



Assessment of Vacuum Cold and Hot Superinsulation Panel with Nanoporous Aerogel Blanket

H. Bargozin^{1*}, N. Rahimi², Sh. Rajabi²

1- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Zanjan

2- M. Sc. Student of Chemical Engineering, University of Zanjan

Email: Bargozin@znu.ac.ir

Abstract

One of the ways to prevent global warming is to use various types of insulation in industries and buildings. Modern insulations based on nano technology, such as silica aerogel blanket, are a suitable, responsive and advanced solution to control energy consumption. Vacuum insulation panels also have special properties such as low thermal conductivity, longer life and much less thickness than traditional insulation. In this article, a comprehensive review of the characteristics, structure, and innovations of vacuum panel insulation is done, and vacuum panels with nanoporous aerogel blanket are carefully studied. The integration of nanoporous aerogel blanket insulation as the core of the vacuum insulation panel and adding reflective layers inside it can cause synergy in thermal and sound insulation properties and become a superinsulation with applications in industries and buildings.

Received: 13 December 2023

Accepted: 17 July 2024

Page Number: 44-65

Keywords:

Vacuum Insulation Panel,
Nanoporous Silica Aerogel
Blanket,
Global Warming,
Thermal Conductivity,
Vacuum

Please Cite this Article Using:

Bargozin, H., Rahimi, N., & Rajabi, Sh. (2025). Assessment of Vacuum Cold and Hot Superinsulation Panel with Nanoporous Aerogel Blanket. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(139), 44-65, [In Persian].



بررسی ابرعایق سرد و گرم پانل تحت خلا با هسته پتوی منعطف آبروژل نانومتخلخل

حسن برگزین^{۱*}، نرگس رحیمی^۲، شادی رجبی^۲

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه زنجان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه زنجان

پیام‌نگار: Bargozin@znu.ac.ir

چکیده

یکی از راه‌کارهای جلوگیری از گرمایش زمین، استفاده از انواع عایق‌ها در صنایع و ساختمان است. عایق‌های مدرن بر پایه فناوری نانو، مانند پتوی منعطف آبروژل سیلیکایی، راه‌کاری مناسب، پاسخ‌گو و پیشرفته برای کنترل مصرف انرژی است. پانل‌های عایق تحت خلا نیز دارای خواص منحصر به فرد مانند ضریب رسانایی حرارتی پایین، طول عمر بیشتر و ضخامت بسیار کمتر نسبت به عایق‌های سنتی هستند. در این مقاله، خصوصیات، ساختار و نوآوری‌های عایق‌های پانل تحت خلا بررسی جامع شده و پانل‌های تحت خلا با هسته پتوی منعطف آبروژل نانومتخلخل به دقت بررسی شده است. ادغام عایق پتوی منعطف آبروژل نانومتخلخل به عنوان هسته پانل عایق تحت خلا و اضافه کردن لایه‌های بازتابنده داخل آن، می‌تواند باعث هم‌افزایی در خصوصیات عایق حرارتی و صوتی و منجر به دستیابی به یک ابر عایق با کاربرد در صنایع و ساختمان شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

شماره صفحات: ۴۴ تا ۶۵

کلیدواژه‌ها:

پانل عایق خلا

پتوی منعطف آبروژل سیلیکایی

نانومتخلخل،

گرمایش زمین،

رسانایی گرمایی،

میزان خلا

* زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی
استناد به مقاله:

برگزین، حسن، رحیمی، نرگس، و رجبی، شادی. (۱۴۰۴). بررسی ابرعایق سرد و گرم پانل تحت خلا با هسته پتوی منعطف آبروژل نانومتخلخل. نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴ (۱۳۹)، ۴۴-۶۵.

۱. مقدمه

نرخ رشد بالای جمعیت، همراه با مصرف بیشتر سرائه انرژی در کشورهای در حال توسعه باعث افزایش تقاضای جهانی انرژی شده است. تولید بیشتر برای پاسخ‌گویی به این تقاضا منجر به افزایش قیمت انرژی، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و شرایط دشوار محیط زیست به دلیل گسترش استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌شود [۱]. در اتحادیه اروپا ۸۰٪ از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای، ناشی از تولید و استفاده انرژی فسیلی است [۲]. ایران، به‌عنوان یکی از ۱۰ کشور اول در انتشار کربن دی‌اکسید، از دارندگان اصلی منابع نفت و گاز طبیعی است و تلاش می‌کند تا با تهیه و استفاده سوخت‌های فسیلی، نیاز ملی انرژی خود را برطرف کند. مصرف گاز حدود سه برابر بیشتر در ایران نسبت به کل اتحادیه اروپا، سبب ناترازی گاز طبیعی در فصول گرم و سرد سال و منجر به قطعی گاز نیروگاه‌ها و سوزاندن مازوت در زمستان و کمبود تولید برق و قطعی برق صنایع و ساختمان‌ها در تابستان می‌شود. ایران، کشوری پهناور با منابع انرژی طبیعی مختلف و سازگار با محیط زیست مانند انرژی خورشیدی یا نیروی باد است؛ اما هنوز برنامه بلندمدت روشن و قابل توجهی برای استفاده از منابع انرژی پاک وجود ندارد [۳]. از طرفی، به‌کارگیری برخی از این انرژی‌ها دارای محدودیت‌هایی است؛ مثلاً ساخت تأسیسات خورشیدی نیازمند اصلاح و طبقه‌بندی منطقه وسیعی از زمین است که باعث فشرده‌سازی خاک و تسریع روند فرسایش آن می‌شود. سامانه‌های برج مرکزی برای خنک‌شدن به آب نیاز دارند که در مناطق کویری و کم‌آب این دست‌رسی محدود است و بازیافت پانل‌های خورشیدی نیازمند هزینه بسیار بالایی است [۴]. در اتحادیه اروپا ساختمان‌ها حدود ۴۰٪ مصرف انرژی و ۳۶٪ از کل انتشار کربن دی‌اکسید را تشکیل می‌دهند [۲] و در صورت بی‌توجهی به سیاست‌های صحیح زیست‌محیطی این میزان انتشار تا سال ۲۰۳۰ دو برابر می‌شود [۵]. ۷۰٪ از انرژی مصرفی در ساختمان‌ها، ناشی از گرمایش و سرمایش ساختمان‌های مسکونی و تجاری است [۱] و بخش عمده‌ای از انرژی در ساختمان‌ها اتلاف می‌شود. دستورالعمل "SAVE" (93/76/EEC) در سال ۱۹۹۳ اولین سیاست اتحادیه اروپا در مورد بهره‌وری انرژی بود و پس از تصویب پروتکل کیوتو^۲ در سال ۱۹۹۷ متعهد به کاهش

انتشار گازهای گلخانه‌ای شد [۲].

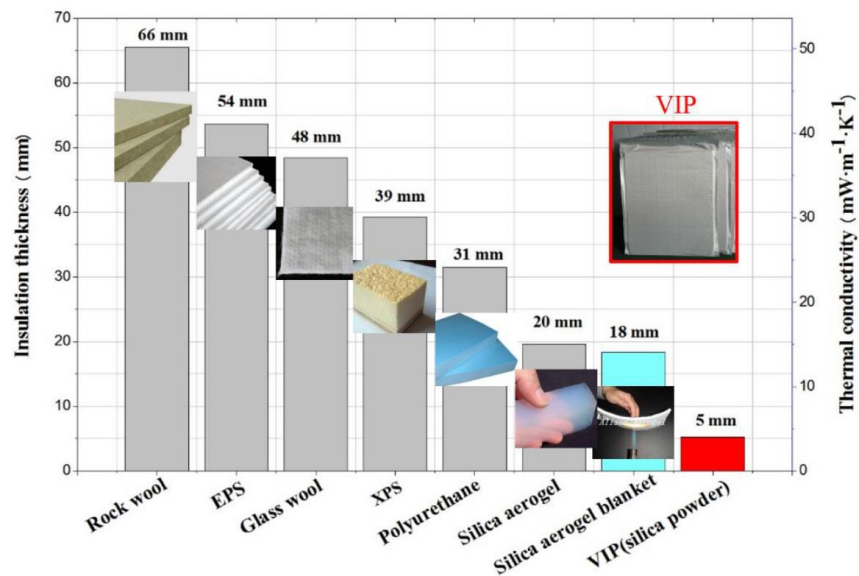
چندین راه‌کار برای بهره‌وری در مصرف انرژی برای کاهش اتلاف در ساختمان‌ها وجود دارد؛ یکی از این راه‌کارها استفاده از عایق حرارتی است. مطابق با مقررات ملی ساختمان ایران، ضریب هدایت حرارتی عایق باید کم‌تر از ۰/۰۶۵ وات بر متر کلوین^۳ (در شرایط حرارتی استاندارد) باشد [۶]. نبود عایق مناسب با کارایی و طول عمر بالا در ضخامت کم و امکان نصب راحت و سریع، از جمله دلایل عدم استفاده از عایق در ساختمان‌های ایران است. توسعه عایق مناسب در ایران می‌تواند رغبت استفاده از آن را در صنعت ساختمان افزایش دهد و باعث کاهش محسوس مصرف انرژی در کشور شود. مطابق شکل (۱)، در عایق‌های معمولی مانند پشم شیشه، پشم سنگ، فوم‌های پلی‌اورتان و پلی‌استایرن، برای رسیدن به میزان انتقال حرارت مورد نظر، باید از لایه‌های ضخیم‌تر تا ضخامت ۳۰ سانتیمتر استفاده شود که باعث ساخت‌وسازهای سنگین، اشغال فضای بیشتر و کاهش فضای قابل سکونت مفید می‌شود.

باتوجه به بررسی‌های انجام‌شده در مورد وضعیت انرژی در جهان، مواد عایق معمولی از نظر حرارتی برای برطرف کردن نیازهای امروز کاملاً کارآمد نیستند. پانل‌های عایق تحت خلاً، جای‌گزین مناسب عایق‌های سنتی با عملکرد حرارتی بسیار بهتر هستند که می‌توانند بازده عملکرد سیستم عایق را افزایش دهند و در مصرف انرژی صرفه‌جویی محسوسی ایجاد کنند [۸،۹]. انواع عایق‌های مبتنی بر آبروژل سیلیکایی نانومتخلخل نیز به‌عنوان نسل جدیدی از عایق‌های حرارتی در دنیا شناخته می‌شود که برتری‌های متعددی را برای صنعت و ساختمان ایجاد می‌کند. ادغام فناوری ایجاد خلاً در عایق‌های پانل با هسته‌هایی در ابعاد نانومتری از جنس عایق‌های آبروژل سبب تولید پانل‌های عایق تحت خلاً با خصوصیات بهتر و عدم نیاز به ایجاد فشارهای بسیار کم نزدیک به خلاً کامل شده است. همان‌گونه که در شکل (۱) پیدا است، ۵ میلی‌متر از عایق پانل تحت خلاً معادل حدود ۶۶ میلی‌متر پشم سنگ عمل می‌کند. در این مقاله مروری به معرفی پانل‌های عایق تحت خلاً، قسمت‌های مختلف تشکیل‌دهنده، انواع مواد قابل استفاده در آن و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته و نحوه ساخت آن بررسی شده است. در ادامه، اقدامات و پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه افزایش کیفیت و کارایی آن بررسی شده است تا ظرفیت‌های استفاده از آن‌ها در حوزه ساختمان

1. European Union- EU
2. Kyoto Protocol

3. W/mK

و صنایع بیشتر روشن شود. برای ارتقای ظرفیت این عایق، افزایش حساسیت‌ها و غیره، ترکیب عایق تحت خلأ با عایق‌های چندلایه و پتوی منعطف آیروژل پیشنهاد شده‌است.



