معرفی مزایای عایق‌های مدرن حرارتی و برودتی بلنکت منعطف آیروژل نانومتخلخل تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش

حسن برگزین[1]، طاهر یوسفی امیری[2]

استادیار دانشگاه زنجان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، موسس و مدیر عامل و رئیس هیات مدیره شرکت دانش بنیان پاکان آتیه نانودانش، Bargozin@znu.ac.ir

استادیار دانشگاه زنجان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، موسس و نایب رئیس هیات مدیره شرکت دانش بنیان پاکان آتیه نانودانش، yousefiamiri@znu.ac.ir

چکیده - فناوری نانو در مهمترین فناوری‌های روز دنیا که سبب تحول در زندگی و کیفیت آن شده‌اند، نقش کلیدی دارد. یکی از حوزه‌های ورود فناوری نانو، ظهور انواع عایق‌های حرارتی و برودتی آیروژل نانومتخلخل می‌باشد. بلنکت منعطف آیروژل خصوصیات ویژهای مانند ضد آبی، ضد حریق، ضد خوردگی زیر سطح عایق، کمترین ضریب انتقال حرارت مابین تمامی عایق‌های دنیا، عملکرد عالی در بازه دمایی منفی ۲۰۰ الی مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس، زیست سازگار، سبک و قابل برش در هر هندسه‌ای، طول عمر ۳۰ الی ۵۰ سال و قابل باز و بسته کردن چندین باره عایق جهت تعمیرات یا بازرسی، مقاومت مکانیکی کششی و فشاری بسیار بالا، نصب سریع، نصب آنلاین روی خطوط سرد و گرم، نداشتن ریزش یا ترک به مرور زمان و غیره را به صورت یکجا دارد. عایق‌های بلنکت آیروژل می‌تواند جایگزین تمامی عایق‌های سنتی مانند پشم سنگ، پشم شیشه، فوم پلی یورتان، فوم گلس، پلی استر، عایق‌های پیش ساخته، پشم فایبرگلس و غیره در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی گردد و سبب کاهش هزینه‌های متعددی شود.

.

کلید واژه: عایق، آیروژل، نانومتخلخل، سرد و گرم، مزایا، عایق‌های سنتی

مقدمه

فناوری نانو به عنوان یکی از مهمترین فناوری‌های پیشگام در حوزه تحولات صنایع در حال حاضر مطرح بوده و بر اساس خصوصیات منحصر به فردی که نانومواد دارند، محصولات متنوع با قابلیت‌های نوین ارائه شده است که زندگی بشر را تحت تاثیر قرار داده است. به جرات می‌توان گفت تحول و نوآوری جدید را نمی‌توان یافت مگر اینکه فناوری نانو نقش عمده و موثری در ایجاد آن داشته باشد [۱]. ماشین‌های خودران تسلا، باتری‌های جدید بر پایه فناوری نانومیله‌های سیلیکونی [۲]، چیپ‌های الکترونیکی ۲ نانومتری تولید شرکت IBM، انواع نانوسنسورها، نانوداروها، دارو رسانی و درمان سرطان با نانومواد [۳]، انواع نانوکاتالیست‌ها، فناوری‌های روز صنایع نظامی، سوخت‌های جامد بر پایه نانوذرات آلومینیوم، انواع نانوکامپوزیت‌های زیست سازگار، افزودنی‌های مختلف حاوی نانومواد سوخت و روغن‌های روان کننده خودرو، انواع غذاهای حاوی نانومواد و بسیاری دیگر از فناوری‌های روز دنیا بر پایه فناوری نانو ایجاد شده و تحولات مهمی در زندگی و رفاه بشر ایجاد کرده‌اند [۴]. روش‌های متعددی برای مدیریت کلان انرژی در دنیا وجود دارد. به روز رسانی فناوری‌های مختلف مورد استفاده صنایع، جایگزینی تجهیزات مختلف با تجهیزات به روز، استفاده از مواد کاتالیستی به روز، استفاده از سیستم‌های کنترل دقیق و نوین، بازیافت بیشینه مواد مختلف مصرفی صنایع و غیره [۵, ۶]. در بسیاری مواد استفاده از تجهیزات به روز در صنایع مختلف مشکلاتی را در پی دارد. هزینه بسیار بالای جایگزینی فناوری نوین، عدم دسترسی به بسیاری از فناوری‌های روز دنیا، عدم رغبت سرمایه گذاران به استفاده از فناوری‌های به روز و ریسک بالای برخی از آن‌ها، عدم رعایت مسائل زیست محیطی از طرف بسیاری از کشورهای در حال توسعه و پیشرفته و غیره از عواملی هستند که مانع از کاهش محسوس مصرف انرژی در صنایع می‌شود. در این بین، استفاده از عایق‌های حرارتی و برودتی پیشرفته با کارایی و طول عمر بالا یکی از گزینه‌های بسیار عملیاتی و مقرون به صرفه با قابلیت اجرا در تمامی صنایع یکی از بهترین گزینه‌های مدیریت کلان انرژی است [۷, ۸]. حوزه ساختمان با ۴۰ درصد مصرف انرژی کل کشور

و نرخ مصرف گاز طبیعی نزدیک ۷ برابر متوسط جهانی در حوزه های مختلف کشور و عدم اجرای قوانین مبحث نوزدهم انرژی به علت نبود عایق مناسب و ضعف عایق‌های سنتی سبب شده است تا نیاز به استفاده از عایق‌های نوین ضروری باشد [۹, ۱۰]. یکی از موفق‌ترین و پرمصرفترین محصولات نوین بر پایه مواد نانومتخلخل که تقریبا در تمامی صنایع مورد استفاده بوده و تحول بزرگی در کاهش مصرف انرژی، کاهش آلایندگی، افزایش ایمنی و رفاه صنایع و کاهش هزینه‌های مختلف آن‌ها داشته است عایق‌های حرارتی و برودتی مبتنی بر ماده نانومتخلخل آیروژل سیلیکایی است [۸, ۱۱-۱۳]. هم اکنون انواع عایق‌های حرارتی و برودتی بر مبنای آیروژل‌های سیلیکایی نانومتخلخل تولید می‌شوندکه عبارتند از بلنکت‌های منعطف آیروژل در ضخامت‌های مختلف، بلنکت‌های صفحه ای نیمه سخت، گرانول آیروژل، پودر آیروژل، رنگ عایق حرارتی حاوی آیروژل، گچ حاوی آیروژل، سیمان حاوی آیروژل، عایق‌های ژاکتی و غیره [۱۳, ۱۴]. تمامی صنایع بزرگ مانند پتروشیمی، پالایشگاه، صنایع فراورش گاز، بالادستی نفت و گاز، نیروگاه، ساختمان، خودرو، نظامی هوا و فضا، ذوب فولاد، کشتی، پوشاک، رنگ و رزین، صنایع شیمیایی، غذایی و غیره از انواع عایق‌های آیروژل در دنیا استفاده می‌نمایند و با رشد مضاعفی این عایق‌ها را جایگزین عایق‌های سنتی مانند پشم شیشه و سنگ می‌نمایند [۱۴-۱۶]. شرکت اسپن آیروژل آمریکا با همکاری شرکت ناسا عمده تولید کننده این نوع عایق‌های بوده و در داخل کشور انواع این عایق‌ها توسط شرکت دانش بنیان پاکان آتیه نانودانش بومی سازی و در مقیاس صنعتی تولید و عرضه می‌شوند [۱۵, ۱۷]. در این تحقیق خصوصیات منحصر به فرد عایق‌های آیروژل بررسی شده و مزیت‌های آن‌ها در مقایسه با عایق‌های سنتی از طریق بررسی تست‌های ASTM انجام شده بر روی نمونه محصولات تولید داخل معرفی می‌شوند.

