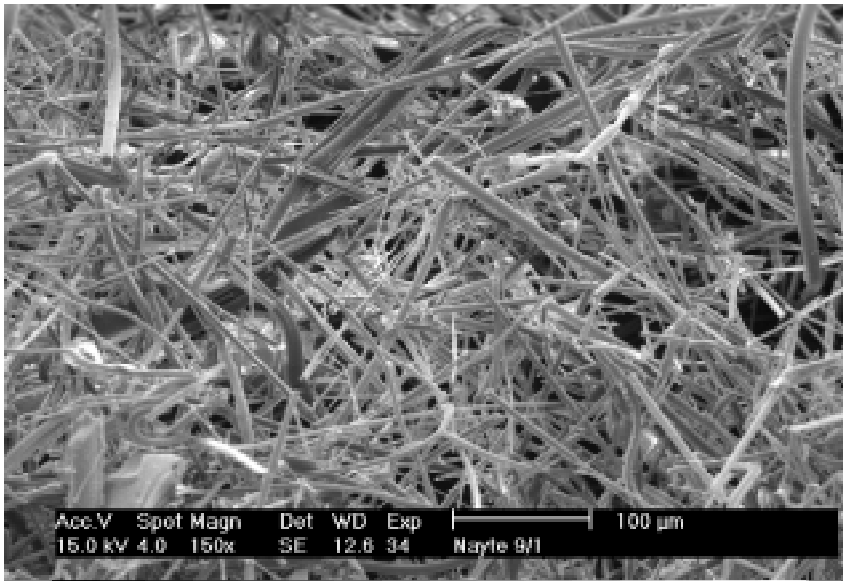
*Kuva 7.2. Ceraboard 1100 -levy kahden viikon koeajojen jälkeen. Kuitujen pinta saattaa olla hieman ”kärsinyt” verrattuna kuvan 4.2 kuitupintoihin. Mahdollista kiteen kasvua ei voi selvästi kuitenkaan nähdä. ”Sideainelevykeitä” on runsaasti molemmissa kuvissa ja ne haittaavat arviointia. 1 000-kertainen suurennos.*



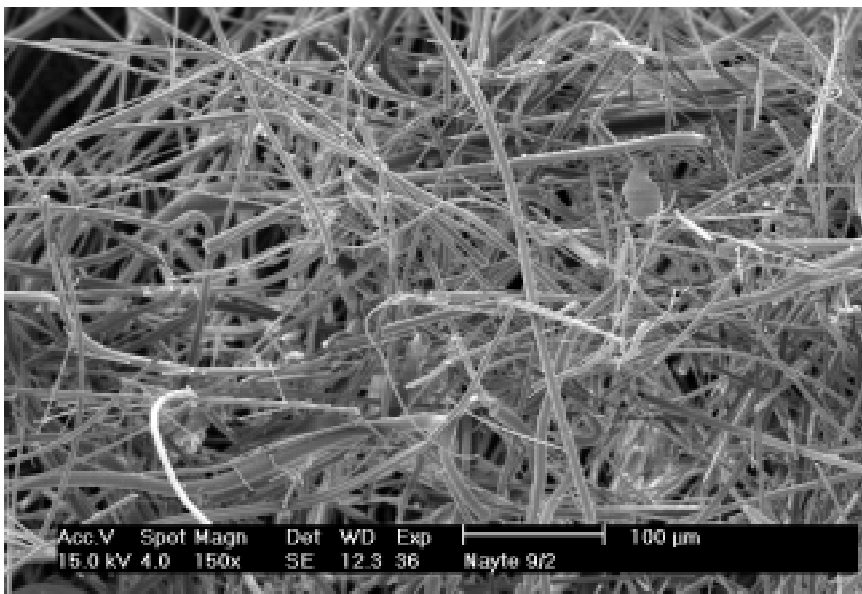
*Kuva 8.1. Parocin HT900-levy, joka on ollut kuitueristeen sisäosissa yli kaksi viikkoa noin 800 °C:n lämpötilassa. Rakenne on etupäässä kuiturakennetta, mutta kuitujen ja sideainelevykytteitten kasvua ja yhteensintrautumista on selvästi havaittavissa. 200-kertainen suurennos.*



*Kuva 8.2. Parocin HT900-levy, joka on ollut kuitueristeen sisäosissa yli kaksi viikkoa noin 800 °C:n lämpötilassa. Selkeästi sintrautunut yksityiskohta. 1 000-kertainen suurennos.*