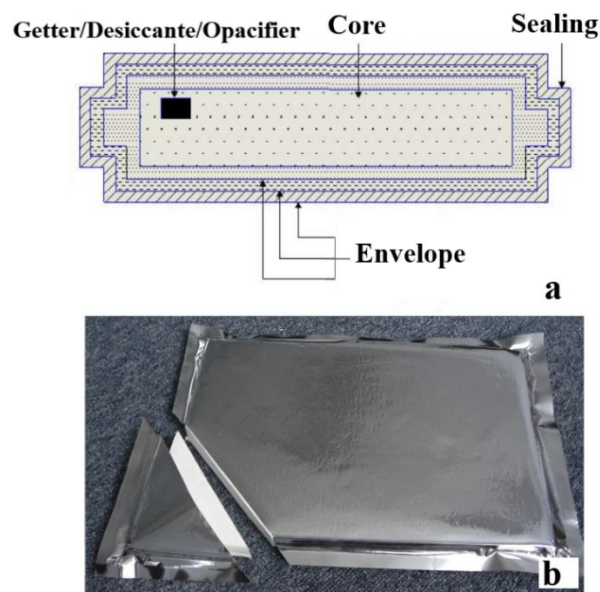
شکل ۱. مقایسه ضخامت عایق‌های مختلف در کارایی و هدایت حرارتی یکسان [۷].

Figure 1. Comparison of the thickness of different insulations in the same efficiency and thermal conductivity [7].

همان‌طورکه در شکل (۲) مشاهده می‌شود هر VIP از سه بخش ماده مرکزی (هسته)، حفاظ و جاذب تشکیل شده‌است [۱۱].

۲. معرفی پانل عایق تحت خلأ و اجزای آن

VIP یک پانل با هسته متخلخل حفره‌باز است که تحت خلأ قرار گرفته و داخل فویل چندلایه، آبندی حرارتی شده‌است [۱۰].



شکل ۲. (a) نمایش بخش‌های مختلف VIP و (b) برش عرضی از آن [۱۲].

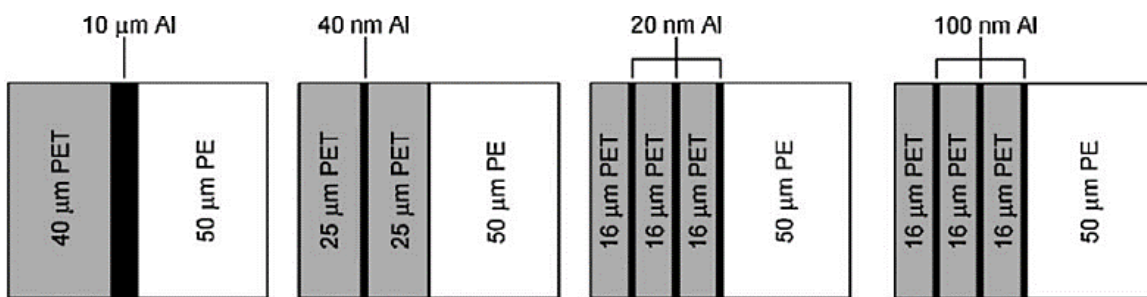
Figure 2. (a) Cross section of VIP and (b) showing its different parts [12].

۱- ماده مرکزی: ماده مرکزی دارای ساختار منافذ باز است تا به تمام هوا اجازه تخلیه و ایجاد خلأ بدهد. با کوچکتر شدن اندازه حفره‌ها در هسته و بروز نفوذ نادن^۱ در ابعاد نانومتری، می‌توان ضریب هدایت حرارت پایین مورد نظر را در فشار بالاتر به دست آورد [۱۳]. ایجاد فشارهای بسیار پایین و نزدیک خلأ، نیاز به زمان طولانی، تجهیزات گران‌قیمت و محدودیت در ابعاد تولید محصول نهایی است. هم‌چنین، ماده مرکزی باید دارای رسانایی گرمایی پایین، عبور تابش کم و مقاوم در برابر اختلاف فشار و خلأ شدن باشد [۱۳].

۲- حفاظ: حفاظ برای حفظ خلأ و جلوگیری از نفوذ گاز در VIP است. معمولاً کامپوزیت فویل آلومینیومی سه‌لایه بیشترین استفاده را به‌عنوان حفاظ VIP دارد که دارای یک لایه مانع آلومینیومی مرکزی، بین یک لایه بیرونی پلی‌اتیلن ترفتالات^۲ برای مقاومت در برابر خراش و یک لایه پلی‌اتیلن^۳ داخلی برای آب‌بندی است و تعداد این لایه‌ها مطابق شکل (۳) متغیر است. حفاظ، هم‌چنین استحکام مکانیکی را برای تحمل فشار محیط و تنش‌های جابه‌جایی در طول حمل‌ونقل و نصب فراهم می‌کند.

۳- جاذب‌ها: جاذب‌ها با گذشت زمان، افزایش نفوذ هوا و رطوبت از راه حفاظ به‌داخل VIP و آزاد شدن مواد جذب‌شده به‌وسیله هسته، منجر به افت کارایی و افزایش هدایت حرارتی پانل می‌شوند [۱۴]. هم‌چنین، در شرایط خلأ، سازوکار انتقال حرارت تابشی مهم می‌شود و می‌توان موادی را به‌عنوان جاذب یا بازتاب دهنده تشعشع برای افزایش کارایی پانل تحت خلأ به آن اضافه کرد. برای جلوگیری از نفوذ و افزایش هدایت

حرارتی VIP جاذب‌ها به ماده مرکزی اضافه می‌شوند [۱۰]. آلیاژ لیتیوم- باریم (Li-Ba) می‌تواند گازهای فعال مانند کربن دی‌اکسید، اکسیژن و کربن مونواکسید را در دمای اتاق بدون فعال‌سازی حرارتی جذب کند، اما منجر به تولید هیدروژن می‌شود. هیدروژن تأثیر نامطلوب زیادی بر عملکرد VIP دارد؛ زیرا هدایت حرارتی آن هفت برابر هوا است. بنابراین، آلیاژ Li-Ba را نمی‌توان به‌تنهایی داخل VIPها استفاده و باید با جاذب رطوبت و هیدروژن استفاده کرد [۱۵]. کربن فعال، ضمن عملکرد مناسب در جذب بخار آب، مساحت سطح بالایی دارد؛ این مساحت سطح بالا آن را مستعد جذب بالای هیدروژن می‌کند. یک راه کار مؤثر برای بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی کربن فعال، اصلاح سطح آن با بارگذاری فلزات واسطه است که تا ۵۰٪ جذب هیدروژن را افزایش می‌دهد [۱۶]. Co_3O_4 نیز جاذب دیگر گاز است، اما می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی ایجاد کند [۱۵] و فرایند سنتز پیچیده و هزینه بالایی دارد [۱۷]. بازیافت جاذب‌های آلیاژی که از راه جذب شیمیایی با مولکول‌ها تعامل دارند، دشوار است؛ درحالی‌که گازدهای متخلخل مانند زئولیت می‌توانند از راه جذب فیزیکی با مولکول‌ها تعامل داشته باشند [۱۸]. سیلیکاژل نیز یکی از بیشترین میزان جذب بخار آب (به دلیل آب‌دوستی و مساحت سطح بالا) را دارد [۱۵]. برای کاهش رسانایی تابشی نیز جاذب تشعشع اضافه می‌شود. یک جاذب تشعشع رایج، کاربید سیلیکون است و امکان کاهش تشعشع را تا زیر ۰/۰۰۱ وات بر متر کلون دارد [۱۰، ۱۷].



شکل ۳. مقاطع عرضی از تعداد لایه‌های متفاوت حفاظ‌های VIP [۱۰].

Figure 3. Cross sections of different number of layers of VIP envelopes [10].

1. Knudsen

2. Polyethylene Terephthalate (PET)

3. Polyethylene (PE)

جدول ۱. مقایسه انواع مواد هسته عایق تحت خلأ.

Table 1. Comparison of types of VIP central material.

Materials	Vacuum (mtorr)	Lifespan (Year)	Thermal conductivity (W/m.K)
Polyurethane or polystyrene	< 1	15	0.026
Glass fiber	1	5	0.044
Silica nano powder	15 – 100	60	> 0.02
Silica aerogel	15 – 100	60	< 0.02

طبق بررسی‌های محیط زیستی برای انواع هسته‌های استفاده‌شده در VIP، فوم سیلیس، متداول‌ترین ماده هسته VIP استفاده می‌شود. درمقایسه با سایر مواد هسته از نظر شاخص‌های محیطی ضعیف عمل می‌کند که با جای‌گزین‌سازی آبروژل، عملکرد محیط زیستی VIP بهبود می‌یابد [۱۹]. قطعات VIP تا حد زیادی قابل بازیافت است و این امر، به‌ویژه در مورد ماده مرکزی صدق می‌کند، زیرا پس از پایان عمر پانل، می‌توان مواد هسته را جدا و در صورت اثبات مناسب بودن کیفیت مواد پس از فرایندهای شناسایی، برای تولید VIP دیگری استفاده کرد [۲۰].

۴. آبروژل‌های سیلیکایی

در میان مواد فوق عایق، آبروژل با ویژگی‌های فوق‌العاده و بازار در حال توسعه پرشتاب خود، متمایز است. سه نوع آبروژل تجاری با مواد سیلیس، کربن و آلومینا وجود دارد. در بین این سه نوع، سیلیکا آبروژل رایج‌ترین نوع برای بررسی و استفاده است [۲۱]. اولین بار کیستلر^۳ در سال ۱۹۳۱ آبروژل‌های سیلیسی را با استفاده از سیلیکات سدیم توسعه داد [۱۲]. آبروژل‌های سیلیکایی دارای ساختار داخلی متقاطع از زنجیره‌های محکم دی‌اکسید سیلیسیم است. قطر منافذ آن بین ۳۰-۱۰ نانومتر است؛ این منافذ ۸/۹۹-۸۵٪ حجم کل آبروژل را می‌گیرد. در دمای محیط دارای رسانایی حرارتی ۰/۰۲ وات بر متر کلون است [۱۰]. تخلخل بالا، آبروژل‌ها را به سبک‌ترین ماده جامد تبدیل می‌کند. باتوجه به اندازه منافذ نانویی و تخلخل بالا، خواص فیزیکی، حرارتی، نوری و صوتی قابل توجه دارد [۱۳]. آبروژل‌های سیلیسی سرعت صوت کم‌تری نسبت به هوا دارد؛ سرعت صوت آن تا ۴۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. شفافیت نوری

۳. انواع ماده مرکزی VIP

ماده مرکزی بخش عمده‌ای از VIP را تشکیل می‌دهد، بنابراین، اثرات محیط زیستی آن بیشتر به ماده مرکزی نسبت داده می‌شود [۱۳، ۱۹]. هم‌چنین، تا حد زیادی ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی VIP‌ها را تعیین می‌کند [۱۲]. برخی از ماده‌های مرکزی قابل استفاده در VIP به شرح زیر است:

- فوم‌های پلی‌اورتان یا پلی‌استایرن: ذاتاً عایق حرارت، ارزان و محکم هستند و توانایی مقاومت در برابر نیروی فشاری دارند [۱۳]. دارای اندازه منافذ بزرگ و عمر مفید کوتاه (۱۵ سال) و نیازمند به خلأ کم‌تر از ۱ میلی‌بار هستند.

- فیبر شیشه‌ای: اندازه قطر آن ۱۲-۱ میکرومتر و در فشار ۱ میلی‌بار دارای ضریب هدایت ۰/۰۴۴ وات بر متر کلون است. ارزان و مقاوم در برابر انتقال حرارت است. طول عمر ۵ ساله دارد؛ ولی اگر به آن جاذب اضافه کنند تا ۱۵ سال طول عمر دارد [۱۹].

- پودر اکسید سیلیس نانومتری: تجزیه حرارتی تتراکلرید سیلیسیم^۱ و واکنش با اکسیژن منجر به ایجاد دی‌اکسید سیلیسیم^۲ و با اضافه کردن الیاف‌هایی به آن مستحکم‌تر می‌شود. در صورت سوراخ‌شدن، رسانایی آن نهایتاً تا ۰/۰۲ وات بر متر کلون می‌رسد. قطر بزرگ‌ترین منافذ آن ۳۰۰ نانومتر است [۱۳].