معرفی آیروژل‌های نانومتخلخل و بلنکت آیروژل

آیروژل‌ها اولین بار توسط آقای کیستلر در سال ۱۹۳۰ ساخته شدند، ولی توجه به آن‌ها و گسترش دوباره آن‌ها از دهه ۱۹۷۰ شروع شد. این مواد فرصت‌ها بسیاری را در زمینه‌های مختلف مهندسی ایجاد کرده‌اند. آیروژل‌ها دست‌های مواد جامد با دانسیه بسیار پایین و تخلخل بسیار بالا (بالاتر از ۹۰ درصد) و سطح ویژه بزرگ می‌باشند و با عنوان دود یخ زده نیز شناخته می‌شوند. آیروژل از نانوذرات به هم پیوسته تشکیل شده‌اند که یک شبکه سه بعدی بسیار متخلخل که غالب حفرات آن در ابعاد مزو ۲ الی ۵۰ نانومتر می‌باشد، را تشکیل می‌دهند. آیروژل‌های سیلیکایی دارای سطح ویژه بالا ۵۰۰ الی ۱۲۰۰ متر مربع بر گرم، تخلخل بسیار بالا ۸۰ الی ۹۸ درصد، دانسیه پایین سه هزارم الی دو دهم گرم بر سانتیمتر مکعب، هدایت گرمایی پایین ده هزارم وات بر متر کلوین، ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین یک الی دو و نیز ثابت شکست پایین تقریباً یک و پنج صدم می‌باشند. تشکیل آیروژل‌ها عموماً شامل دو مرحله اصلی می‌باشد: تشکیل ژل مرطوب و خشک کردن ژل مرطوب برای رسیدن به آیروژل. اگر مایع داخل حفرات ژل، بدون تغییر یا انقباض در ساختار شبکه‌های ژل با هوا جایگزین گردد، آیروژل به دست می‌آید. برای تهیه آیروژل در ابتدا طی فرایند سل- ژل یک شبکه جامد نانوساختار که از هیدرولیز و پلیمریزاسیون پیش‌ماده‌های مربوطه ایجاد شده و حفرات داخل آن با مایع پر شده است، تشکیل می‌شود. مایع داخل حفرات شامل حلال اولیه و محصول جانبی واکنش‌های هیدرولیز و پلیمریزاسیون می‌باشد. در مرحله اول فرایند سل -ژل ذرات سیلیکایی کلوئیدی جامد یعنی ذراتی با اندازه کوچکتر از یک میکرومتر یا کمابیش الیگومرهای خطی تشکیل می‌شوند. این سوسپانسیون کلوئیدی ذرات جامد در مایع، سل نامیده می‌شود. در مرحله دوم این ذرات اولیه می‌توانند در داخل حلال به یکدیگر متصل شده و یک ساختار جامد با شبک‌های پیوسته سه بعدی با حفرات باز که ژل نامیده می‌شود را به وجود آورند. در ادامه برای به دست آوردن آیروژل، ضروری است که حلال بدون ایجاد انقباض و همرفتگی در ژل و تخریب حفرات آن خارج شده و سیلیکای نانوساختار را به صورت سالم و خشک ترک نماید. بدین منظور از روش‌های مختلفی مانند خشک سازی اتمسفریک، خشک سازی فوق بحرانی دما بالا، خشک سازی فوق بحرانی دما پایین، خشک سازی انجمادی و غیره استفاده می‌شود [۱۷, ۱۸]. برای تولید بلنکت‌های منعطف آیروژل (شکل ۱)، در مرحله قبل از تشکیل ژل، بستر الیاف در مایع خیسانده شده و سایر مراحل تولید آیروژل طی می‌شود.

شکل ۱- بلنکت‌های منعطف آیروژل نانومتخلخل در ضخامت‌های مختلف و گرانول آیروژل تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش

معرفی مزایای بلنکت‌های منعطف آیروژل نانومتخلخل

ضد آبی، ضد حریق، ضد خوردگی زیر سطح عایق، کمترین ضریب انتقال حرارت مابین تمامی عایق‌های دنیا، عملکرد عالی در بازه دمایی منفی ۲۰۰ الی مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس، زیست سازگار، سبک و قابل برش در هر هندسه ای، طول عمر ۳۰ الی ۵۰ سال و قابل باز و بسته کردن چندین باره عایق جهت تعمیرات یا بازرسی، مقاومت مکانیکی کششی و فشاری بسیار بالا، نصب سریع، نصب آنلاین روی خطوط سرد و گرم، نداشتن ریزش یا ترک به مرور زمان و غیره را به صورت یکجا دارد.

بلنکت‌های آیروژل نانومتخلخل با کاهش سه مکانیسم انتقال حرارت رسانایی، جابجایی و تشعشعی که در شکل ۲ نشان داده شده است، در مجموع سبب می‌شوند تا کمترین انتقال حرارت نسبت به عایق‌های رایج وجود داشته باشد:

۱- انتقال حرارت رسانایی : انتقال حرارت رسانایی ناشی از جرم جسم و از طریق نوسان مولکول‌های جسم صورت می‌گیرد. به عبارت ساده با ایجاد گرادیان دما در دو بخش جسم (جسم می‌تواند جامد، مایع و یا گاز باشد که در اینجا منظور بررسی جامدات است) حرارت از طریق نوسان درجای مولکولها در بخش گرمتر شروع شده و این نوسان به مولکول‌های اطراف منتقل می‌شود.

با توجه به این مکانیسم، انتقال حرارت رسانایی نیاز به جرم یا چگالی بالا دارد تا بتواند بهتر و سریعتر منتقل شود. هواژل‌های)ائروژل‌های (Aerogel –سیلیکایی چگالی متوسط ۰/۰۷ گرم بر سانتی متر مکعب دارند و لذا ماده ای برای انتقال حرارت وجود ندارد. بر این اساس انتقال حرارت رسانایی در عایق‌های آیروژل سیلیکایی بسیار کم است.

