

# SUPERISOLERENDE MATERIALEN IN PREFAB ELEMENTEN

PRO<sup>3</sup> - IWT-TETRA 150144, Werkpakket 2  
September 2017

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur  
Vakgroep Architectuur en stedenbouw  
Onderzoeksgroep Bouwfysica, constructie en klimaatbeheersing

E katrien.maroy@ugent.be  
T +32 09 264 32 48

Technicum B4  
Sint Pietersnieuwstraat 41, 9000 Gent

[www.ugent.be](http://www.ugent.be)

# INHOUDSOPGAVE

<b>Inhoudsopgave</b>	<b>2</b>
<b>1 Potentieel</b>	<b>3</b>
<b>2 Vacuüm Isolatie Panelen</b>	<b>3</b>
2.1 Beschrijving	3
2.2 Voorbeelden van systemen met VIP's	4
2.3 VIP'S in prefab renovatie	6
2.4 Aandachtspunten bij integratie in een prefab element	7
<b>3 Aerogel</b>	<b>9</b>
3.1 Beschrijving en eigenschappen	9
3.2 Integratie in andere materialen	10
3.3 Aandachtspunten	12
<b>4 Bibliografie</b>	<b>12</b>

# 1 POTENTIEEL

Superisolerende materialen zoals vacuüm isolatie panelen (VIP) en aerogels beschikken over een zeer lage thermische geleidbaarheid, waardoor hoge R-waardes kunnen bereikt worden met een dunne laag van het materiaal (Tabel 1). Voor prefab renovatie kunnen deze materialen een oplossing bieden als de dikte van het prefab paneel moet beperkt worden bv. indien de rooilijn van een gebouw slechts beperkt mag overschreden worden, of als er HVAC-kanalen in het paneel geïntegreerd zijn.

**Tabel 1 Rekenvoorbeeld: Welke diktes zijn er nodig om een U-waarde van 0.24 W/m<sup>2</sup>K te halen?**

Materiaal	Warmtegeleidbaarheid ( $\lambda$ , [W/mK])	dikte (d, [cm])
Vacuüm isolatie paneel (VIP)	0,007	2,9
Aerogel	0,014	5,4
Polyurethaan	0,026-0,035	10,8 – 14,5
Minerale wol (dekens)	0,038-0,043	15,8-17,8

Op de markt bestaan verschillende aanbieders van superisolerende materialen. Zo brengen fabrikanten als Promat vacuüm isolatie panelen op de markt om in vloersystemen te gebruiken (Figuur 1a), maar bv. ook in panelen voor gordijngesvels (Figuur 1b). DowCorning heeft recent een flexibel deken met aerogels ontwikkeld dat kan geplaatst worden in aansluitingen tussen vloeren en wanden of tussen schrijnwerk en wanden zodat de koudebrug beperkt wordt (Figuur 1c).



**Figuur 1 (a) VIP-paneel in een vloer-constructie (Promat) (b) VIP paneel in de opake delen van een gordijngesvel (Promat) (c) Gebruik van een flexibele aerogelstrip in de aansluiting van een metalen zonnepaneel aan de gevel (DowCorning).**

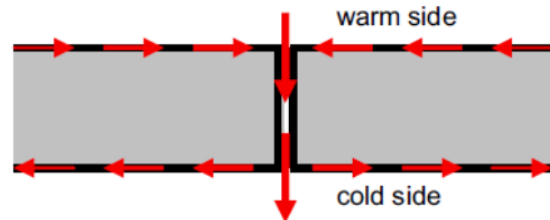
## 2 VACUÛM ISOLATIE PANELEN

### 2.1 Beschrijving

Een vacuüm isolatie paneel (VIP) bestaat uit een poreus kernmateriaal, pyrogeen silicium, dat vacuüm getrokken wordt en ingepakt wordt in een lucht- en dampdichte folie. Het kernmateriaal biedt niet alleen een thermische weerstand, maar vangt ook het drukverschil op dat gegenereerd wordt door de folie vacuüm te trekken tegen het kernmateriaal.

De initiële thermische geleidbaarheid van de kern ligt rond de 0,004 W/mK. Deze kan na een lange tijd echter stijgen naar 0.007 W/mK door lucht- en vochtdiffusie doorheen de folie (zie 2.4.2) (Kalnaes, 2014). Daarom wordt die laatste waarde ook meestal vermeld op technische fiches. Door het vacuüm wordt warmteconductie via gas bijna geëlimineerd. Daarnaast wordt ook convectie uitgesloten doordat het kernmateriaal zeer kleine poriën heeft.