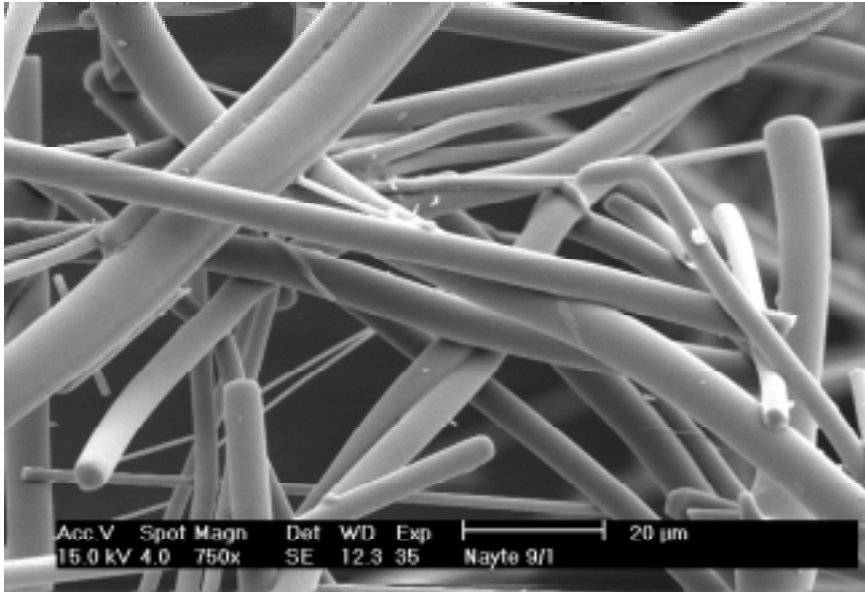


*Kuva 9.1.1.*

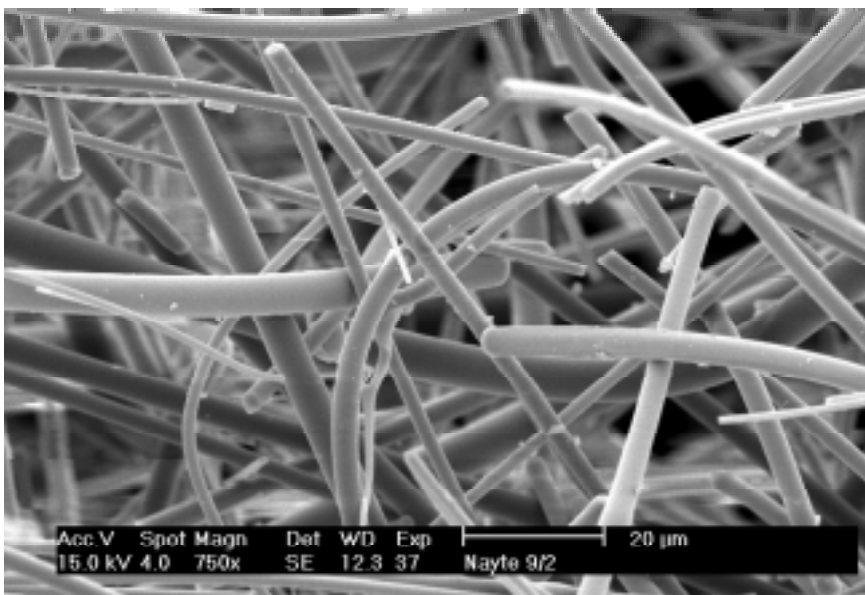


*Kuva 9.1.2.*

*Kuvat 9.1.1 ja 9.1.2. Kuitueristettä liimasauman molemmin puolin kahden viikon koe-  
ajojen jälkeen. Molemmat rakenteet muistuttavat toimitustilaista (kuvat 1.1, 2.1 ja 3.1)  
eikä keskinäistä eroa ole havaittavissa. 200-kertaiset suurennokset.*



*Kuva 9.2.1.*



*Kuva 9.2.2.*

*Kuvat 9.2.1 ja 9.2.2. Kuitueristettä liimasauman molemmin puolin kahden viikon koe-  
ajojen jälkeen. Rakenteet muistuttavat toimitustilaisia (kuvat 1.2, 2.2 ja 3.2) eikä pinnan  
laadussakaan ole eroa havaittavissa. Kuvan 9.2.1 kuidut saattavat olla hieman paksum-  
pia ja myös pari yhteensintrautunutta kuitua on näkyvissä. 1 000-kertaiset suurennok-  
set.*