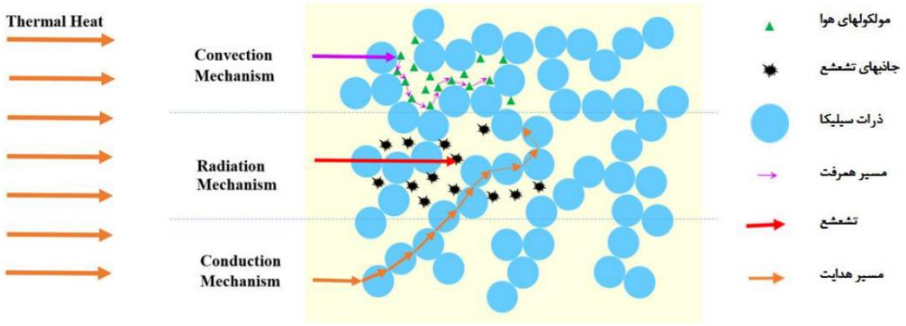
۲- انتقال حرارت جابجایی: انتقال حرارت جابجایی بر اساس جابجایی هوا در فواصل مابین ناحیه گرم و سرد صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر در صورتی که هوا در تماس با منبع گرم باشد، گرم شده و چگالی آن کاهش می‌یابد و با کاهش چگالی هوای گرم سبکتر شده و به سمت بالا حرکت می‌کند و هوای سرد جایگزین آن می‌شود و این چرخه دائما ادامه پیدا می‌کند. مثال ساده گرم شدن اتاق به واسطه روشن بودن بخاری است.

در عایقها برای جلوگیری از این منظور سعی می‌شود تا حداالامکان اندازه حفرات عایق کوچکتر شود. اگر اندازه حفرات در مقیاس نانومتری باشد نوع نفوذ مولکول‌های هوا در محیط حفرات از مکانیسم نفوذ فیک به مکانیسم نفوذ نادسن تغییر می‌کند. به عبارت ساده در حفرات بزرگتر از نانومتر به تعداد کافی مولکول هوا و فضا برای حرکت مولکول‌های هوا وجود دارد که می‌تواند به راحتی گرما را از طریق جابجایی منتقل کند. اما در حفرات نانومتری مولکول‌های هوا که در مقادیر بسیار کمتر در حفره کوچک وجود دارند برای جابجایی باید دائما در تماس با دیواره های حفرات باشند که اصطلاحا به این نوع حرکت مولکولها در تماس با دیواره نفوذ خزشی و یا نادسن گفته می‌شود.

مولکول هوا اگر بخواهد به جای حرکت آزاد در فضا روی دیواره جامد حفرات خزش کند سرعت حرکت آن حدود ۱۰۰ برابر کاهش می‌یابد. در عایق‌های معمولی اندازه حفرات از چند میلیمتر تا حتی سانتیمتر می‌تواند باشد در حالی که در عایق‌های آیروژل اندازه حفرات از ۲ تا ۵۰ نانومتر است و لذا انتقال حرارت جابجایی نداریم.

۳ -انتقال حرارت تابشی: انتقال حرارت تابشی از جمله مکانیسم‌های مهم انتقال حرارت می‌باشد که نیازی به وجود جرم برای انتقال ندارد.

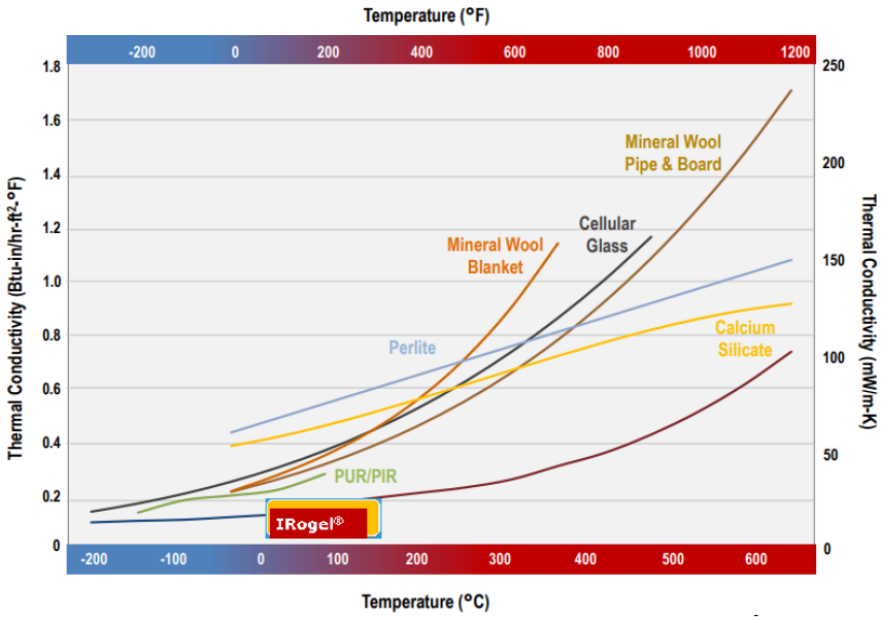
انتقال حرارت تابشی در دماهای معمولا بالاتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس اهمیت پیدا می‌کند و به عبارت دیگر در کمتر از این دما مکانیسم انتقال حرارت رسانایی و جابجایی مهم هستند. منبع اصلی انتقال حرارت تابشی طول موج مادون قرمز می‌باشد. وجود ذرات اکسید تیتانیوم در بلنکت‌های آیروژل سبب می‌شود تشعشع جذب و بازتاب شده و نتواند از بلنکت عبور نماید.



شکل ۲- مکانیسم کاهش انتقال حرارت هدایتی، جابجایی و تشعشع آیروژل نانومتخلخل

کاهش مصرف انرژی

بلنکت‌های آیروژل دارای کمترین ضریب انتقال حرارت در بازه دمایی منفی ۲۰۰ الی مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس از ۰.۰۰۴ تا ۰.۰۲ وات بر متر کلوین می‌باشند. طول عمر بالا و حفظ کارایی اولیه عایق بعد از نصب سبب می‌شود تا کاهش اتلاف انرژی بیشینه تا بالای ۹۵ درصد در استفاده از این عایق‌ها حاصل شود. به عبارت دیگر متوسط کاهش مصرف انرژی در استفاده از عایق‌های آیروژل بسیار بالاتر از عایق‌های سنتی است چرا که عایق‌های سنتی با جذب رطوبت و از بین رفتن ساختار اولیه ناشی از ریزش یا ترک و غیره به شدت کارایی اولیه خود را در کمتر از چند ماه از دست می‌دهند. انعطاف و قابلیت برش در کنار مقاومت مکانیکی بالا سبب می‌شود تا به بهترین کیفیت و دقت امکان پوشش دهی تمامی سطوح با هندسه های مختلف فراهم باشد که مجموعه کاهش بهتر اتلاف انرژی را سبب می‌شود (شکل ۳).