VIP's zijn een fragiel isolatiemateriaal. Bij lekkage in de omhullende folie kan het vacuüm niet behouden worden waardoor de thermische geleidbaarheid zal stijgen naar de grootteorde van de klassieke isolatiematerialen. Daarnaast is er altijd een koudebrugwerking aan de randen en hoeken van het VIP (Figuur 2). De totale thermische prestaties van het paneel zijn dus altijd kleiner dan de thermische prestaties in het midden van het paneel. De impact van deze koudebrugwerking is afhankelijk van de dikte van de folie en de paneelafmetingen. Hoe groter het paneel, hoe kleiner dit koudebrug effect zal zijn (IEA/ECBCS Annex 39, 2005).



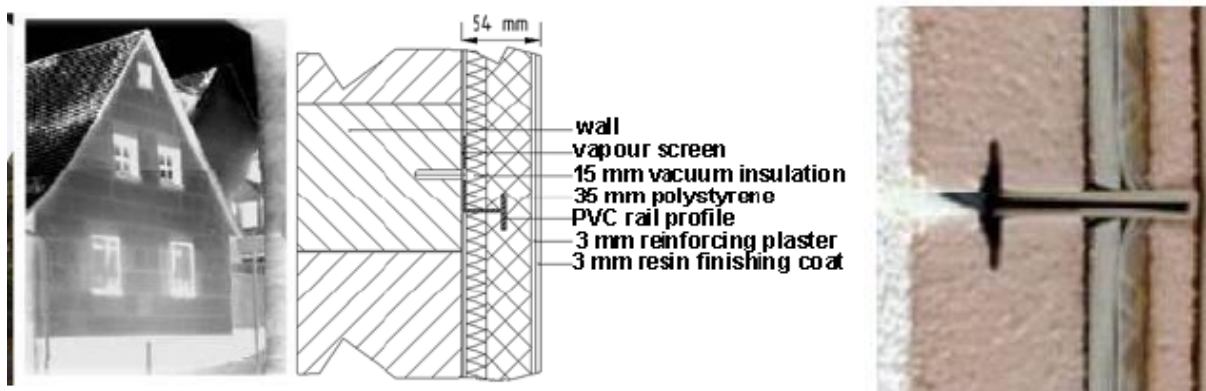
**Figuur 2 Koudebrugwerking aan de randen van het VIP paneel (IEA/ECBCS Annex 39, 2005)**

De folie zelf bestaat uit een dichtende laag, een sluitende laag en een beschermende laag. De dichtende laag zit aan de binnenkant om het kernmateriaal te verzegelen. Deze laag bestaat uit polyethyleen van lage of hoge dichtheid. De middelste en de sluitende laag bestaat uit aluminium folie en/of gelamineerde lagen. Deze laag verhindert de penetratie van waterdamp en lucht doorheen de folie en beschermt het kernmateriaal tegen weersinvloeden en handelingen die schade kunnen toebrengen (IEA/ECBCS Annex 39, 2005).

## 2.2 Voorbeelden van systemen met VIP's

### 2.2.1 Railsysteem in PVC of aluminium

Indien de VIP's als een traditioneel isolatiemateriaal worden gebruikt, worden doorgaans railsystemen of profielen gebruikt om de VIP's te bevestigen aan de wand (Figuur 3). Om de koudebrugwerking van die rails te verminderen en de VIP's te beschermen, wordt typisch nog een laag EPS of PUR over de VIP's aangebracht (Johansson, 2012) (IEA/ECBCS Annex 39, 2005) (Figuur 3, Figuur 4). Op die manier blijft het isolatiepakket echter relatief dik en wordt het potentieel van VIP-panels niet ten volle benut.



**Figuur 3 Gevel uit Nuremburg (2000) met PVC-rail systeem (IEA/ECBCS Annex 39, 2005)**



**Figuur 4 Gevel in Karlsruhe (2010): bevestiging VIP's met aluminium rail. Aan de buitenzijde van de VIP-laag werd nog een EPS-laag van 25 cm voorzien (Johansson, 2012).**