- آبروژل: چگالی آبروژل ۳-۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. دارای کمترین رسانایی حرارتی (۰/۰۲ وات بر متر کلون) در بین جامدات تجاری دنیا است و خاصیت غیراشتعال دارد؛ اما از استحکام بالایی برخوردار نیست که می‌توان با اضافه کردن الیاف، آن را محکم‌تر کرد [۷]. حفره‌های نانومتری آبروژل‌ها در ابعاد متوسط ۳۰-۲۰ نانومتری است و نفوذ گازها درون آن‌ها از قانون نادسن تبعیت می‌کند. استفاده از آبروژل‌ها در هسته مرکزی عایق‌های پانل تحت خلأ، نیاز به ایجاد فشارهای بسیار کم نزدیک به خلأ را - که فرایندی زمان‌بر، هزینه‌بر و وابسته به تجهیزات خاص و گران است - از بین می‌برد. در جدول (۱)، مقایسه بین انواع ماده مرکزی داخل VIP انجام شده است.

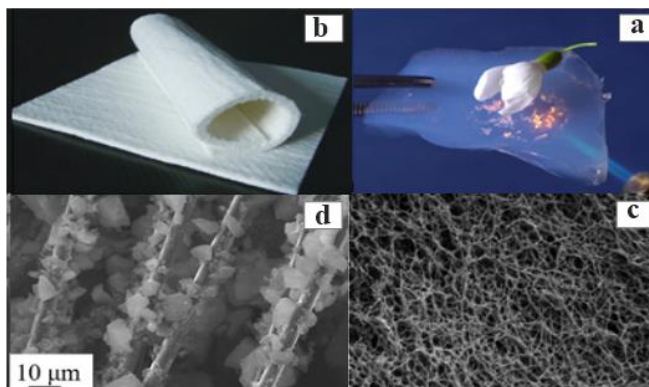
1. Silicon Tetrachloride- SiCl₄
2. Silicon Dioxide -SiO₂

3. Kistler

آیروژل‌ها امکان کاربرد آن را در سقف‌ها و شیشه‌های پنجره فراهم می‌کند [۲۲]. بتن‌های سبک و عایق بر پایه آیروژل در ساختمان‌ها بررسی و استفاده شده‌است. کاربرد انواع آیروژل در بتن‌ها موجب کاهش ضریب رسانایی حرارتی و کاهش چگالی می‌شود [۲۳]. علاوه بر این، آیروژل به دلیل ساختار غیر آلی آن یک ماده غیر قابل احتراق است و تا دمای ۱۲۰۰ درجه سلسیوس (نقطه ذوب خود) را تحمل می‌کند؛ از این‌رو، می‌توان از آن در داخل ساختمان‌ها به عنوان ساختمانی ضد حریق نیز استفاده کرد [۲۱]. آیروژل‌های سیلیکایی به دلیل داشتن سطح ویژه و تخلخل باز بسیار بالا به عنوان پایه کاتالیست‌ها استفاده شده‌اند [۲۴]. این ماده نسبت به سایر عایق‌ها گران است، اما باتوجه به کارایی بالای آن، مقرون به صرفه است. تصویر انواع آیروژل در شکل (۴) آمده‌است. آیروژل‌های سیلیکایی، به دلیل ساختار نانومتخلخل، توانایی بیشتری برای حفظ رسانایی حرارتی پایین‌تر در فشار بالا دارد و از این‌رو، به عنوان بهترین ماده برای پانل‌های عایق خلأ در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین، در صورت آسیب دیدن VIP، عایق هم‌چنان عملکرد خود را حفظ می‌کند، زیرا آیروژل بدون خلأ نیز عایق قوی حرارتی است [۱۲].

۵. ایجاد خلأ در VIP

از شاخصه‌های مهم VIP، خلأ کردن است که باعث عملکرد بهتر آن می‌شود. خلأ، به معنای عدم وجود ماده است که این مقدار ایده‌آل است و مقداری فشار حتی در خلأهای کامل بسیار قوی دارد. کم‌ترین مقدار برای ضریب انتقال حرارت گاز در زمان خلأ است. انتقال حرارت و جرم به این فشار بستگی دارد. نقطه تقسیم در خلأ، انتقال از محدوده جریان پیوسته به محدوده جریان مولکولی است. محدوده جریان پیوسته مربوط به جریان توده‌ای کل ماده است، چون مولکول‌ها آزادانه به هم برخورد می‌کنند و انتقال انرژی انجام می‌دهند؛ در حالی که، جریان مولکولی برای حرکت تک‌تک مولکول‌ها به صورت مستقل است. هنگامی که طول پویا آزاد متوسط (λ) یک مولکول از مکانی که در آن قرار دارد بزرگ‌تر می‌شود، انتقال به جریان مولکولی انجام می‌شود و نفوذ به حالت نفوذ ناسن تبدیل می‌شود [۱۰، ۲۷]. برای ایجاد خلأ محدوده‌های تعریف‌شده‌ای وجود دارد که طبقه‌بندی آن در جدول (۲) آورده شده‌است.



شکل ۴. تصاویر (a) آیروژل سیلیکایی خالص با مقاومت بالای حرارتی، (b) پتوی منعطف آیروژل، (c) SEM آیروژل خالص و (d) SEM کامپوزیت آیروژل [۲۵، ۲۶].

Figure 4. Images of (a) pure silica aerogel with high thermal resistance, (b) aerogel blanket, (c) SEM of pure aerogel and (d) SEM of aerogel composite [25,26].

جدول ۲. بازه فشار در انواع خلأ [۲۷].

Table 2. Pressure range in different types of vacuum [27].

Vacuum type	Ultra high vacuum	High vacuum	Medium vacuum	Soft vacuum	Rough vacuum	Ambient pressure
Pressure range (torr)	$10^{-12} - 10^{-9}$	$10^{-8} - 10^{-5}$	$10^{-4} - 10^{-1}$	~ 1	~ 10	760

ضرایب انتقال حرارت پایین در خلأهای نه‌چندان بالا رسید که نتیجه آن کاهش هزینه‌های تولید عایق تحت خلأ، کارایی بالاتر، عدم نیاز به تجهیزات خاص و هزینه‌بر، طول عمر بالاتر، بی‌نیازی از مواد خاص استفاده‌شده در داخل پانل مانند انواع مختلف جاذب‌ها و غیره خواهد بود. رسیدن به خلأهای نه‌چندان بالا، بسیار راحت، سریع و بدون نیاز به تجهیزات خلأ گران‌قیمت است. ماندگاری خلأهای کم نیز، بسیار بیشتر از خلأهای بسیار کم است.

۶. مقایسه VIP با عایق‌های سنتی

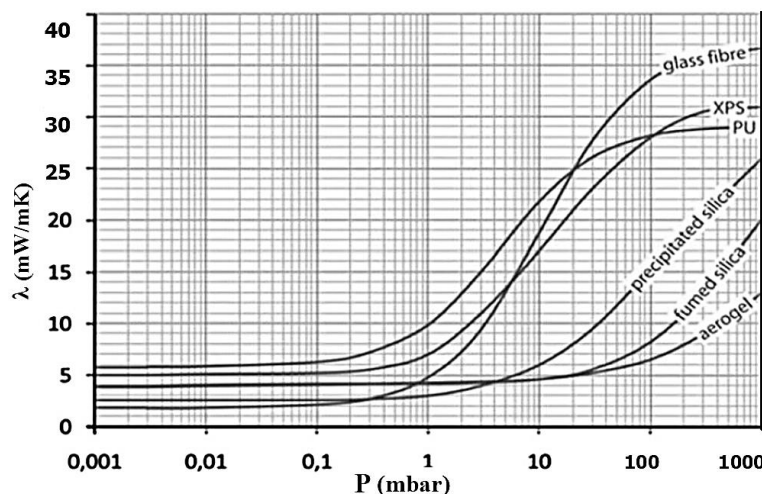
عایق‌های سنتی به دو دسته فیبر (پشم) معدنی و فوم آلی تقسیم می‌شوند. پشم معدنی شامل پشم شیشه، پشم سنگ و پشم گوسفند است و رسانایی حرارتی آن معمولاً بین $0.03-0.04$ وات بر متر کلون است. EPS^1 و XPS^2 فوم‌های آلی سلول بسته با چگالی کم هستند و هدایت حرارتی آن‌ها نیز بین $0.03-0.04$ وات بر متر کلون است. پلی‌اورتان، از دیگر فوم‌های آلی است و هدایت حرارتی آن بین $0.03-0.04$ وات بر متر کلون است. از سایر عایق‌های سنتی می‌توان به پلی‌ایزوسیانات و چوب‌پنبه اشاره کرد [۲۱]. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، عایق‌های سنتی نسبت به عایق‌های مدرن حجم بسیار بیشتری از فضا را اشغال می‌کند؛ در حالی که عایق VIP علاوه بر نادیده‌گرفتنی بودن حجم اشغال کرده، هدایت حرارتی بسیار پایین‌تری دارد.

استفاده از عایق معمولی به‌عنوان ماده مرکزی برای VIPها، نیاز به کیفیت بسیار بالای خلأ دارد. کاهش زیاد فشار باعث افزایش هزینه و نیازمند زمان طولانی و تجهیزات خاص است [۲۷، ۱۰]. همچنین، پایدار ماندن خلأهای بالا در گذر زمان، با توجه به عوامل مختلفی که باعث شکست خلأ می‌شوند، بسیار سخت است.

معادله (۱) بیانگر رابطه نادرستی است؛ تازمانی که نادرستی کوچک‌تر از یک است، جریان پیوسته است و تجزیه و تحلیل انتقال حرارت معمولی اعمال می‌شود؛ هنگامی که نادرستی بزرگ‌تر از یک می‌شود، جریان به صورت مولکولی انجام می‌شود. جریان‌های بین پیوسته و مولکولی، رژیم‌های جریان لغزش و رژیم‌های انتقالی هستند که در خلأ ریز یا نرم رخ می‌دهند. هیچ فرمولی برای هدایت گرما در این رژیم‌ها شناخته‌شده نیست و در صورت نیاز به عملیات، باید به داده‌های تجربی تکیه کرد.

$$k_n = \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

بنابراین، با انتخاب ماده مناسب برای ماده مرکزی VIP می‌توان به هدایت حرارتی پایین مورد نظر، بدون نیاز به رسیدن به خلأهای بالا رسید. در شکل (۵) برخی از مواد عایق از نظر هدایت حرارتی در فشارهای مختلف مقایسه شده است. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از عایق‌های نانومتخلخل مانند آبروزل سبب می‌شود که به

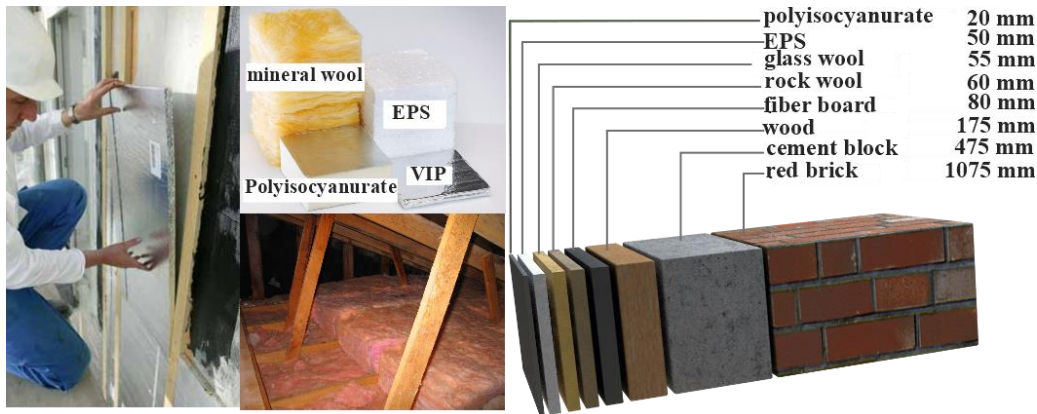


شکل ۵. تأثیر فشار بر هدایت حرارتی مواد عایق مختلف [۱۳].