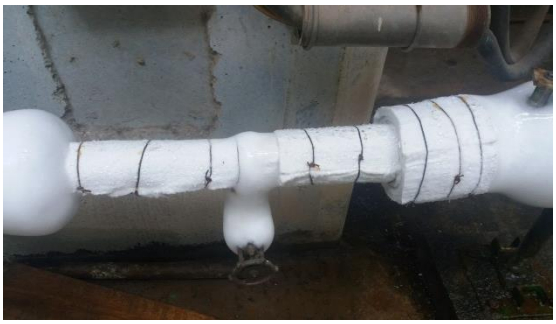
شکل ۳- کمترین ضریب هدایت حرارتی بلنکت‌های آیروژل در بازه دمایی منفی ۲۰۰ تا مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس نسبت به عایق‌های سنتی

کنترل فرایند و حفظ انرژی

عایق‌های آیروژل در عین دارا بودن کمترین ضریب انتقال حرارت، دارای کمترین ضریب نفوذ حرارتی نیز می‌باشند. ضریب نفوذ حرارت پایین سبب می‌شود تا در شرایط غیر پایدار مانند وزش باد، تغییرات دمای شبانه روزی و تغییرات دمای فرایندی، زمان بسیار زیادی طول بکشد تا انتقال حرارت از درون عایق به سطح آن انجام شود که این امر سبب کاهش اتلاف انرژی بیشتری می‌گردد. عایق‌های سنتی با ضریب نفوذ حرارتی بالا می‌توانند حرارت از دست رفته به محیط را در زمان کوتاهی از تجهیزات فرایندی به سطح منتقل کنند که این امر راندمان حرارتی آنها را کاهش می‌دهد. ضخامت تنها ۶ میلیمتر از بلنکت منعطف آیروژل می‌تواند به طور سبب حفظ انرژی فرایندها یا مخازن مختلف صنعتی گردد. دمای سطح عایق آیروژل با ضخامت ۶ میلیمتر نصب شده روی لوله با دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس کمتر از ۹۰ درجه سلسیوس خواهد بود.

جلوگیری از یخ زدگی

یخ زدن تجهیزات صنعتی عمدتا در سیستم‌های سرد یا کرایوژنیک می‌تواند اتفاق بیافتد و مشکلات عدیده ای را به وجود آورد. یخ دارای ضریب انتقال حرارت بسیار بالایی بوده و سبب اتلاف انرژی زیادی می‌شود. تشکیل یخ سبب انبساط و ترک برداشتن عایق‌های سنتی شده و جذب رطوبت در درون عایق سبب تخریب آن می‌شود. همچنین رشد یخ می‌تواند سبب تشکیل قندیل‌های بزرگی شده که علاوه بر فشارهای مکانیکی به تجهیزات، می‌تواند سبب کنده شدن عایق، تجهیزات و مشکلات ایمنی نفرات صنعت گردد. عایق‌های آیروژل کاملا ضد آب بوده و به هیچ وجه امکان تشکیل یخ روی آنها وجود ندارد. کارایی حرارتی فوق العاده بلنکت‌های آیروژل نیز امکان تشکیل کندانس و یخ زدن را حتی در لایه های نازک بلنکت نمی‌دهد (شکل ۴). همچنین عدم جذب رطوبت سبب می‌شود تا رطوبت هوا و آب نتواند سبب تخریب ساختار عایق و کاهش کارایی آن گردد.



شکل ۴- عدم تشکیل کندانس و یخ در بخش‌های عایق شده با بلنکت آیروژل در دمای سیال منفی ۴۰ درجه سلسیوس (قسمت‌های یخ زده بدون عایق بوده و دو ماه زمان داده شده است، پتروشیمی جم)

کنترل حریق

بلنکت‌های آیروژل از مواد معدنی تشکیل شده و هر یک سانت از ضخامت آنها می‌تواند مطابق استاندارد UL ۱۷۰۹ به مدت حدود یک ساعت در برابر دمای ۱۱۰۰ درجه سلسیوس حریق مواد هیدروکربنی مقاومت نماید. بلنکت‌های آیروژل هیچگونه مواد سمی و دود در هنگام برخورد شعله مستقیم یا غیر مستقیم تولید نمی‌کنند. با وجود حریق با دمای بالا در یک طرف عایق بلنکت، دمای سمت دیگر به خاطر ضریب انتقال حرارت بسیار کم و ضریب نفوذ حرارت پایین افزایش محسوسی نداشته و تجهیزات فرایندی دچار مشکل نمی‌شوند (شکل ۵). با توجه به ضخامت بسیار کم مورد نیاز از عایق‌های آیروژل جهت عایق کاری، استفاده از این عایق‌های در مخازن تحت فشار کروی و غیره می‌تواند بدون افزایش وزن خاصی به شدت سبب افزایش ایمنی صنایع نفت و گاز و پتروشیمی گردد.

شکل ۵- تحمل دماهای بسیار بالا بدون دود و مواد سمی و ایجاد اختلاف دمای بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به ازای یک سانت بلنکت آیروژل

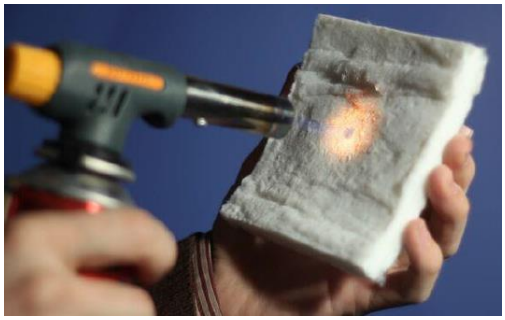
کنترل دمای سطح خارجی

در مورد عایق گرم، دمای سطح باید به کمتر از ۱۴۰ درجه فارنهایت (یا ترجیحاً ۱۲۵ درجه فارنهایت) محدود شود تا پرسنل را از صدمات بالقوه جبران ناپذیر محافظت کند. بلنکت‌های آیروژل با ضریب انتقال حرارت کم و ضریب نفوذ حرارت پایین، کمترین دمای سطح خارجی عایق را حاصل می‌کنند. ضریب نفوذ حرارت پایین سبب می‌شود تا در تماس با عایق مدت زمان زیادی طول بکشد تا دمای سطح احساس گردد. حفرات نانومتری عایق‌های بلنکت سبب می‌شوند تا نفوذ حرارت بسیار کند انجام شده و امکان انتقال حرارت سریع به سطح عایق وجود نداشته باشد. در عایق‌های سنتی مانند پشم سنگ، ریزش عایق یا حفرات بزرگ درون عایق سبب می‌شود تا حرارت به راحتی به سطح عایق منتقل شده و باعث افزایش دمای سطح عایق گردد (شکل ۶).