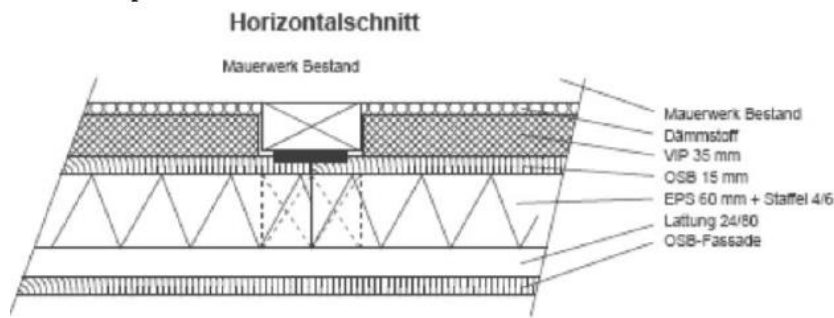
Er kan ook een stap verder gegaan worden door het VIP te integreren in geprefabriceerde gevelelementen. In 2006 werden in Hofheim houten prefab elementen met VIP's gebruikt waarbij de ankers, zwelbanden en aluminium profielen voor de gevelafwerking tijdens de prefabricatie bevestigd waren op het paneel. De ramen werden ook op voorhand geïntegreerd om de kans op schade aan de VIP's te voorkomen (Figuur 4) (BINE, 2008).



**Figuur 5 VIP's in een houten stijl- en regelwerk met geïntegreerd schrijnwerk (BINE, 2008)**

## 2.2.2 Houten prefab gevelelementen

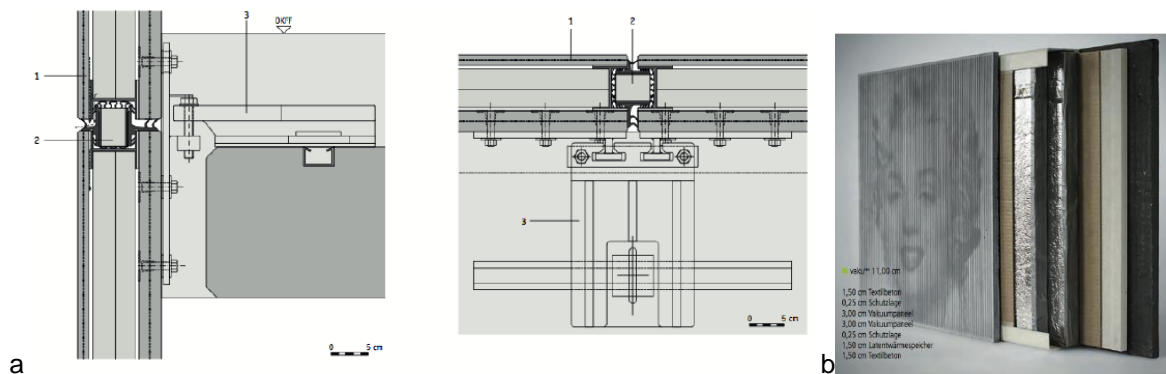
In SchleiBheim werd in 2008 een woning gerenoveerd met houten prefab gevelelementen met geïntegreerde VIP's (Panic, 2009)(Figuur 6). De VIP laag was 35 mm dik en werd verlijmd aan een OSB-plaat. Daarvoor was een houten frame aangebracht, opgevuld met steenwol met een dikte van 60 mm. Aan de binnenzijde (tussen de VIP en de bestaande gevel) werd een beschermde folie aangebracht (Panic, 2009).



Figuur 6 VIP-paneel geïntegreerd in een prefab gevelelement. (Panic, 2009)

### 2.2.3 Betonelementen

VIP's kunnen ook geïntegreerd worden in betonnen elementen. In Leipzig werd een gordijngesysteem ontwikkeld met vezelversterkt beton en VIP's. Met vezelversterkt beton kunnen zeer lichte (tot 100 kg/m<sup>3</sup>) en dunne elementen (10-30 mm) geproduceerd worden. De carbon- en glasvezels in het beton zijn bestand tegen corrosie. Het paneel met VIP's (Figuur 7a) bestaat uit een binnen- en buitenblad in vezelversterkt beton, met binnen twee VIP-panelen. Met een dubbele laag VIP's is de thermische prestatie meer verzekerd dan met een enkele dikke laag. Mocht het ene VIP-paneel beschadigd raken, kan het tweede VIP-paneel de impact op de thermische prestaties nog beperken. De panelen zijn verbonden door een profiel in glasvezelversterkte polypropyleen. Een voordeel van dit systeem is dat de VIP's optimaal beschermd zitten door het vezelversterkt beton, een nadeel bij deze uitvoering zijn echter de ankers tussen de panelen die punkoudebruggen vormen. Deze hebben een vrij grote impact gezien de hoge thermische prestatie van de VIP's (Hülsmeier, 2012).