Figure 5. The effect of pressure on the thermal conductivity of different insulating materials [13].

1. Expanded Polystyrene

2. Extruded Polystyrene



شکل ۶. مقایسه ضخامت مورد نیاز انواع مواد عایق ساختمان برای رسیدن به اتلاف یکسان [۲۱].

Figure 6. Comparison of the required thickness of different building insulation materials to achieve the same loss [21].

۷. عایق چندلایه^۱ (MLI)

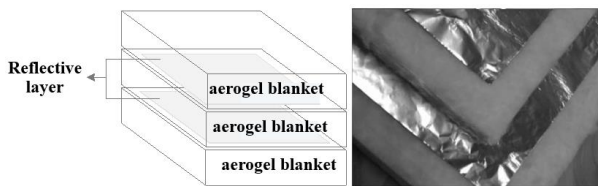
هستند. می توان از فلزاتی مانند طلا و نقره استفاده کرد، اما به دلیل صرفه جویی در هزینه، انتخاب معمول آلومینیوم است. تعداد لایه ها برای سامانه های MLI می تواند ۱۰-۱ لایه یا بیشتر باشد. با این حال، افزایش تعداد لایه منجر به هزینه مواد بیشتر، فشردگی بیشتر بین لایه ها، محبوس شدن گازها و زمان تخلیه طولانی تر و گاززدایی ناکافی لایه های داخلی می شود [۲۷، ۳۰]. در شکل (۷) تصویر MLI پیدا است. از سامانه های MLI زمانی استفاده می شود که نیاز به نرخ نشت حرارت کم تر نسبت به سایر عایق ها و فضای کم تر بین مرزهای گرم و سرد به دلیل جرم بسیار کم و هندسه سطح پیچیده باشد. بنابراین، دارای کاربردهای مختلف به خصوص کاربردهای برودتی است؛ مانند ذخیره سازی یا انتقال مایعات برودتی مثل هلیوم، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، حفاظت حرارتی در اکتشاف فضا، تحقیقات در دمای پایین برای بسیاری از آزمایشگاه ها و غیره.

یکی از کاربردهای عایق های تحت خلأ در صنایع هوافضا است. معمولاً در فضا حالت خلأ کامل حاکم است و اصلی ترین سازوکار انتقال حرارت، تابش تشعشع است. اکتشافات هوافضا به سامانه های عایقی نیاز دارد که در طیف کامل سطوح خلأ، یعنی در زمین بدون خلأ، مریخ با خلأ نرم و ماه با خلأ بالا عملکرد مناسبی داشته باشد. یکی از بهترین عایق های تحت خلأ نزدیک به خلأ کامل، سامانه های عایق چندلایه است که شامل لایه هایی از ورق های پلیمری به همراه پوشش فلزی با عبور تابش حرارتی کم است که به وسیله جداکننده های عایق با رسانایی کم، از هم جدا شده اند. MLI معمولاً در خلأ های نزدیک به خلأ متوسط (10^{-3} پاسکال که فشار بسیار پایینی است) استفاده می شود [۲۸] و با کاهش درجه خلأ، انتقال حرارت رسانش گاز به درصد زیادی از کل انتقال حرارت MLI تبدیل می شود [۲۹]. از آنجایی که مواد بازتابنده باید نازک و با ضریب بازتابنده بالا باشد، معمولاً فلزاتی با خلوص و هدایت حرارتی بالا



شکل ۷. لایه های بازتابنده و فاصله دهنده MLI [۲۷].

Figure 7. Reflector and spacer layers of MLI [27].



شکل ۸. شکل واقعی و طرحواره از ترکیب MLI و پتوی منعطف آیروزل [۲۷].

Figure 8. The real and schematic form of the combination of MLI and aerogel blanket [27].

۸. نوآوری‌های مطرح شده در حوزه VIP

تحقیقات در مورد VIP عمدتاً در راستای کاهش ضریب انتقال حرارت پانل‌ها، کاهش نیاز به خلأهای بالاتر از راه به‌کارگیری هسته‌های نانوساختار، افزایش طول عمر پانل با استفاده از حفاظ متفاوت و استفاده از کامپوزیت‌های مختلف در ماده مرکزی و حفاظ است. آغاز توسعه عایق‌های خلأ به اختراع پروفیسور جیمز دوار نسبت داده می‌شود که ظرف عایق معروف به مقممه Dewar را اختراع کرد و از سال ۱۹۰۴ در بازار عرضه شده است [۳۱]. پتنت^۱ شماره ۲۷۰۰۶۳۳ در سال ۱۹۵۵ اولین ثبت اختراع VIP با جزئیات دقیق به دست بوونکر^۲ بود که حاوی هسته فیبر شیشه‌ای تحت خلأ داخل فولاد بود. در سال ۱۹۶۴ ثبت اختراع شماره ۳۱۵۱۳۶۵ در ایالات متحده آمریکا ثبت شد و نانوساختار بودن مواد اصلی را توصیف کرد. اولین استفاده تجاری از این پانل‌ها در آمریکا در سال ۱۹۷۰ داخل یخچال و فریزر و جعبه‌های خنک‌کننده بود و در سال ۱۹۹۹ وارد صنعت ساخت و ساز شد [۳۲]. در سال ۲۰۰۹ تنپیریک^۳ و همکاران از نانو پودر سیلیس به‌عنوان هسته VIP استفاده کردند که می‌توانست یک هدایت حرارتی پایدار تا فشار حدود ۱۰ میلی‌بار را حفظ کند. هم‌چنین، به دلیل خشک‌کنندگی ذاتی سیلیس باعث افزایش طول عمر VIP ها می‌شد [۳۳]. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۱ از پتوی منعطف سیلیکا آیروزل به‌عنوان ماده مرکزی VIP باهدف کاهش رسانایی حرارتی به‌دست باانتنس^۴ و همکاران استفاده شد؛ آن‌ها بردهای فشرده از این مواد را به دلیل ویژگی‌هایی چون اندازه منافذ حداکثر ۳۰۰ نانومتر و تخلخل ۹۰٪، غیرسمی بودن، غیرقابل احتراق، قابل بازیافت، عدم انتشارات مضر محیط زیستی و خشک‌کنندگی ذاتی، به‌عنوان یکی از بهترین هسته‌های

چندین مورد نامطلوب وجود دارد که به عملکرد MLI آسیب می‌رساند:

- اولین و مهم‌ترین مشکل عملیاتی MLI، ایجاد خلأ است؛ لایه‌های زیاد با فاصله نزدیک، تخلیه زیر ۰/۱ میلی‌تور بین تمام لایه‌ها را دشوار می‌کنند.

- امکان اجرای صحیح عایق بر روی همه سخت‌افزارها که به‌طور مناسب پوشش داده شود، وجود ندارد.

- فشرده‌سازی موضعی عملکرد حرارتی را تخریب می‌کند، پس از پیچیدن MLI دور لوله، نیروی وزن MLI باعث کشیدگی در قسمت بالایی لوله شده، منجر به نازک‌تر شدن عایق و حتی چسبیدن لایه‌های داخلی به هم می‌شود که افزایش انتقال حرارت را به دلیل ضخامت کم‌تر و هدایت بیشتر (به دلیل چسبندگی لایه‌ها) خواهد داشت؛ بنابراین، MLI نمی‌تواند بار مکانیکی را تحمل کند.

برای سامانه‌های MLI قوی‌تر در کاربردهای هوا و فضا، سامانه‌های عایق ترکیبی لایه‌ای پیشنهاد می‌شود. ترکیب لایه‌های بازتابنده آلومینیومی با پتوی منعطف آیروزل منجر به دست‌یابی به یک ابر عایق VIP می‌شود که در محیط معمولی به دلیل داشتن چند لایه آیروزل و در خلأ بالا به دلیل دارا بودن چندین لایه بازتاب‌دهنده MLI، باعث رسانایی حرارتی بسیار پایین می‌شود. نتیجه این کار می‌تواند باعث دست‌یابی به ضریب انتقال حرارت پایین‌تر از ۰/۰۰۱ وات بر مترکلین شود [۲۷]. در شکل (۸)، تصاویر این سامانه ترکیبی قابل مشاهده است. به عبارت دیگر، هنگامی که یک سفینه از سطح زمین و دارای فشار اتمسفر به سمت خلأ فضا حرکت می‌کند، لایه‌های آیروزل در سطح زمین سبب عایق حرارتی بالا می‌شود و در فضا، لایه‌های بازتاب‌دهنده MLI در ترکیب با پتوی منعطف آیروزل، یک پانل عایق حرارت تحت خلأ بسیار مؤثر تشکیل می‌دهد. هنگامی که سفینه به زمین برمی‌گردد نیز با افزایش فشار اثر لایه‌های MLI از بین رفته ولی پتوی منعطف‌های آیروزل به‌طور مؤثری خاصیت عایق حرارتی لازم را ایجاد می‌کند. بدنه مخازن و لوله‌های حاوی مواد برودتی مانند نیتروژن مایع، اکسیژن مایع و هیدروژن مایع با عایق‌های MLI حاوی پتوی منعطف آیروزل به‌عنوان جداکننده لایه‌ها پوشانده می‌شود.

1. Patent
2. Bovenker
3. Tenpierik
4. Baetens

VIP می‌دانستند [۱۰]. شی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ بهینه‌ترین مقدار را برای رسانایی حرارتی در هسته آیروزل با چگالی ۱۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب دانستند [۳۴]. کاپوزولی^۲ و همکاران با مقایسه چوب و پلی‌اورتان به‌عنوان ماده مرکزی برای VIP به برتری پلی‌اورتان به‌دلیل رسانایی حرارتی پایین‌تر رسیدند [۳۵]. چوی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ از ستون‌هایی به‌عنوان تکیه‌گاه در بین لایه‌های هسته VIP استفاده کردند تا با رهاکردن ماده مرکزی از بار پرس، باعث کاهش هدایت حرارتی مؤثر شوند [۳۶]. در سال ۲۰۱۷ لیانگ^۴ و همکاران به تقویت آیروزل با فیبر شیشه‌ای برای افزایش مقاومت مکانیکی برای استفاده در هسته VIP پرداختند. طبق نتایج آن‌ها، تقویت ۳٪ حجمی آیروزل با فیبر شیشه‌ای، باعث بهبود مقاومت فشاری از ۰/۱ به ۲ مگاپاسکال شد، درحالی‌که رسانایی حرارتی آن با افزایش ناچیزی به ۰/۰۰۳۹ وات بر متر کلون رسید. هم‌چنین، توانستند با تقویت ۶/۶٪ حجمی آیروزل با فیبر شیشه‌ای به رسانایی حرارتی ۰/۰۰۳۹ وات بر متر کلون برسند. آنان این درصد را بهینه‌ترین میزان تقویت برای رسیدن به پایین‌ترین رسانایی حرارتی دانستند و تقویت بیشتر از ۲۰٪ حجمی را به‌دلیل افزایش رسانایی صحیح ندانستند. آن‌ها، هم‌چنین حداکثر چگالی آیروزل را برای استفاده در هسته VIP، ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب اعلام کردند؛ زیرا بیشتر از این مقدار افزایش رسانایی حرارتی و ضخامت عایق و کاهش عملکرد عایق در پی دارد [۷]. فزمایر^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۲ سه ماده عایق آیروزل، پودر پرلیت^۶ و حباب شیشه‌ای^۸ را به‌طور مقایسه‌ای آزمایش کردند. بالاتر از ۱۰۰۰ میلی‌تور در ناحیه خلأ نرم تا فشار محیط تمامی مواد آیروزل‌دار کارآمدتر هستند [۲۷]. کروکر^۹ و همکاران، پسماندهای صنعتی باقی‌مانده از صنعت آلومینیوم^{۱۰} را به‌عنوان یک جای‌گزین جدید برای اکسید سیلیس در هسته‌های VIP بررسی کردند و به هدایت حرارتی ۰/۰۰۵۸ وات بر متر کلون رسیدند [۳۷]. لیانگ^۴ و همکاران نیز، با استفاده از کامپوزیت خمیر چوب/فیبر شیشه‌ای با نسبت ۵۰٪ به‌عنوان ماده مرکزی VIP توانستند به رسانایی حرارتی ۰/۰۰۴۶۹