شکل ۶- مقایسه دمای سطح ۱۰ سانت پشم سنگ با یک سانت بلنکت آیروژل (دمای سیال ۲۸۰ درجه سلسیوس)

حفاظت فردی

بر اساس استاندارد ASTM C۱۰۵۵ در تماس با سطوح داغ در صنایع، باید حداقل ۵ ثانیه زمان به نفر داده شود تا متوجه تماس با منبع داغ گردد. عایق‌های آیروژل با کمترین ضریب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی می‌توانند این استاندارد را با کمترین ضخامت حاصل نمایند. ضریب نفوذ حرارت در بلنکت‌های آیروژل به قدری کم است که نفر می‌تواند سطح عایق با دمای حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس را نیز برای مدت محسوسی لمس نماید بدون اینکه دچار سوختگی گردد (شکل ۷). در عین حال مقاومت مکانیکی بسیار بالای عایق‌های آیروژل سبب می‌شود به مرور زمان دچار ریزش، تولید الیاف، جذب رطوبت و رشد قارچ و غیره نشوند که سلامتی محیط کار را فراهم می‌کند. عایق‌های آیروژل به قدری قوی عمل می‌کنند که محصول رنگ عایق حرارتی با ضخامت کمتر از نیم میلیمتر می‌تواند مانع از سوختگی ناشی از تماس سطوح داغ تا دمای ۱۷۷ درجه سلسیوس گردد.

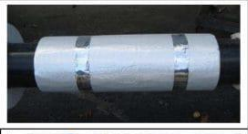
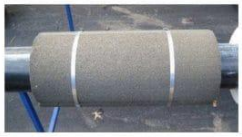
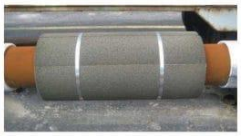
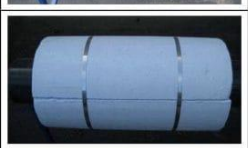
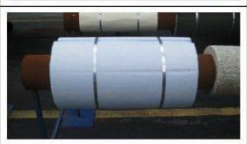
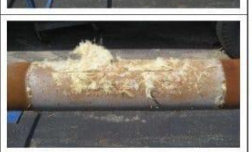


شکل ۷- ضریب نفوذ حرارت بسیار پایین بلنکت‌های آیروژل و عدم حس دمای بالای در طرف دیگر عایق با ضخامت یک سانت

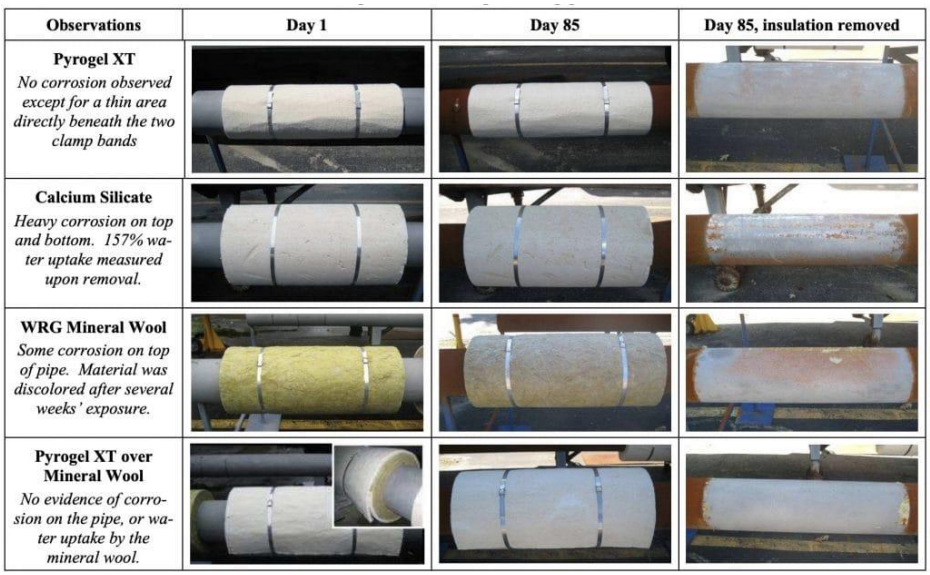
خوردگی زیر سطح عایق

خوردگی زیر سطح عایق از مهمترین مشکلات صنایع نفت و گاز و پتروشیمی بوده و هزینه‌های هنگفتی را می‌تواند ایجاد کنند. عدم امکان مشاهده و بازرسی زیر سطخ عایق سبب می‌شود وقتی خوردگی زیر سطح عایق تشخیص داده شود که پیشرفت قابل توجه داشته و ممکن است دچار ترکیدن، نشتی و یا انفجار گردد. خوردگی زیر سطحی عمدتا در اثر جذب رطوبت توسط عایق‌های سنتی می‌گردد. کمربند حرارتی در روی عایق‌های سنتی وجود دارد که در این ناحیه دمای عایق از دمای شبنم محیط پایینتر رفته و کندانس شدن رطوبت در عایق سبب نفوذ املاح مختلف در عایق می‌شود. به مرور زمان و با نفوذ املاح در درون عایق رسیدن آنها به سطح زیر عایق، در تماس با فلزف خوردگی شدید ایجاد می‌شود. همچنین ضعف مکانیکی انواع عایق‌های سنتی شبب می‌شود تا چسبندگی مناسبی بین سطح و عایق وجود نداشته باشد و فاصله مابین آنها وجود داشته باشد. رطوبت و آب می‌تواند در این فواصل نفوذ کرده و خوردگی را تشدید نماید. استفاده از کاورهای آلومینیوم برای آب بندی عایق‌های سنتی سبب می‌شود تا در صورت نفوذ آب باران یا رطوبت کندانس به داخل عایق، امکان نشت آن به بیرون وجود نداشته و ماندن طولانی مدت آب در درون سیستم عایق‌کاری شده سبب خوردگی بیشتر می‌شود.