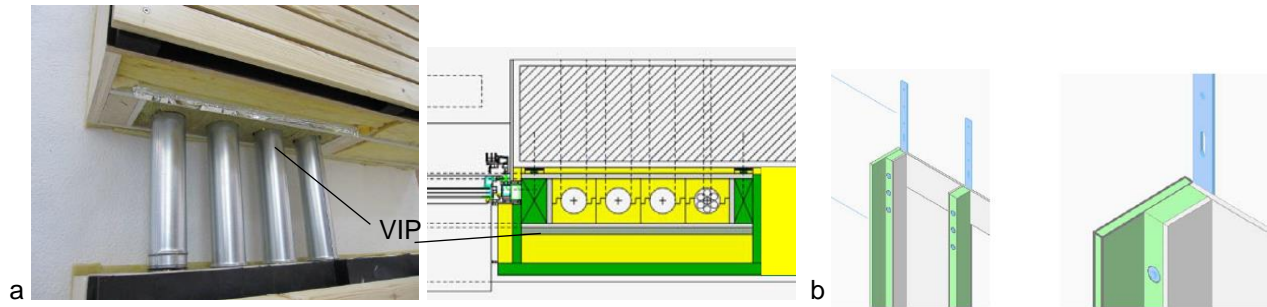


Figuur 7 (a) Systeem met verankering in de voeg tussen twee VIPpanelen. (b) Integratie van een VIP paneel tussen twee bladen uit textielbeton (Hülsmeier, 2012)

## 2.3 VIP'S in prefab renovatie

In de bestaande onderzoeksprojecten rond prefab renovatie komt de toepassing van VIP's slechts beperkt aan bod. In Annex 50 werd een raammodule ontworpen, waar VIP's van 20 mm dik werden geplaatst ter hoogte van de ventilatiekanalen. Op die manier wordt de impact van de koudebruggen door de kanalen beperkt. Door de VIP's was het mogelijk om de dikte van de hele module te beperken tot 320mm.

Omdat dit VIP zo dicht bij het schrijnwerk zit en aan de houten stijlen, is er een risico op perforatie door de schroefverbinding die de houten stijlen aan de bestaande gevel bevestigt. Er moet dus tijdens de installatie op gelet worden dat de schroefverbinding in het verlengde van de houten stijl ligt (Figuur 8b) (Miloni, Grischott, & Zimmerman, 2011).



Figuur 8 (a) Prefab-raammodule met ventilatiekanalen uit Annex 50. Door de VIP-panelen werden de warmteverliezen door de ventilatiekanalen beperkt (Miloni, Grischott, & Zimmerman, 2011)

## 2.4 Aandachtspunten bij integratie in een prefab element

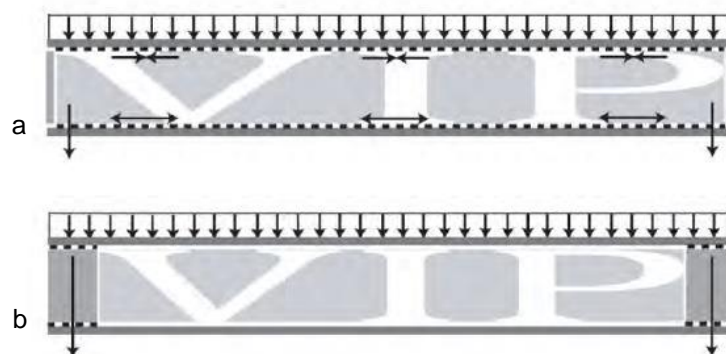
### 2.4.1 Vermijd koudebrugwerking en delaminatie van de folie

Om verschillende redenen is het aangeraden om vacuümisotatiepanelen te integreren in een prefab systeem. De in-situ plaatsing brengt een te groot risico op beschadiging van de barrièrefolie mee. Daarnaast moet vermeden worden dat de VIP-isolatielaag onderbroken wordt door sterk geleidende materialen, vb. verankeringen. Dit kan perfect vermeden worden indien het VIP in een prefab element geïntegreerd is.

De thermische randeffecten kunnen beperkt worden door:

- Zo groot mogelijke panelen te kiezen.
- Bij metalen folies worden de VIP's best in een dubbele laag geplaatst, met een minimum overlap van 5 cm. Door deze dubbele laag wordt de warmteweerstand verhoogd. (Binz & Steinke, 2005). Het koudebruggeffect wordt op die manier voor 1/3<sup>de</sup> gereduceerd (Brunner, 2011).
- VIPS worden best niet in contact gebracht met metalen platen (Boian & Dragomir, 2011)

Bij integratie in een *structural insulation panel* (SIP) zullen de VIP's structureel meewerken. Door het verlijmen van de platen aan de VIP ontstaan schuifkrachten en kan delaminatie ontstaan van de beschermfolie (Figuur 9a). Daarnaast kan de folie beschadigd geraken door structurele spanningen, waardoor het paneel zijn vacuüm verliest. (Tenpierik, 2010). Een mogelijke oplossing hiervoor bestaat erin het VIP te omhullen met een kader uit PUR of PIR. Dit kader vangt dan het grootste deel van de belastingen op (Figuur 9b).