1. Xie
2. Capozzoli
3. Choi
4. Pillar
5. Liang
6. Fesmire
7. Pearlite
8. Glass Bubble
9. Corker
10. Aluminium Anodizing Sludge-ALW

وات بر متر کلون برسند. در راستای کاهش انتقال حرارت، تحقیقاتی در رابطه با جاذب‌ها انجام شده است. بائتنس و همکاران در ۲۰۱۱ با افزودن کربن سیاه به هسته آیروزل باعث بهبود عملکرد VIP با جذب و کاهش انتقال حرارت تشعشعی شدند؛ آن‌ها، با اضافه کردن پودر کاربید سیلیکون نیز به این نتیجه رسیدند [۱۰]. Alam و همکاران نیز اکسید آهن را جاذب مناسب تشعشع معرفی کردند [۱۲]. ژنگ^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۷ با مقایسه سه نوع جاذب تشعشع کربن، سیلیسیم کاربید و تیتانیوم دی‌اکسید دریافتند که ذرات کربن بهترین عملکرد را در کاهش انتقال حرارت تشعشعی دارد، اما عملکرد آن در دمای بالا بسیار ضعیف و در معرض اکسایش بود. دو جاذب سیلیسیم کاربید و تیتانیوم دی‌اکسید، عملکرد مناسب در بازتاب تشعشعات حرارتی داشتند. به‌دلیل بالاتر بودن رسانایی حرارتی سیلیسیم کاربید نسبت به تیتانیوم دی‌اکسید، رسانایی کل آیروزل سیلیکا با جاذب سیلیسیم کاربید بیشتر از تیتانیوم دی‌اکسید است. پس در میان این سه جاذب تشعشع، تیتانیوم دی‌اکسید دارای عملکرد ضد تشعشع مناسب و پایداری عالی در دمای بالا است؛ بنابراین، استفاده از آن در صنعت توصیه شده است. آن‌ها هم‌چنین اکسید کبالت و اکسید کلسیم را به‌عنوان جاذب رطوبت و گازهای احتمالی باقی‌مانده یا نفوذ کرده معرفی کردند [۱۶]. برای کاهش انتقال حرارت جابه‌جایی VIP راه‌کارهای متنوعی وجود دارد. یکی از این راه‌کارها پر کردن منافذ هسته با گازهای کم‌رسانا تر نسبت به هوا قبل از خلأگردن است. سان^{۱۲} و همکاران در سال ۲۰۰۹ برای رسیدن به کم‌ترین رسانایی حرارتی، هسته VIP‌ها را با گازهای آرگون، نیتروژن، هلیوم و دی‌اکسید کربن پر و سپس آن‌ها را خلأ کردند تا گازهای کم باقی‌مانده ضریب انتقال حرارت پایین‌تری نسبت به هوا داشته باشند؛ نتایج نشان داد که آرگون در میان این چهار نوع گاز کم‌ترین میزان انتقال حرارت به‌عنوان گاز باقی‌مانده را دارد. دلیل این نتیجه پایین‌تر بودن ضریب تطبیق انرژی^{۱۳} (نسبت انرژی انتقال داده شده به وسیله گاز به کل انرژی درونی خود حین برخورد با مانع) گاز آرگون نسبت به سایر گازهای نام‌برده است [۲۹]. بوافو^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای تقویت حفاظ VIP از فیلم پلی‌اتیلن ترفتالات

11. Zheng
12. Sun
13. Energy Accommodation Coefficients-EAC
14. Boafu

سانتیمتر مکعب استفاده کردند؛ نتایج آن‌ها افزایش ۱۱۰/۸٪ انتقال حرارت ناشی از رسانایی هدایتی حفاظ را نشان داد [۴۱]. همان‌طور که گفته شد، MLI نوع خاصی از VIP است که در فشارهای بسیار پایین استفاده می‌شود. در این زمینه نیز به دلیل کاربردهای بالای آن، مانند صنایع برودتی و هوافضا، تحقیقاتی انجام شده است. دنگ^۴ و همکاران طی آزمایش‌های خود دریافتند که افزایش چگالی لایه‌ها در هر سانت از MLI باعث افزایش رسانایی حرارتی عایق می‌شود. طبق گزارش آن‌ها، بهینه‌ترین حالت MLI با تعداد لایه ۵۰-۴۰ و چگالی لایه ۲۵ سانتیمتر/است [۳۰]. در جدول (۳) خلاصه اقدامات و نوآوری‌های انجام شده در حوزه VIP آورده شده است.

برای بهبود استحکام کششی و مقاومت در برابر دمای پایین استفاده کردند [۳۸]. باتارد^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به مدل‌سازی رفتارهای هیدروترومالی حفاظ و هسته پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عامل تعیین‌کننده فشار جزئی بخار آب است و نه رطوبت نسبی. دمای پایین و شرایط مرطوب نسبت به دمای بالا و شرایط خشک، مطلوب‌تر است [۳۹]. لاکاتوس^۲ با قراردادن EPS به عنوان لایه حفاظتی در دو طرف VIP توانست ضمن کاهش اثر پل حرارتی، مقدار انتقال حرارت کلی را تا ۷۰٪ کاهش دهد [۴۰]. در سال ۲۰۲۰ برای نشان دادن اثر حفاظ آلومینیومی در انتقال حرارت، شانگ مائو^۳ و همکاران از فویل ۱۰ میکرومتر برای پانل ۳۰*۳۰*۱

جدول ۳. اقدامات و نوآوری‌های انجام شده در زمینه VIP.

Table 3. Measures and innovations made in the field of VIP.

Research done – Consumables	Result	Year	Reference
Making double wall vacuum containers without core	The invention of flask	1904	[31]
Making the first VIP with a glass fiber core (the first precise patent)	VIP	1955	[32]
The first use of nanomaterials as the core of VIP	VIP	1966	[32]
Using silica nanopowder as VIP core	Inherent drying, reducing thermal conductivity at 10 mbar pressure	2009	[10]
Filling the VIP core material with monoatomic gases (nitrogen, argon, krypton and xenon)	Lower thermal conductivity of noble gases than air	2009	[29]
Adding silicon carbide powder to VIP core material	Efficient radiation absorber	2010	[10]
Using flexible silica aerogel blanket as VIP core	Reduce heat transfer	2010	[10]
Adding carbon black to the core of the flexible aerogel blanket in VIP	Absorption more radiative heat transfer	2010	[10,13]
Use of iron oxide inside VIP	High absorption and reflection of radiation	2011	[12]
Determining density of 120 kg/m ³ aerogel inside the core	The most optimal value for the lowest thermal conductivity	2013	[42]
Increasing the insulation thickness to the optimal value	Reducing the heat transfer coefficient	2014	[38]
Use of PET in VIP envelope	Improved tensile strength	2014	[38]
Comparison of wood and polyurethane as VIP core	Superiority of polyurethane due to reduced conductivity	2015	[35]
Loading pillar into our VIP between core layers	Removing pressure caused by vacuuming on the VIP core and reducing thermal conductivity	2016	[36]
Comparison of carbon, silicon carbide and titanium dioxide as radiation absorbers in VIP core	The superiority of titanium dioxide	2017	[16]

1. Batard

2. Lakatos

3. Shang Mao

4. Deng

Research done – Consumables	Result	Year	Reference
Use of cobalt oxide and calcium oxide inside VIP	Moisture and gas absorption	2017	[16]
Using silicagel composite reinforced with 3% vol glass fiber	Increasing the compressive strength to 2 MPa	2017	[7]
Using silica gel composite reinforced with 6.6% vol glass fiber	Conductivity 0.0039 W/mK at a pressure of 1 pa	2017	[7]
Increasing the density of layers per centimeter of MLI	Increasing the thermal conductivity of MLI	2017	[30]
Modeling the longterm moisture-temperature behavior of VIP	Determining the partial pressure of water vapor proportion to relative humidity	2018	[39]
Making MLI with the number of layers 40-50 and layer density 25/cm	The most optimized MLI tested	2019	[30]
Investigating the effect of 10 μm foil as a envelope on a panel of 30*30*1 cm^3	Increase the amount of heat transfer up to 110.8%	2020	[41]
Using EPS as a protective layer on both sides of the VIP	Reduction of overall thermal conductivity and thermal bridging	2021	[40]
Comparison of glass bubble, perlite powder and aerogel particle as VIP core	Superiority of aerogel particle in the range of soft vacuum to ambient pressure	2022	[27]
Using aluminum industrial waste in VIP core	Desirable alternative to silicon oxide with thermal conductivity of 0.0058 W/mK	2023	[37]
Using wood pulp/glass fiber composite with one to one ratio as VIP core	Achieving thermal conductivity of 0.00469 W/mK	2023	[43]

۹. کاربردهای VIP

پانل‌های عایق تحت خلأ در حوزه ساختمان، لوازم خانگی، یخچال‌ها، وسایل حمل‌ونقل، ظروف مواد حساس به دما، صنایع برودتی، صنایع هوافضا و غیره کاربرد دارد [۱۳]. برخی از این کاربردها عبارت‌است از:

- چارچوب درها و پنجره‌ها

- دیوارهای تیغه‌ای و غیر باربر

- سقف، ایوان و تراس

- تأسیسات ساختمان [۱۰]

- بدنه کانتکس‌ها و ون‌های مسافرتی

- بدنه ماکروفورها و پلوپزها

- یخچال و فریزرهای خانگی، صنعتی، فروشگاه‌ها، آزمایشگاهی و اتومبیل‌ها

- یخچال و فریزرهای ماشین‌های حمل‌ونقل مواد غذایی یا مواد حساس به دما مثل کشتی‌های صیدی

- بدنه قطار، مترو، اتوبوس، کامیون و سایر وسایل حمل و نقلی

- Coolboxها [۴۴]

- باکس‌های تحویل غذا

- باکس‌های حمل‌ونقل خون، واکسن و سایر موارد پزشکی [۱۳]

- وسایل حمل‌ونقل برودتی (نیترژن مایع، هیدروژن مایع، اکسیژن مایع، آرگون، LPG، LNG، کربن دی‌اکسید) مانند مخازن، کشتی‌ها، تریلی‌ها و غیره

- مخازن سوخت فضاپیماها

- ماشین‌های اکتشاف فضا [۲۷]

در سطح جهانی، مصرف انرژی الکتریکی یخچال‌های خانگی تقریباً ۶٪ از کل انرژی مصرف‌شده است. تقریباً ۵۰٪ از انرژی خنک‌کننده با گرمای منتقل‌شده از راه دیوارهای یخچال اتلاف می‌شود. استفاده از پانل‌های عایق خلأ به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی کلی آن‌ها را کاهش می‌دهد و در عین حال، حجم داخلی قابل استفاده را به حداکثر می‌رساند [۴۵]. Cool box جعبه‌ای است که با استفاده از عایق، دمای آن و ماده داخل آن حفظ می‌شود. کیفیت بالای عایق به‌کاربرده‌شده باعث حفظ دمای مواد در مدت زمان طولانی‌تر می‌شود. Cool box‌های رایج که اغلب از جنس EPS است به‌دلیل

- افزایش پل حرارتی ساختاری به دلیل پوشش و کاهش عملکرد حرارتی در اثر این پل در صورت رعایت نکردن جزئیات ساخت
 - انعطاف کم و عدم امکان برش پانل‌ها به هر شکل و اندازه و نیاز به ساخته شدن از قبل [۱۰].