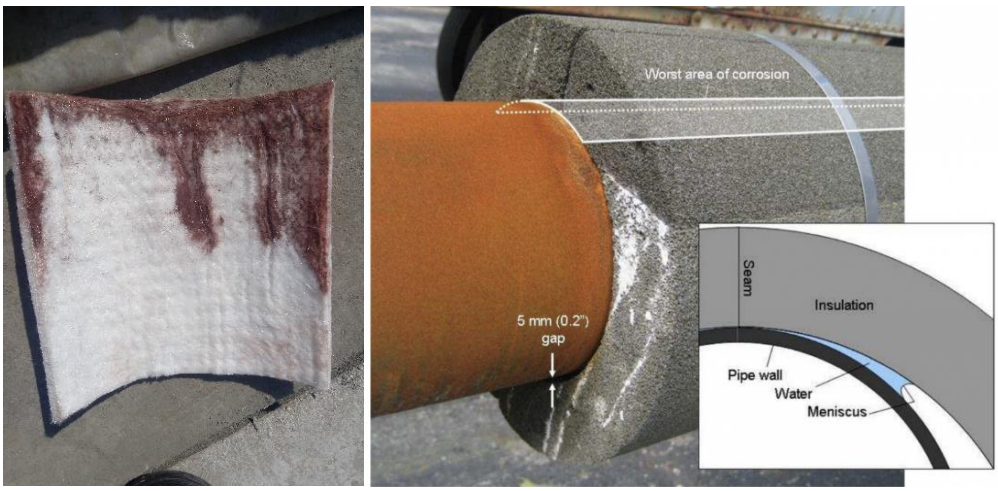
بلنکت‌های آیروژل با خاصیت فوق آب‌گریزی و مقاومت فشاری و کششی بسیار بالا، امکان عایق‌کاری مطمئن و بدون درز را روی سطوح مختلف فراهم کرده و مانع از خوردگی زیر سطح عایق می‌گردد (شکل ۸ و ۹). فوق آب گریزی عایق‌های آیروژل خاصیت ذاتی عایق‌های نانومتخلخل بوده و به مرور زمان دچار ضعف یا تخریب نمی‌شود. همچنین تمام سطح و داخل بلنکت‌های آیروژل ضد آب بوده و این خاصیت محدود به سطح عایق نیست.

Observations	Day 1	Day 84	Day 84, insulation removed
Cryogel Z *No corrosion*			
Cellular Glass *Heavy general corrosion, concentrated at the top of the pipe*			
Expanded Perlite *Very little corrosion observed except at 6:00 position, where water streaking occurred along the annular gap*			
Mineral Wool *Moderate corrosion over top one-third. Material was damp to the touch upon removal.*			

شکل ۸- مقایسه خوردگی زیر سطح عایق‌های سنتی با بلنکت آیروژل بعد از ۸۴ روز، بلنکت آیروژل بدون خوردگی

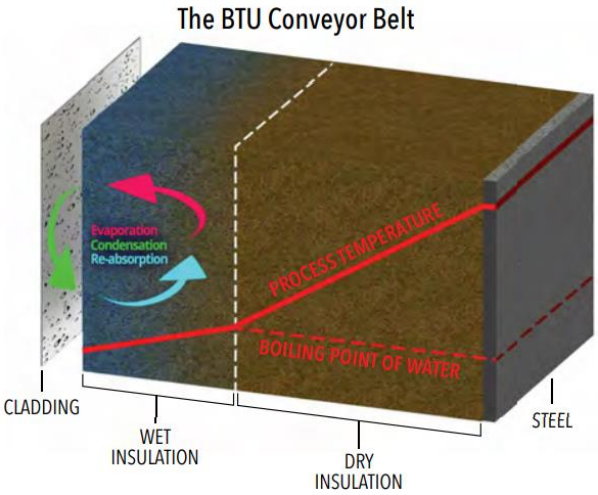


شکل ۹- عدم خوردگی عایق سنتی پشم سنگ با استفاده از یک لایه بلنکت آیروژل در سطح پشم سنگ



شکل ۱۰- جذب رطوبت ناشی از نیروی مویینگی گپ مابین عایق فوم گلس و سطح فلز – زنگ آهن چسبیده به عایق آیروژل ناشی از خوردگی عایق سنتی هنگام تعویض

بدون توجه به آب و هوای منطقه، راه های مختلفی برای آب وجود دارد تا بتواند به داخل عایق حرارتی نفوذ کند (شکل ۱۰). برف، باران، مه، چگالش، سیلاب، نشت بخار، قطرات پاشیده شده از برج‌های خنک کننده و غیره می‌تواند از جمله راه‌ها باشند. برخلاف تصور عمومی مرطوب شدن عایق‌های تنها ناشی از دماهای پایین نیست. حتی در سیستمهایی که به حد کافی از دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس بالاتر کار می‌کنند، بخش زیادی از عایق می‌تواند در دمای عملیاتی بسیار پایینتر از نقطه جوش آب باشد. همانند شکل پایین نتیجه چرخه تبخیر، چگالش و بازجذب در لایه بیرونی مرطوب عایق مانند کمربند انتقال انرژی عمل کرده و اتلاف انرژی و هزینه را برای صنعت در پی دارد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- کمربند انتقال انرژی ناشی از جذب رطوبت لایه بیرونی عایق‌های آبدوست

مطالعات نشان می‌دهند که ضریب انتقال حرارت عایق‌های الیافی می‌تواند تا ۵۰ برابر در حالتی که مرطوب می‌شوند افزایش یابد. این به معنی ۵۰ برابر مصرف انرژی بیشتر و ۵۰ برابر تولید آلاینده های بیشتر و ۵۰ برابر هزینه بیشتر بابت انرژی است. تکرار این چرخه به مرور زمان سبب تخریب اتصالات، شیرآلات، ترک جوشکاری‌ها و از کار افتادن تجهیزات خواهد شد.

طول عمر مفید بسیار بالا

بلنکت‌های آیروژل به واسطه ضد آب بودن، مقاومت مکانیکی بالا و ضخامت های بسیار کم مورد نیاز دارای طول عمر مفید ۲۰ الی ۵۰ ساله بر حسب محل مورد استفاده و دمای‌کاری می‌باشند. طول عمر مفید عایق‌های سنتی کم بوده و بعد از مدت کوتاهی با جذب رطوبت، ریزش الیاف، ترک، جدا شدن از سطح و غیره با وجود حضور فیزیکی عایق، عملا کاهش اتلاف انرژی موثر اتفاق نمی‌افتد و چه بسا عایقی که رطوبت جذب کرده است سبب اتلاف انرژی بیشتری نیز گردد. طول عمر بالای بلنکت‌های آیروژل علاوه بر کاهش محسوس هزینه های تعویض عایق، تولید پسماند و هزینه های دفع پسماند را نیز به شدت کاهش می‌دهد. هزینه های حمل و نقل و انبار داری عایق نیز کاهش محسوسی خواهد داشت. بدنه بلنکت‌های آیروژل دوخت شده بوده و به مرور زمان دچار ریزش یا تغییر فرم نمی‌شوند.