Figuur 9 (a) Vergelijking van de spanningen in een sandwichpaneel met een VIP-paneel en (b) een sandwichpaneel met een randprofiel en een VIP (Tenpierik, 2010)

## 2.4.2 VIP's worden het best geïntegreerd in een dampdichte module

Externe dampdrukken of de combinatie van externe temperatuur en relatieve vochtigheid beïnvloeden de werkingsduur van het VIP-paneel (Tenpierik, 2010). Het kernmateriaal is zeer vochtgevoelig en verliest zijn uitstekende isolerende eigenschappen bij een toename van het vochtgehalte. Door infiltratie van lucht en water doorheen de folie tot in de kern neemt de interne druk toe, waardoor ook de warmtegeleidingscoëfficiënt kan toenemen met 0,0023 W/mK over een periode van 25 jaar. Omdat de levensduur van de meeste gebouwen tweemaal zo lang is, wordt de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt op 0,008 W/mK gelegd (Simmler & Brunner, 2005).

In het PRO<sup>3</sup>-verslag 'Hygrothermische evaluatie' werd het hygrisch gedrag van VIP's geïntegreerd in een prefab paneel systeem geëvalueerd.

## 2.4.3 Voor- en nadelen van integratie in prefab systemen

Tabel 2 Voor- en nadelen bij integratie van VIP's in een prefab systeem (Van Audenhove, 2013)

Prefab systeem	Voordeel	Nadeel/ Aandachtspunten
Sandwichpanelen SIP	Elementen tot max. 6 cm dikte mogelijk	<ul style="list-style-type: none"><li>• Schuifkrachten tussen platen en VIP kunnen voor delaminatie van de folie zorgen</li><li>• Door het dunne isolatiemateriaal daalt het traagheidsmoment. Dit kan stabiliteitsproblemen opleveren. Een dikkere huid is dan nodig, wat het gewicht doet toenemen.</li></ul>
Elementgevel (randprofiel rondom, dichting met rubberprofiel)	<ul style="list-style-type: none"><li>• De VIP zit volledig beschermd, van in de fabricagehal</li><li>• Combinatie met zwaardere materialen is mogelijk</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Detaillering aansluitingen zeer belangrijk</li><li>• Spanningen in VIP's opgelegd door het randprofiel moeten vermeden worden.</li></ul>
Gordijngevel		<ul style="list-style-type: none"><li>• Detaillering aansluitingen zeer belangrijk</li><li>• VIP's worden in-situ tussen het stijl- en regelwerk aangebracht</li><li>• Spanningen in het VIP moeten vermeden worden</li><li>• Bestaande gordijngevelprofielen kunnen slechts invulpanelen tot een bepaalde dikte vastklemmen</li></ul>