۱۱. سازوکارهای انتقال حرارت VIP با هسته پتوی منعطف آبروژل نانومتخلخل

انتقال حرارت داخل VIP شامل تشعشع، هدایت و جابه‌جایی گاز درونی (لغزش کنار هم در حفره‌های نانویی) است. در شکل (۱۰) سازوکارهای انتقال حرارت در VIP حاوی آبروژل نانومتخلخل تقویت‌شده با فیبر (پتوی منعطف آبروژل) نشان داده شده است و با استفاده از معادله (۲) می‌توان میزان انتقال حرارت کلی (Q_t) را به دست آورد [۱۰، ۱۳]:

$$Q_t = Q_{sol} + Q_g + Q_{rad} \quad (2)$$

هدایت جامد (Q_{sol}) از راه اسکلت ماده مرکزی رخ می‌دهد که در آن گرما از راه تماس فیزیکی ذرات منتقل می‌شود. ساختار سیلیسی داخل آبروژل، ذاتاً رسانایی حرارتی پایینی دارد و اسکلت داخلی، دارای تخلخل و پیچ‌وخم‌های زیادی است که منجر به یک مسیر طولانی و غیر مستقیم برای انتقال حرارت هدایت می‌شود [۱۸]؛ بنابراین، انتخاب مناسب مواد جامد و چگالی آن مهم است [۱۰، ۱۳]. انتقال حرارت گاز (Q_g) از راه فرایندهای جابه‌جایی و رسانایی در گازها انجام می‌شود. انتقال حرارت جابه‌جایی از مهم‌ترین دلایل انتقال حرارت در مقادیر زیاد است که ناشی از حرکت آزاد هوا، به دلیل تفاوت چگالی هوای سرد و گرم است [۲۹]. شدت آن

عدم ایجاد محیط سرد برای مدت زمان کافی (بیشینه یک روز) و عدم انعطاف بدنه و شکنندگی، برای عملکرد بهتر با VIP جای‌گزین می‌شود [۴۴]. طبق پروتکل کیوتو، کشورهای متعهد باید در ساخت ساختمان‌ها از عایق‌های قوی استفاده کنند که ممکن است ضخامت بالایی داشته باشند. استفاده از VIP می‌تواند این ضخامت را تا ۲ سانتیمتر کاهش دهد که منجر به بازده بالای اقتصادی (با افزایش متراتر باقی‌مانده مسکونی) نیز می‌شود [۱۰، ۱۳]. در برخی کاربردها مانند صنایع هوافضا نیاز است که عایق استفاده‌شود که در فشار اتمسفر تا خلأهای بالا کارایی عایق حرارتی بالایی داشته باشد. در مأموریت‌های حاوی مخازن برودتی، به نگهداری از آن در سکوی پرتاب در فشار محیط و ذخیره‌سازی طولانی‌مدت در خلأ فضا نیاز است. بنابراین، باید از عایق مناسب برای تمامی خلأهای مورد نیاز استفاده کرد. استفاده از پانل با هسته پتوی منعطف آبروژل گزینه مناسبی برای این کاربردها است. در شکل (۹) تصاویر برخی از این کاربردها مشاهده می‌شود.

۱۰. ضعف‌های VIP

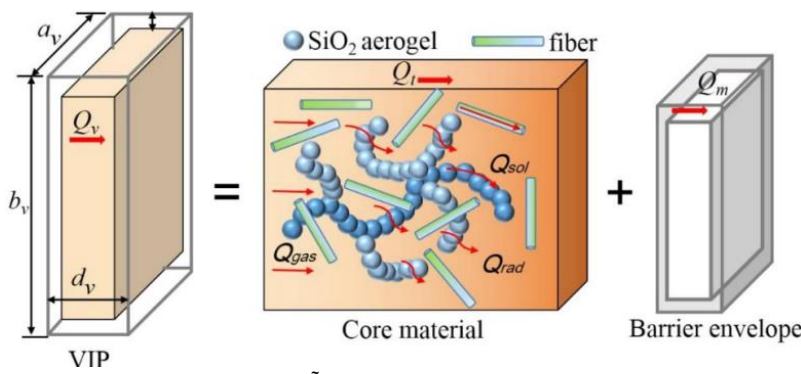
در کنار برتری‌های فراوان VIP، نقاط ضعفی وجود دارد که باید به آن دقت کرد. یکی از محدودیت‌های VIP در طول عمر آن است که به‌طور قطعی نمی‌شود آن را تعیین کرد و اکثر تولیدکنندگان نمی‌توانند اطلاعات کاملی راجع به آن بدهند. از سایر حساسیت VIP می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- شکنندگی و حساسیت بسیار بالای فویل و آب‌بندی حرارتی
- دشواری حفظ خلأ در خلأهای بسیار بالا
- کاهش عملکرد حرارتی در طول زمان به دلیل نفوذ در صورت استفاده نکردن از جاذب‌های مناسب



شکل ۹. برخی از کاربردهای VIP [۱۰، ۱۳، ۲۷].

Figure 9. Some applications of VIP [10, 13, 27].



شکل ۱۰. سازوکارهای انتقال حرارت در آبروژل سیلیکایی [۷].

Figure 10. Mechanisms of heat transfer in silica aerogel [7].

به صورت جداگانه توسعه داده شده و مجموع آن‌ها به عنوان معادله نهایی پیش‌بینی رفتار هدایت حرارتی در نظر گرفته می‌شود. افزایش فشار و رطوبت داخل پانل‌ها به عنوان عوامل اصلی کاهش هدایت حرارتی در گذر زمان در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند در معادلات مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت افزوده شود. هسته‌های دارای حفره‌های نانومتری حساسیت کم‌تری نسبت به تغییرات فشار نشان می‌دهند. ابعاد متغیر نانومواد از حفره‌های چندنانومتری ساختار تا حفره‌های چندمیکرومتری مابین ذرات، یکی از مهم‌ترین مشکلات مدل‌سازی انتقال حرارت در پانل‌ها است که به معادلات پیچیده‌تری نیز برای بررسی نیاز دارد. در معادله (۳) ضریب انتقال حرارت عایق پانل تحت خلأ برای هسته‌های از جنس سیلیکای نانوساختار نشان داده شده است.

$$\lambda_{cop} = \lambda_{rad} + \lambda_{sol} + \lambda_{wat} + \lambda_g + \lambda_{cpl} + \lambda_{memb} \quad (3)$$

که در آن λ_{cop} ضریب انتقال حرارت کل هسته پانل، λ_{rad} ضریب انتقال حرارت تشعشعی، λ_{sol} ضریب انتقال حرارت بخش جامد هسته جامد، λ_{wat} ضریب انتقال حرارت ناشی از بخار آب، λ_g ضریب انتقال حرارت گاز هسته، λ_{cpl} ضریب ناشی از ادغام سازوکارهای انتقال حرارت و λ_{memb} ضریب انتقال حرارت حفاظ دور هسته است. معادلات تجربی و تئوری برای هر بخش از معادله ضریب انتقال حرارت (۳) در منابع مختلف ارائه شده است که در ادامه معادلات کاربردی و ساده برای هر بخش بررسی می‌شود. جزئیات معادله (۳) برای بخش‌های مختلف انتقال حرارت معادله (۴) است که جزئیات آن در ادامه شرح داده شده است.

به نسبت میانگین مسیر آزاد مولکول‌های گاز و اندازه منافذ ماده، یعنی عدد نادسن، بستگی دارد. در آبروژل‌ها به دلیل داشتن اندازه حفره‌های نانومتری، مولکول‌های هوا نمی‌توانند حرکت آزادی درون آن‌ها داشته باشند و نوع حرکت مولکول‌ها به فرم خزشی روی دیواره‌های جامد تبدیل (نفوذ نادسن) و انتقال حرارت بسیار کم می‌شود [۴۶]. عمده تفاوت عایق‌های نانومتخلخل نسبت به عایق‌های رایج، حذف جریان انتقال حرارت جابه‌جایی، به دلیل ابعاد نانومتری حفره‌ها است [۱۸، ۴۶]. انتقال حرارت تشعشعی (Q_{rad}) به شکل امواج الکترومغناطیسی است و از همه سطوح ساطع می‌شود که می‌توان آن را با افزودن جاذب تشعشع به ماده مرکزی کاهش داد [۲۱، ۴۲]. پس از کاهش رسانایی جامد به حداقل، تابش به سازوکار اصلی انتقال حرارت در سامانه‌های خلأ تبدیل می‌شود [۲۷]. در بخش حفاظ نیز، انتقال حرارت ناشی از پل حرارتی^۱ است که به اتصال حرارتی بین محیط داخل و خارج عایق، به دلیل تفاوت در هدایت حرارتی هسته و حفاظ پل حرارتی می‌گویند [۱۲]. هم‌چنین، پل حرارتی ممکن است بین دو حفاظ مجاور به دلیل عدم یکسان بودن لبه‌های هر حفاظ و ایجاد شکاف هوا رخ دهد [۱۰].

۱-۱۱ مدل‌سازی انتقال حرارت در پانل تحت خلأ حاوی

نانومواد سیلیکایی

هدایت حرارتی عایق پانل تحت خلأ عمدتاً به ماده هسته، حفاظ و اندازه آن بستگی دارد. انتقال حرارت با سازوکارهای هدایت جامد، هدایت و جابه‌جایی گاز و تشعشع رخ می‌دهد. در مدل‌سازی انتقال حرارت در پانل‌ها، عمدتاً معادلاتی برای هر سازوکار انتقال حرارت

1. Thermal Bridge

منبع [۴۷] دارد. ρ_{sol} دانسیته سیلیکای متخلخل است. در معادله (۸) نحوه محاسبه ضریب انتقال حرارت فاز گاز داخل هسته در فشارهای مختلف ارائه شده است.

$$\lambda_g = \varepsilon \frac{\lambda_g^0(T)}{1 + \left(\frac{p_{1/2}(T)}{p}\right)} \quad (۸)$$

در این رابطه، λ_g^0 ضریب رسانایی حرارتی گاز آزاد در دمای مشخص و ε درصد تخلخل نانومتری است. در سیلیکای نانومتخلخل مانند آبروزلها درصد تخلخل بالای ۹۵ درصد است و در برخی مدلها معادل ۱ قرار داده می شود.