قابلیت باز و بسته کردن

افزایش قیمت انرژی، زمان بازپرداخت هزینه عایق‌های قابل باز و بسته کردن جدید اضافه شده به سیستم‌های عایق‌کاری در تجهیزات بخار را از ماه‌ها به هفته‌ها کوتاه کرده است و پس از آن هر ماه به سود شرکت‌ها اضافه می‌کند. تعمیر و نگهداری معمول سیستم در فرآیندهای صنعتی اغلب شامل حذف عایق در شیرهای لوله و اتصالات است و اگر جایگزین نشود، اتلاف انرژی می‌تواند قابل توجه باشد. بلنکت‌های آیروژل منعطف با قابلیت استفاده مجدد در مناطقی که نیاز به دسترسی گاه به گاه دارند، راه حلی کارآمد را ارائه می‌دهند. وزارت انرژی ایالات متحده عنوان کرده که صنایعی که از بخار در فرآیندهای خود استفاده می‌کنند (یعنی شیشه، کاغذ، فولاد، آلومینیوم) می‌توانند تا ۵ درصد از هزینه های انرژی خود را صرفاً با نصب عایق قابل استفاده مجدد بر روی فلنج‌ها و دریچه‌ها سیستم های بخار صرفه جویی کنند. هزینه های انرژی در ایران روز به روز افزایش می‌یابد و در نمونه ای هزینه برق مصرفی شهرک صنعتی روی زنجان حدود ۶۰۰ درصد افزایش داشته است که سبب می‌شود کاهش مصرف انرژی با استفاده از عایق‌های مدرن آیروژل اهمیت دوچندان داشته باشد. بلنکت‌های آیروژل دارای بافت یکپارچه و منعطف بوده و در اندازه های مشخص مورد نیاز برش‌کاری و نصب می‌شوند. نصب عایق‌ها توسط بست‌های فلزی انجام می‌شود. بر اساس استحکام مکانیکی کششی و فشاری و برشی بسیار بالای این عایق‌ها، به راحتی امکان باز و بسته کردن عایق‌ها جهت تعمیرات، بازرسی و غیره وجود دارد. در واحدهای نوساز در حال راه‌اندازی که احتمال بروی نشتی

و یا ایرادات در اتصالات، فلنجها، شیرآلات و غیره وجود دارد و نیاز است تا محل ایراد از طریق باز کردن عایق تعمیر و سپس عایق نصب گردد، استفاده از بلنکت‌های آیروژل می‌تواند هزینه های زیادی را کاهش دهد. لازم به ذکر است با باز و بسته کردن عایق‌های آیروژل در بازه دمایی منفی ۲۰۰ الی مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس، هیچگونه کاهش کارایی عایق اتفاق نمی‌افتد. با باز و بسته کردن صحیح عایق امکان انجام چندین ده باره این کار بدون مشکل وجود خواهد داشت.

قابلیت نصب آنلاین

بلنکت‌های آیروژل منعطف تنها عایق‌های حرارتی و برودتی دنیا هستند که قابلیت نصب آنلاین از دماهای منفی ۲۰۰ تا مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس را دارند (شکل ۱۲). در عایق‌کاری گرم و در دماهای بالا نیاز به ضخامت‌های بالای عایق‌هایی مانند پشم سنگ است که سبب می‌شود نیاز به نصب نگهدارنده‌ها با اسکلت فلزی باشد که امکان نصب آنلاین عایق را از بین می‌برد. در دماهای سرد و کرایوژنیک، مدت زمان بسیار زیاد لازم برای نصب عایق‌هایی مانند فوم‌های پلی یورتان یا ایزوسیانات سبب می‌شود تا سطح تجهیزات یا خطوط لوله یخ زده و امکان اجرای عایق وجود نداشته باشد. در برخی موارد مانند خطوط LNG عسلویه امکان خاموش کردن خط تولید وجود نداشته و از بین رفتن عایق‌های سنتی فوم سبب یخ زدن، کندانس شدن رطوبت و تبخیر شدید LNG مایع درون خطوط ۲۴ اینچ می‌گردد که باید به فلرها برای سوزاندن ارسال شود. خاموش کردن خطوط و تجهیزات مختلف برای عایق‌کاری نیز می‌تواند هزینه های زیادی را برای صنایع نفت، گاز و پتروشیمی که به صورت پیوسته کار می‌کنند ایجاد کند. بلنکت‌های آیروژل با ضریب انتقال حرارت بسیار پایین، ضریب نفوذ بسیار کم، مقاومت مکانیکی بالا و ضخامت کم مورد نیاز امکان نصب راحت و سریع آنلاین را دارند. بلنکت‌های آیروژل تولید شرکت دانش بنیان پاکان آتیه نانودانش به صورت آنلاین در خطوط بخار داغ ۴۰۰ درجه سلسیوس پالایشگاه نفت تبریز و خطوط اکسیژن مایع با دمای منفی ۱۸۲ درجه سلسیوس با موفقیت اجرا و در حال کار می‌باشند (شکل ۱۳).

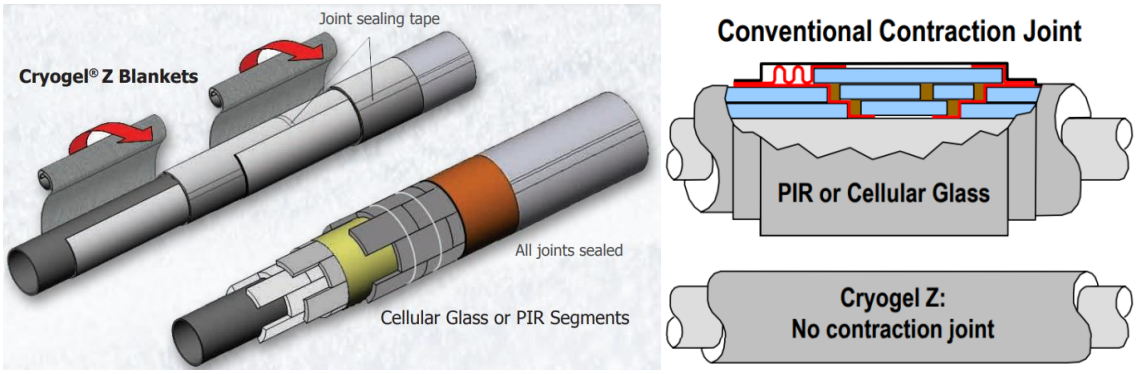
شکل ۱۲- عایق‌کاری آنلاین بلنکت آیروژل در خطوط پمپاژ اکسیژن مایع با دمای منفی ۱۸۲ درجه سلسیوس

شکل ۱۳- عایق‌کاری خطوط منفی ۱۸۲ درجه سلسیوس اکسیژن مایع در ضخامت‌های مختلف ۱، ۲، ۳ و ۴ سانت (با ضخامت یک سانت دمای سیال به حدود دمای محیط در سطح عایق کاهش می‌یابد)