## 3 AEROGEL

### 3.1 Beschrijving en eigenschappen

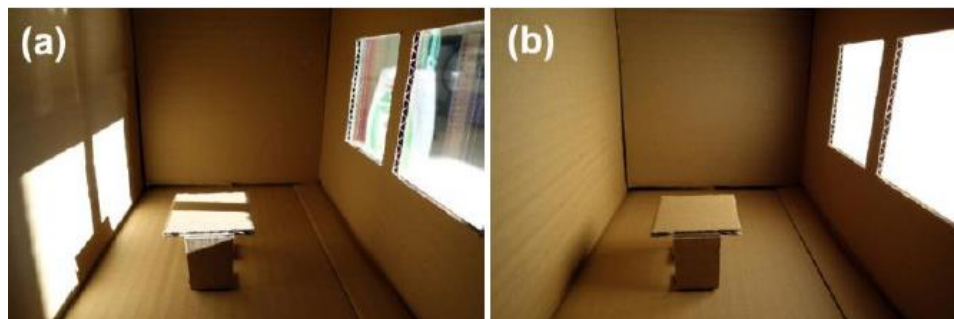
#### 3.1.1 Materialen en porositeit

Aerogel is een nanoporeus isolatiemateriaal bestaande uit een gedroogde gelstructuur met silicium met een porositeit van 85 tot 99.8%, afhankelijk van de fabricagemethode. Door deze hoge porositeit heeft aerogel een zeer lage dichtheid. Het materiaal heeft een interne structuur van siliciumdioxide ( $\text{SiO}_2$ )-kettingen waartussen de poriën zitten. Deze hebben een diameter tussen 10 en 100 nm, waardoor natuurlijke convectie niet mogelijk is (Siligardi, Miselli, Francia, & Gualtieri, 2017). Bijgevolg beschikt dit materiaal over een zeer lage thermische conductiviteit, typisch 0.014 W/mK. De kleine diameter van de poriën zorgen er ook voor dat er geen water opgezogen wordt, waardoor aerogel dampdoorlatend is maar ook waterafstotend (Bleudec, 2014).

In tegenstelling tot VIP's, verhoogt de thermische conductiviteit van aerogels niet met de tijd. Bovendien zijn perforaties bij aerogel geen probleem, waardoor ze gemakkelijk in-situ versneden kunnen worden met een stanleymes. Daarnaast kunnen aerogels zowel opaak, als translucet of transparant geproduceerd worden, waardoor de integratie in glas of zonnepanelen ook mogelijk wordt (Jelle, 2011). Voorlopig is de kostprijs echter te hoog door het productieproces, waardoor aerogels vandaag enkel in situaties gebruikt worden waar geen andere oplossing mogelijk is, bv. in een aerogelpleister bij restauratieprojecten of als translucente tussenlaag in gevelpanelen.



Figuur 10 Aerogel (Jelle, 2011)



Figuur 11 (a) Lichtdoorlatendheid van glas (b) Lichtdoorlatendheid van aerogel (Gao, Jelle, & Gustavsen, 2016)

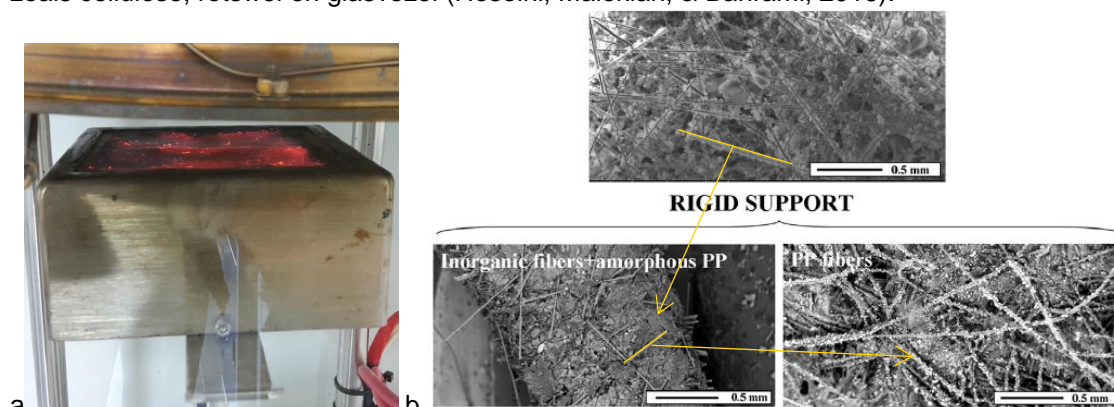
### 3.1.2 Brandweerstand

Uit een vlamtest blijkt dat aerogel resistenter is tegen vuur dan rotswol. Het smeltpunt van aerogel ligt op 1440 °C, terwijl dat van rotswol 1223 °C bedraagt. Gedurende de test was de vlam tot vier keer sneller uitgedoofd op het aerogeldekken dan op de rotswolstaal. Bovendien lag de totale warmteafgifte veel lager (3 MJ/m<sup>3</sup> bij de aerogel t.o.v. 23 MJ/m<sup>3</sup> bij de rotswol). De lagere brandweerstand van het rotswolstaal in de studie was te wijten aan het kraftpapier dat de rotswol bedekt (Siligardi, Miselli, Francia, & Gualtieri, 2017). Daarbovenop werd aangetoond dat de veroudering van het materiaal de brandweerstand verhoogd, omdat er dikkere silicium-bruggen gecreëerd worden naarmate de tijd verstrijkt (waardoor de porositeit verkleint). Door de dikkere verbindingen, krimpt het materiaal minder tijdens een brand (Motahari & Abolghasemi, 2015).