$p_{1/2}$ فشار است در شرایطی که ضریب انتقال حرارت برابر با نصف ضریب انتقال حرارت محیط بدون تخلخل باشد. p فشار هسته است. در شرایط استفاده از گرانولهای آبروزل فرمولهای پیچیده تری برای در نظر گرفتن نانوحفره‌های سازنده ساختار آبروزل و میکرو حفره‌های مابین گرانولهای آبروزل وجود دارد [۴۷].

$$\lambda_{wat} = Bu \quad (۹)$$

مقدار u در معادله (۹) نشان دهنده درصد جرمی آب موجود در سامانه نسبت به مقدار سیلیکا است. اثر رطوبت در رسانایی حرارتی به وسیله تیمهای مختلفی اندازه گیری شده است. B مقدار تغییرات ضریب انتقال حرارت کل نسبت به تغییرات مقدار رطوبت در عایق است. مقادیر تجربی B در جداول منبع [۴۷] داده شده است. این مقادیر برای سیلیکاهای مختلف و فشارهای متفاوت متغیر است.

$$\lambda_{memb} = \frac{Pd}{A} \Psi_{memb}(T) \quad (۱۰)$$

در معادله (۱۰) P محیط پانل، d ضخامت پانل، A مساحت پانل و Ψ_{memb} ضریب پل حرارتی خطی است که به ضخامت فویل سازنده حفاظ، تعداد لایه‌ها در لبه پانل و غیره بستگی دارد. در منبع [۴۷] برای انواع حفاظها با تعداد لایه و ضخامت‌های مختلف فویل سازنده مقادیر مربوط به ضریب پل حرارتی خطی ارائه شده است که مابین ۲ الی ۱۰۰ میلی وات بر متر کلوبین می تواند متغیر باشد.

$$\lambda_{tot}(T, p, u) = \frac{16}{3} \frac{\sigma n^2 T^3}{\rho_{app} e(T)} + \frac{\rho_{sol}}{\rho_{sil}} r' \lambda_{sil} + Bu + \varepsilon \frac{\lambda_g^0(T)}{1 + \left(\frac{p_{1/2}(T)}{p}\right)} + \frac{Pd}{A} \Psi_{memb}(T) \quad (۴)$$

در معادله (۴) λ_{tot} ضریب انتقال حرارت کل هسته است که بر حسب متغیرهای دما، فشار و میزان رطوبت کار می کند. در معادله (۵) معادله ضریب انتقال حرارت تشعشعی ارائه شده است.

$$\lambda_{rad} = \frac{3}{16} \frac{\sigma n^2 T^3}{E(T)} \quad (۵)$$

در این معادله σ ثابت استفان - بولتزمن، n اندیس شکست (برای سیلیکای مات حدود ۱ است)، T دمای تابشی که از رابطه (۶) به دست می آید و $E(T)$ ضریب میرایی انتقال است که در منبع [۴۷] مقدار آن ارائه شده است و ناهمسانی تفرق را نشان می دهد. برای مثال، ضریب انتقال حرارت تشعشعی برای هسته ذرات نانومتری سیلیکای مات شده با کربن سیاه حدود ۰/۷ وات بر متر کلوبین است که حدود سه برابر کمتر از حالت بدون مات کننده است.

$$T = \sqrt[3]{(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)/4} \quad (۶)$$

در معادله (۶) مقادیر T_1 و T_2 نشان دهنده دمای دو طرف هسته پانل است. معادله (۷) برای محاسبه ضریب انتقال حرارت هسته پانل تحت خلأ با سیلیکای نانومتری ارائه شده است.

$$\lambda_{sol} = \frac{\rho_{sol}}{\rho_{sil}} r' \lambda_{sil} \quad (۷)$$

که در این رابطه:

$$\lambda_{sil} = 1/3 \rho_{sil} C_{sil} L_{sil} v_{sil}$$

که در آن ρ_{sil} دانسیته سیلیکای غیر متخلخل، C_{sil} ظرفیت گرمایی سیلیکا، L_{sil} متوسط پویش آزاد مولکولی (حدود ۱ نانومتر) و v_{sil} سرعت فونونها بر حسب متر بر ثانیه است که در سیلیکای غیر متخلخل همانند سرعت صدا در این مواد است. ضریب r' مقادیری مابین ۰/۷ الی ۰/۰۸۳ برای نمونه‌های مختلف طبق

خیلی پایین کم تر می شود. ایجاد خلأ در حد چند میلی بار در سیلیکای نانوحفره کافی است تا انتقال حرارت گاز را به صفر نزدیک کند که درمقایسه با مواد با حفره های بزرگ که نیاز به خلأ حدود ۱ پاسکال دارند، برتری بسیار بزرگی است. استفاده از سیلیکای آب دوست با سطح تماس بالا و جذب رطوبت می تواند تأثیر بسیار زیادی در افزایش انتقال حرارت داشته باشد. پل های حرارتی ناشی از حفاظ در انتقال حرارت مهم است و باید مد نظر قرار بگیرند. با ساختن پانل ها در ابعاد بزرگ تر و نحوه مناسب قرار دادن آن ها در کنار هم می توان اثر پل حرارتی را کاهش داد. با انجام این کارها اثر پل حرارتی را می توان به ۱ و حتی به ۰/۲ میلی وات بر متر کلوین کاهش داد. در منابع دیگری نیز معادلات تجربی مختلفی برای حالت های انتقال حرارت در آبروژل ها و سیلیکای نانومتخلخل ارائه شده است که می توانند در شبیه سازی ها و مدل ها به کار روند [۴۸].

۱۲. تولیدکنندگان VIP





تعدادی از شرکت های سازنده VIP در جدول (۴) جمع آوری شده است.

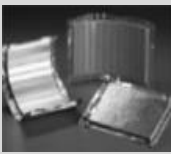
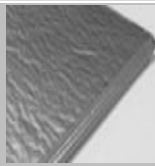

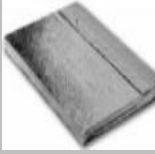
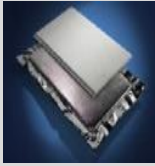


بررسی مدل های مختلف نشان می دهد که در هسته پانل با افزودن انواع مواد مات کننده مانند کربن سیاه انتقال حرارت تشعشعی کاهش محسوسی می یابد. این مات کننده ها از راه تفرق، جذب و بازتاب تشعشع سبب جلوگیری از انتقال حرارت تابشی می شوند. مدل ها نشان می دهند که علاوه بر تخلخل بالا و نانومتری مؤثر در کاهش ضریب انتقال حرارت، پیچیدگی مسیرهای ارتباطی حفره ها، تکه های گرانولی کنار هم و غیره نیز در این کاهش مؤثر هستند. ضریب انتقال حرارت برای نانوذرات سیلیکا با دانسیته ۱۵۰ الی ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای سیلیکای سنتز شده به روش شعله ای حدود ۲/۵ الی ۴ میلی وات بر متر کلوین بوده و برای ذرات سیلیکای رسوبی یا فرم آبروژل مقادیر ۱/۵ الی ۲/۵ میلی وات بر متر کلوین بوده و تغییرات آن با دما مشابه تغییرات سیلیکای بالک گزارش شده است.

نتایج مدل سازی های نشان داده اند که انتقال حرارت گاز با کاهش فشار، کاهش می یابد که ناشی از به تلفات دادن مولکول ها در حفره های نانومتری هسته است. میزان فشاری که سبب صفرشدن انتقال حرارت گاز شود به اندازه حفره ها بستگی دارد که اثر نادرست است و با کاهش اندازه حفره ها در ابعاد نانومتری نیاز به فشارهای

جدول ۴. برخی از شرکت های سازنده VIP در جهان.

Table 4. Some VIP manufacturing companies in the world.

Manufacturer	Thermal conductivity (mW/mK)	Internal pressure	Dimensions (cm)	Thickness (mm)	Materials	Aging	Image
Xiamen Goot Advanced Material Co-China	4	Less than 0.1 pa	Max 70*160	10-35	Core: glass wool-board aerogel	10-15	
Rparts-USA	-	-	4.6*4.6	25.6	-	-	
va Q tec AG-Germany	2.8-9	Less than 5 mbar, Possible pressure increase: 1 year/mbar	100*130 100*120 100*60 50*60 175*40 100*25	30-50	Core: polyurethane foam - sheep's wool - aerogel powder Envelope: aluminum foil	15-60	 

Manufacturer	Thermal conductivity (mW/mK)	Internal pressure	Dimensions (cm)	Thickness (mm)	Materials	Aging	Image
Unifrax Corporation-USA	3.75	-	98.49 122.5*49	10-30	Core: aerogel powder and radiation absorber Envelope: multilayer plastic	-	
LG Hausys VIP- Germany	4	-	Max 70*180	10-30	Core: glass fiber board Envelope: multilayer aluminum foil	-	
Caralon Global-England	3.8	Less than 1 mbar	120*30 100*25	3-20	Core: glass wool	Up to 45	
NEOFAS AG-Switzerland	4.5-8	-	100*30 80*30	15*40	Core: Silica fumed Envelope: multilayer plastic	-	
Microtherm-Belgium	4.2	less than 5 mbar	Min 80*140	60*40	Core: reinforced aerogel and radiation absorber Envelope: multilayer plastic	-	
Porextherm Dämmstoffe GmbH-Germany	4.3-8	Less than 5 mbar, Possible pressure increase: 1 year/mbar	220*15 150*15 100*25 50*25	10-50	Core: silicon oxide and radiation absorber Envelope: aluminum or multilayer plastic	-	
Qingdao Kerui New Environmental Materials Co-China	4	Less than 0.001 pa	180*15 60*10	۵-۱۰	Core: glass wool	-	

۱۳. بررسی اقتصادی VIPها

رشد مرکب سالانه (CAGR) ۸/۴٪ رشد کند. گزارش «ساخت و ساز جهانی» ۲۰۳۰ به وسیله Economics Oxford پیش‌بینی می‌کند که حجم تولید ساخت‌وساز تا سال ۲۰۳۰ با ۸۵٪ رشد به ۱۵/۵ تریلیون دلار در سراسر جهان خواهد رسید [۱۹]. این احتمال وجود دارد که استفاده از VIPها در صنعت ساخت‌وساز به دلیل کاهش

VIPهای مبتنی بر اکسید سیلیس با هزینه‌های خرده‌فروشی بالاتر از ۵۳۰۰ €/m³ هنوز بسیار گران هستند [۴۹]. بازار جهانی VIPها که در سال ۲۰۲۰ حدود ۲/۷ میلیارد دلار برآورد شده بود، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۷ به ۱۰ میلیارد دلار برسد و با نرخ

1. Growing at a Compound Annual Growth rate

ضخامت اجزای ساختمان حتی فراتر از مقادیر پیش‌بینی شده افزایش یابد. از طرفی، سرمایه‌گذاری انرژی تجسم‌یافته نسبی^۱ در VIPها نسبت به سایر مواد عایق تا ۱۰ برابر کمتر است [۵۰]. انرژی تجسم‌یافته مجموع تمام انرژی مورد نیاز تا تولید تا نصب محصول در مقایسه با مقدار انرژی صرفه‌جویی توسط آن است؛ به عبارت دیگر، با وجود هزینه‌های بالای تولید VIP و حساسیت زیاد برای نگهداری و حفظ خلأ آن، از جهت مصرف انرژی کمتر نسبت به عایق‌های سنتی اقتصادی‌تر است. قابل بازیافت بودن عایق‌های پانل تحت خلأ سبب زیست‌سازگاری بیشتر و عدم تولید پسماند مضر است که در مجموع کارایی و راندمان این نوع عایق‌ها را افزایش می‌دهد.

۱۴. نتیجه‌گیری

مصرف انرژی یکی از چالش‌های مهم در جهان معاصر است و با توجه به رشد جمعیت و پیشرفت فناوری، نیاز به انرژی افزایش یافته است. عایق‌های سنتی، به ویژه در ساختمان‌ها، عمدتاً از موادی مانند پشم‌های معدنی یا پلی‌استیرین تشکیل شده‌اند که با توجه به نیاز امروز جهان، کارایی محدودی در جلوگیری از انتقال حرارت دارند. از این رو، استفاده از عایق‌های تحت خلأ به عنوان یک جایگزین پیشنهادی مطرح شده است.

ایجاد فضای خلأ و کاهش فشار در ماده مرکزی VIP، رسانایی حرارتی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و عایق حرارتی با کارایی بالاتر و اثرگذاری مطلوب‌تر به وجود می‌آید. تأثیر کاهش فشار در عایق‌های تحت خلأ تا محدوده معینی قابل توجه است؛ عبور از این محدوده تغییر زیادی ایجاد نمی‌کند و حتی می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌ها شود. از این رو، انتخاب موادی با اندازه مناسب و حساسیت کمتر به فشار، امری ضروری است تا بهترین عملکرد حرارتی در محیط خلأ به دست آید.

در این زمینه، آبروزل‌ها به دلیل ویژگی‌های خاص خود امکان ارائه عملکرد بسیار بهتری را در شرایط خلأ فراهم می‌کنند. عایق حرارتی تحت خلأ که حاوی آبروزل سیلیکایی نانومتخلخل است، به دلیل اندازه منافذ ریز و تخلخل بالا، انتقال حرارت جابه‌جایی گاز را به حداقل می‌رساند و این امکان را فراهم می‌آورد که حتی در خلأهای متوسط و کم عملکرد بهینه داشته باشد.