Door de combinatie met andere materialen of andere fabricageprocessen, bv. met textielvezels in een aerogeldekken of vacuüm trekken tussen twee huiden, kan de brandweerstandsklasse echter verminderen (Bleudec, 2014). Omdat aerogel meestal in combinatie met andere materialen als bouw materiaal toegepast wordt (§3.2), moet de technische fiche dus altijd geraadpleegd worden.

### 3.1.3 Sterkte

Aerogels hebben een hoge druksterkte, maar een zeer lage treksterkte. Bovendien is het materiaal zeer bros door de hoge porositeit. Dit kan deels geoptimaliseerd worden door een textiel- of glasvezel te integreren waardoor je een aerogel deken krijgt. Aan de andere kant heeft de samendrukking van aerogel heel weinig invloed op de thermische prestaties, in vergelijking met traditionele materialen zoals cellulose, rotswol en glasvezel (Hoseini, Malekian, & Bahrami, 2016).



Figuur 12 (a) Vlamdichtheid test van aerogel (b) Microstructuur van aerogel met SiO<sub>2</sub> en PP-vezels (Siligardi, Miselli, Francia, & Gualtieri, 2017).

## 3.2 Integratie in andere materialen

### 3.2.1 Als deken

Zoals hoger aangegeven kan de brosheid verminderd worden als de aerogel in een textiel- of carbonmatrix geïntegreerd is. Recent bracht DowCorning een dergelijk aerogeldekken op de markt, waarbij de aerogel geïntegreerd is in een matrix van Polyethyleentereftalaat (PET) en glasvezel. Volgens de ASTM-normering beschikt dit product over brandweerstandsklasse A1 (DowCorning, 2014).

Het deken beschikt over een hoge druksterkte waardoor het geplaatst kan worden aan verankeringspunten en plaatsen waar zeer weinig ruimte is voor isolatie, bv. aan raamaansluitingen,

rolluiken of ventilatiekanalen. Volgens de technische fiche heeft het deken een brandweerstand van klasse A (bepaald volgens ASTM E84) en is het hydrofoob (DowCorning, 2014).



Figuur 13 Aerogel Blanket van DowCorning (DowCorning, 2014).

### 3.2.2 In pleisterwerk en coatings

Aerogels kunnen ook geïntegreerd worden in een pleisterlaag of cementering. Dit werd al enkele keren toegepast in restauratieprojecten, waar men aangewezen was op binnenisolatie (bv. de Schipjes in Brugge). Ook in meer zuidere regio's werd het gebruik van aerogel in de restauratie onderzocht. In (Ibrahim, Biwole, Wurtz, & Achard, 2014) werd aangetoond dat aerogel oververhitting als deze als in een cementeringslaag aan de buitenkant aangebracht wordt.



Figuur 14 Aerogels in een cementering (Ibrahim, Biwole, Wurtz, & Achard, 2014)

### 3.2.3 Als transparant of translucient materiaal in glas- en gevelpanelen

Aerogels kunnen ook als transparant of translucient materiaal gebruikt worden in zonnepanelen en beglazing. Op die manier kan het rendement van zonnepanelen verhoogd worden en kan een beglazing gecreëerd worden met een lage warmtedoorgangscoefficiënt  $U$  tot  $0.52 \text{ W/m}^2\text{K}$  in het centrum van de beglazing en een globale warmtedoorgangscoefficiënt van  $0.57 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Aerogel met  $\rho = 150 \text{ kg/m}^3$  en dikte  $18 \text{ mm}$ ). Bij een dichtheid van  $100 \text{ kg/m}^3$  en een dikte van  $20 \text{ mm}$  zakt de warmtedoorgangscoefficiënt  $U$  in het midden van het glas ( $1 \times 1 \text{ m}$ ) naar  $0.37 \text{ W/m}^2\text{K}$  en de globale  $U$ -waarde naar  $0.47 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Jensen, 1992).

Aerogels kunnen ook aangebracht worden tussen kunststofplaten, bv. polycarbonplaten, waardoor er semi-transparante wand-, gevel- en dakelementen ontstaan. Op die manier ontstaan panelen met een  $U$ -waarde onder  $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . De polycarbonplaten ( $8$  tot  $40 \text{ mm}$  dik) met aerogel zou als een lichtgewicht alternatief voor beglazing gebruikt kunnen worden (Janssen, 2012).

### 3.3 Aandachtspunten

Ondanks het grote potentieel voor bv. verankeringspunten, isolatie van gevels waar weinig plaats is, blijft aerogel een duur product. De productiekost van aerogel ligt op dit moment heel hoog waardoor de toepassing hiervan eigenlijk enkel interessant is landen met een koud klimaat en voor gebouwen met een lange levensduur (Cuce, Cuce, Wood, & Riffat, 2014). De prijs van aerogelmaterialen is momenteel ook nog hoger dan van traditionele isolatiematerialen.

Daarnaast kan aerogel in een onbewerkte vorm stuiven. Ook bij het versnijden van aerogeldekens of aerogel geïntegreerd in kunststofplaten is er een klein risico op het rondstuiven van SiO<sub>2</sub>-partikels waardoor mechanische irritatie kan ontstaan (Bleudec, 2014).

Tot slot is de treksterkte van aerogel zeer laag en is de brandweerstandklasse afhankelijk van het product (kunststof, beglazing, textielvezel, glasvezel) waarmee de aerogel gecombineerd is.

## 4 BIBLIOGRAFIE

- BINE. (2008). *Building refurbishment - highly insulative large elements: Applications: Facade insulation in old buildings: Projektinfo 04/08*. Bonn, Germany: BINE Informationsdienst.
- Binz, A., & Steinke, G. (2005). Applications of Vacuum Insulation in the Building Sector. *International Vacuum Symposium 2005*. Empka Akademie, Zurich.
- Bleudec. (2014). *Bleudec in product design. Isolatiemateriaal op basis van aerogel*. Nederland: Saxion.
- Boian, I., & Dragomir, G. (2011). Vacuum insulation panels. Thermal analysis of wall sandwiches. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series I: Engineering Sciences*, 53, 165-170.
- Brunner, S. (2011). Single and double layered vacuum insulation panels of the same thickness in comparison. *International Vacuum Insulation Symposium 2011*. National Research Council, Ottawa.
- Cuce, E., Cuce, P., Wood, C., & Riffat, S. (2014). Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings*, 28-39.
- DowCorning. (2014). *Technische fiche Aerogel Blanket*.
- Gao, T., Jelle, B., & Gustavsen, A. (2016). Building integratio of aerogel glazings. *International Conference on sustainable design, engineering and construction*, (p. 6).
- Hoseini, A., Malekian, A., & Bahrami, M. (2016). Deformation and thermal resistance study of aerogel blanket insulation material under uniaxial compression. *Energy and Buildings*, 228-237.
- Hülsmeier, F. (2012). Vakutex - Vacuum-Insulated Textile Concrete Facade Elements. *Concrete Plant International*.
- Ibrahim, M., Biwole, P., Wurtz, E., & Achard, P. (2014). A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating. *Building and Environment*, 11.
- IEA/ECBCS Annex 39. (2005). *Vacuum Insulation in the Building Sector*. International Energy Agency.
- Janssen, A. (2012). *Aerogel muur-, wand- en dakelementen*. Brussel: WTCB.
- Jelle, B. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 2549-2563.
- Jensen, K. (1992). Passive solar component based on evacuated monolithic silica aerogel. *Journal of Non-Crystalline Solids* 145, 237-239.

- Johansson, P. (2012). *Vacuum Insulation Panels in Buildings: Literature Review (Report 2012:1)*. Gothenburg, Zweden: Chalmers University of Technology, Department of civil and environmental Engineering.
- Kalnaes, S. (2014). Vacuum insulation panel products: a state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy* 116, 355-375.
- Milioni, R., Grischott, N., & Zimmerman, M. (2011). Annex 50: Prefabricated Systems for Low Energy Buildings: Retrofit Module Design Guide. International Energy Agency (IEA).
- Motahari, S., & Abolghasemi, A. (2015). Silica Aerogel-Glass Fiber Composites As Fire Shield for Steel Frame Structures. 7.
- Panic, E. (2009). Erste Altbauanierung auf Passivhausstandard mit VIPs: Sanierung eines 150 Jahre alten Bauernhaus auf Passivhausstandard nach PHPP unter Einsatz von Vakuumdämmung.
- Siligardi, C., Miselli, P., Francia, E., & Gualtieri, M. (2017). Temperature-induced microstructural changes of fiber-reinforced silica aerogel (FRAB) and rock wool thermal insulation materials: A comparative study. *Energy and Buildings* 138, 80-87.
- Simmler, H., & Brunner, S. (2005). Vacuum insulation panels for building application. Basic properties, aging mechanisms and service life. *Energy and Buildings*, 1122-1131.
- Tenpierik, M. (2010). *Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions [Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor]*. TU Delft.
- Van Audenhove, S. (2013). *Vacuüm isolatie panelen in dunne gevelelementen (Masterproef)*. Gent, België: Universiteit Gent.