VIP حاوی آبروزل‌های سیلیکا، جای‌گزینی نوآورانه برای عایق‌های سنتی و پوشش ضعف‌های رایج آن‌ها است. برخی از این برتری‌ها عبارت است از:

- عمر مفید طولانی و نیاز بسیار کم‌تر به تعویض عایق
 - ضد حریق بودن و افزایش ایمنی آتش‌سوزی
 - کاهش بسیار زیاد ضریب انتقال حرارت و به دنبال آن کاهش مصرف انرژی
 - ضد آب بودن آن و عدم افت کارایی حرارتی ناشی از جذب رطوبت
 - ضخامت بسیار کم و اشغال نکردن فضای زیاد
 - سبکی و قابلیت حمل و انبارداری آسان
 - قابلیت بازیافت هسته پس از آسیب دیدن عایق
 - رشد نیافتن جلبک و انواع ریزندامگان بر روی عایق و غیره.
- به علاوه، ترکیب عایق VIP با هسته پتوی منعطف آبروزل و استفاده از لایه‌های بازتابنده آلومینیومی در داخل آن، امکان ایجاد یک ابرعایق با کاربرد گسترده در شرایط مختلف فشار و خلأ را فراهم می‌آورد.

مراجع

- [1] Zeynep Ulker, D. S., & Can Erkey. (2014). *Supercritical Fluid Technology for Energy and Environmental Application* (M. F. Vladimir Anikeev, Ed. 1 ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2012-0-00267-0>
- [2] Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>
- [3] Rahmani, O., Rezanian, S., Beiranvand Pour, A., Aminpour, S. M., Soltani, M., Ghaderpour, Y., & Oryani, B. (2020). An Overview of Household Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in Iran. *Processes*, 8(8), 994. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/8/994>
- [4] Dadman Yazd Company. (n.d). The impact of solar energy on the environment from <https://dadmann.com/%d8%a7%d8%ae%d8%a8%d8%a7%d8%b1/%d9%85%d8%b2%d8%a7%db%8c%d8%a7-%d9%85%d8%b9%d8%a7%db%8c%d8%a8-%d8%a7%d9%86%d8%b1%da%98%db%8c-%d8%ae%d9%88%d8%b1%d8%b4%db%8c%d8%af%db%8c-pros-and-cons-of-solar-energy/>

1. Relative Embodied Energy-EE

- [5] Labzovskii, L. D., Mak, H. W. L., Takele Kenea, S., Rhee, J. -S., Lashkari, A., Li, S., Goo, T. -Y., Oh, Y., -S., & Byun, Y. -H. (2019). What can we learn about effectiveness of carbon reduction policies from interannual variability of fossil fuel CO₂ emissions in East Asia? *Environmental Science & Policy*, 96, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.03.011>
- [6] Office of National Building Regulations of Iran. (2010). *National construction regulations of Iran, topic 19*. Iran Development Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2012-0-00267-0>
- [7] Liang, Y., Wu, H., Huang, G., Yang, J., & Wang, H. (2017). Thermal performance and service life of vacuum insulation panels with aerogel composite cores. *Energy and Buildings*, 154, 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.085>
- [8] Abdul Mujeebu, M., Ashraf, N., & Alsuwayigh, A. (2016). Energy performance and economic viability of nano aerogel glazing and nano vacuum insulation panel in multi-story office building. *Energy*, 113, 949-956. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.136>
- [9] Li, C., Li, B., Pan, N., Chen, Z., Saeed, M. U., Xu, T., & Yang, Y. (2016). Thermo-physical properties of polyester fiber reinforced fumed silica/hollow glass microsphere composite core and resulted vacuum insulation panel. *Energy and Buildings*, 125, 298-309. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.013>
- [10] Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., & Gustavsen, A. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147-172. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.005>
- [11] Kim, J. -H., Kim, S. -M., & Kim, J. -T. (2017). Simulation Performance of Building Wall with Vacuum Insulation Panel. *Procedia Engineering*, 180, 1247-1255. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.286>
- [12] Alam, M., Singh, H., & Limbachiya, M. C. (2011). Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions. *Applied Energy*, 88(11), 3592-3602. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.040>
- [13] Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2014). Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy*, 116, 355-375. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.032>
- [14] Alam, M., Singh, H., Brunner, S., & Naziris, C. (2014). Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core. *Energy and Buildings*, 69, 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.027>
- [15] Di, X., Xie, Z. g., Chen, J., & Zheng, S. (2020). Residual gas analysis in vacuum insulation panel (VIP) with glass fiber core and investigation of getter for VIP. *Building and Environment*, 186, 107337. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107337>
- [16] Yu, W. S., Zhu, Z. W., Chen, J., & Zheng, Q. (2016). Synthesis of the Getter for Vacuum Insulation Panels (VIPs) used on Marine Reefer Containers. *MATEC Web of Conferences*, 67, 06105. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166706105>
- [17] Liang, Y., Wu, H., Huang, G., Yang, J., & Ding, Y. (2017). Prediction and Optimization of Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panels with Aerogel Composite Cores. *Procedia Engineering*, 205, 2855-2862. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.909>
- [18] Yamamoto, H., & Ogura, D. (2022). Dependence of gas permeation and adsorption on temperature in vacuum insulation panels (VIPs) containing getter materials. *Journal of Building Physics*, 45(5), 604-628. <https://doi.org/10.1177/17442591211017154>
- [19] Resalati, S., Okoroafor, T., Henshall, P., Simões, N., Gonçalves, M., & Alam, M. (2021). Comparative life cycle assessment of different vacuum insulation panel core materials using a cradle to gate approach. *Building and Environment*, 188, 107501. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107501>
- [20] Karami, P., Al-Ayish, N., & Gudmundsson, K. (2015). A comparative study of the environmental impact of Swedish residential buildings with vacuum insulation panels. *Energy and Buildings*, 109, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.031>
- [21] Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>
- [22] Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2011). Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 43(4), 761-769. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.012>
- [23] Yousefi amiri, T., Bargozin, H., & Mahmoudi, R. (2018) "Aerogel-Based Renders and Plasters as New Insulating Materials in Buildings", *Iranian Chemical Engineering Journal*, 17(97),76-85, [In Persian], [Online]. Available: https://www.ijche.ir/article_112627_b6409fdd6e2d6fbc4341ef1f1882363e.pdf

- [24] Yousefi Amiri, T., Bargozin, H., & Moghaddas, J. S. (2020). Aerogel-Based Renders and Plasters as New Insulating Materials in Buildings, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 19(108), 49-69, [In Persian]. https://www.ijche.ir/article_113411_cb0c06d23a37d3c53a1b73a87f1c1e89.pdf
- [25] Liang, Y., Ding, Y., Liu, Y., Yang, J., & Zhang, H. (2020). Modeling Microstructure Effect on Thermal Conductivity of Aerogel-Based Vacuum Insulation Panels. *Heat Transfer Engineering*, 41(9-10), 882-895. <https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1576443>
- [26] Karadagli, I., Schulz, B., Schestakow, M., Milow, B., Gries, T., & Ratke, L. (2015). Production of porous cellulose aerogel fibers by an extrusion process. *The Journal of Supercritical Fluids*, 106, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.06.011>
- [27] Demko, J., Fesmire, J. E., & Shu, Q. S. (2022). *Cryogenic Heat Management*. CRC Press. <https://books.google.com/books?id=GUC9zgEACAJ>
- [28] Dye, S., Kopelove, A., & Mills, G. (2010). Integrated and Load Responsive Multilayer Insulation. *AIP Conference Proceedings*, 1218(1). <https://doi.org/10.1063/1.3422464>
- [29] Sun, P. J., Wu, J. Y., Zhang, P., Xu, L., & Jiang, M. L. (2009). Experimental study of the influences of degraded vacuum on multilayer insulation blankets. *Cryogenics*, 49(12), 719-726. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2009.09.003>
- [30] Deng, B., Yang, S., Xie, X., Wang, Y., Bian, X., Gong, L., & Li, Q. (2019). Study of the thermal performance of multilayer insulation used in cryogenic transfer lines. *Cryogenics*, 100, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.01.005>
- [31] Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., & Flores-Colen, I. (2020). A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. *Applied Energy*, 257, 114028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114028>
- [32] Fricke, J., Heinemann, U., & Ebert, H. P. (2008). Vacuum insulation panels—From research to market. *Vacuum*, 82(7), 680-690. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.10.014>
- [33] Tenpierik, M. (2010). *Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions*. Singelstraat 1c.
- [34] Tao Xie, Y. -L. H., Zi-Jun H. (2012). Theoretical study on thermal conductivities of silica aerogel composite insulating material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58, 540-552. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.016>
- [35] Capozzoli, A., Fantucci, S., Favoino, F., & Perino, M. (2015). Vacuum Insulation Panels: Analysis of the Thermal Performance of Both Single Panel and Multilayer Boards. *Energies*, 8(4), 2528-2547. <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/4/2528>
- [36] Choi, B., Yeo, I., Lee, J., Kang, W. K., & Song, T. -H. (2016). Pillar-supported vacuum insulation panel with multi-layered filler material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 902-910. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.032>
- [37] Corker, J., Marques, I., Resalati, S., Okoroafor, T., Maalouf, A., Fu, Z., & Fan, M. (2023). Al-rich industrial waste as new alternative of fumed silica for the manufacture of vacuum insulation panels for building energy conservation. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137854>
- [38] Boafu, F. E., Chen, Z., Li, C., Li, B., & Xu, T. (2014). Structure of vacuum insulation panel in building system. *Energy and Buildings*, 85, 644-653. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.055>
- [39] Batard, A., Duforestel, T., Flandin, L., & Yrieix, B. (2018). Modelling of long-term hygro-thermal behaviour of vacuum insulation panels. *Energy and Buildings*, 173, 252-267. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.041>
- [40] Lakatos, Á., & Kovács, Z. (2021). Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods. *Energy and Buildings*, 236, 110771. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110771>
- [41] Mao, S., Kan, A., & Wang, N. (2020). Numerical analysis and experimental investigation on thermal bridge effect of vacuum insulation panel. *Applied Thermal Engineering*, 169, 114980. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114980>
- [42] Xie, T., He, Y. -L., & Hu, Z. -J. (2013). Theoretical study on thermal conductivities of silica aerogel composite insulating material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58(1), 540-552. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.016>
- [43] Liang, W., Di, X., Zheng, S., Wu, L., & Zhang, J. (2023). A study on thermal bridge effect of vacuum insulation panels (VIPs). *Journal of Building Engineering*, 71, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106492>
- [44] Chaitanoo, N., Ongkunaruk, P., & Leingpibul, D. (2020). The use of physical simulation to evaluate thermal properties of food containers in cold chain logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 773, 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/773/1/012018>
- [45] Verma, S., & Singh, H. (2020). Vacuum insulation panels for refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 112, 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.12.007>

- [46] Petter Jelle, B. (2016). 8-Nano-based thermal insulation for energy-efficient buildings. In F. Pacheco-Torgal, E. Rasmussen, C. -G. Granqvist, V. Ivanov, A. Kaklauskas, & S. Makonin (Eds.), *Start-Up Creation* (pp. 129-181). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00008-X>
- [47] Bouquerel, M., Duforestel, T., Baillis, D., & Rusaouen, G. (2012). Heat transfer modeling in vacuum insulation panels containing nanoporous silicas—A review. *Energy and Buildings*, 54, 320-336. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.034>
- [48] Scurlock, R. G. (2007). Development of Low-Loss Storage of Cryogenic Liquids over the Past 50 Years. In K. D. Timmerhaus & R. P. Reed (Eds.), *Cryogenic Engineering* (pp. 134-145). Springer New York. https://doi.org/10.1007/0-387-46896-X_7
- [49] Wernery, J., Mancebo, F., Malfait, W. J., O'Connor, M & Jelle, B. P. (2021). The economics of thermal superinsulation in buildings. *Energy and Buildings*, 253, 111506. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111506>
- [50] Resalati, S., Kendrick, C. C., & Hill, C. (2020). Embodied energy data implications for optimal specification of building envelopes. *Building Research & Information*, 48(4), 429-445. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1665980>