نصب سریع و راحت

عایق‌کاری صنایع نفت و گاز و پتروشیمی معمولا آخرین مرحله قبل از راه‌اندازی واحد بوده و هرچه سریعتر انجام شود، شروع تولید و درآمد زایی زودتر اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه صنایع نفت و گاز و پتروشیمی روزانه حجم بسیار بالایی از محصولات تولید می‌کنند، راه‌اندازی سریعتر می‌تواند منافع بسیار زیادی را عاید شرکت نماید. بر اساس بررسی‌های انجام شده، نصب عایق‌های بلنکت منعطف ایروژل می‌تواند حدود ۳۳ درصد سریعتر از عایق‌های سنتی سرد یا گرم انجام شود. همچنین استحکام بالای عایق آیروژل و ضخامت بسیار کم مورد نیاز سبب می‌شود تا نصب راحت و سریعتر انجام شود. قابلیت پیش آماده سازی عایق برای سطوح پیچیده سبب می‌ود تا زمان اضافی بابت نصب روی سطوح خاص اتلاف نشود. وزن کم عایق‌های آیروژل نیز سبب می‌شود تا به راحتی بتوان آنها را هنگام نصب بر روی سطوح در ارتفاع‌های مختلف مهار و نصب را نهایی نمود (شکل ۱۴). در مناطقی مانند عسلویه که شرایط‌کاری سختی دارد هزینه نصب عایق‌هایی مانند پشم سنگ به مراتب بیشتر از هزینه خود عایق به ازای هر متر مربع می‌باشد. ضخامت ۳ الی ۶ برابر کمتر مورد نیاز از بلنکت آیروژل همچنین سبب می‌شود حجم عایق‌کاری حدود ۹ برابر کاهش یابد که سرعت حمل و نقل و نصب را افزایش داده و نیاز به نفرات کمتری برای نصب خواهد داشت. هزینه های حمل و نقل و انبارداری نیز با کاهش حجم مورد نیاز به شدت کاهش می‌یابند. در عایق کاری سرد مزایای بلنکتهای آیروژل نسبت به عایقهای سنتی چندین برابر بیشتر می شود (شکل ۱۵).

شکل ۱۴- نصب سریع و راحت و آنلاین سرد و گرم بلنکت‌های آیروژل نانومتخلخل

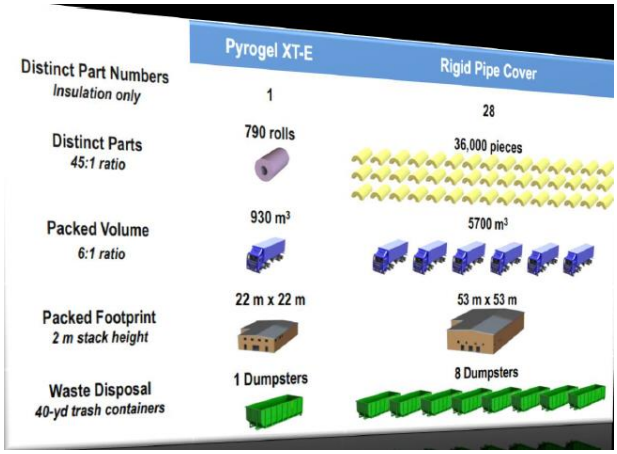


شکل ۱۵- مقایسه عایق‌کاری خطوط سرد با بلنکت‌های آیروژل و عایق‌های سنتی پلی ایزوسیانات، عایق‌های سنتی تکه تکه بوده، حجم بیشتر و زمان بالای نصب و تجهیزات اضافی برای مشکلات انبساط و انقباض لازم دارند

انبارداری و حمل و نقل راحت و ارزان

حجم عایق‌کاری با بلنکت‌های آیروژل حدود ۶ الی ۱۰ برابر کمتر از عایق‌های سرد یا گرم سنتی است. ضخامت بسیار کم عایق مورد نیاز آیروژل سبب می‌شود تا هزینه های حمل و نقل و انبار داری عایق‌ها کاهش محسوسی پیدا کند. با افزایش هزینه انرژی و حمل و نقل و نظر به اینکه میزان مصرف عایق‌ها در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی می‌تواند بسیار زیاد باشد، در آینده نزدیک هزینه های قابل توجهی بابت حمل و نقل و نگهداری عایق‌های حرارتی و برودتی هزینه می‌شود. در برخی موارد از عایق‌های سنتی پیش ساخته استفاده

می‌شود که به خاطر اشکال مختلف حجم بیسار بیشتری را اشغال کرده و هزینه‌ها را به صورت تصاعدی افزایش می‌دهند. عایقهای سنتی در هنگام تعویض مقادیر بسیار زیادی پسماند نیز تولید می‌کنند که هزینه های حمل و نقل را به طور مضاعف افزایش می‌دهد (شکل ۱۶). استفاده از عایق‌های منعطف بلنکت آیروژل با طول عمر بالا و ضخامت کم بهترین گزینه جایگزینی با عایق‌های سنتی است.



شکل ۱۶- حجم بسیار کمتر بلنکت‌های آیروژل مورد نیاز و کاهش هزینه‌های حمل نقل و انبارداری چندین برابر

عملکرد در بازه دمایی منفی ۲۰۰ الی مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس پیوسته

بلنکت‌های منعطف آیروژل تنها عایق‌های حرارتی و برودتی دنیا هستند که امکان استفاده در بازه دمایی بسیار گسترده را دارا هستند. در تمامی این بازه حرارتی گسترده ضریب انتقال حرارتی بلنکت‌های آیروژل از تمامی عایق‌های سنتی کمتر بوده و با کاهش دما ضریب انتقال حرارت کاهش بیشتری را نیز نشان می‌دهد. استفاده از یک عایق در تمامی بخش‌های صنایع می‌تواند مزیت‌های زیادی را ایجاد کرده و سبب کاهش هزینه های متعددی گردد. بلنکت‌های آیروژل به راحتی قابل نصب بوده و صنایع بزرگ نفت و گاز و پتروشیمی به جای استفاده از پیمانکاران نصب عایق با هزینه بالا و فرایند زمان بر مناقصه و انجام امورات اداری، می‌توانند از نفرات تعمیرات بابت نصب عایق آیروژل در تمامی سطوح سرد و گرم خود با هزینه بسیار کمتر و مدت زمان کمتر بهره مند شوند. استفاده از عایق یکسان سبب می‌شود تا نیروها به راحتی تمامی خصوصیات و روش‌های نصب را یاد گرفته و هزینه های عایق‌کاری در کنار مزایای متعدد دیگر این عایق‌های مدرن در صنعت را به شدت کاهش دهند.

بلنکت‌های منعطف آیروژل در دمای منفی ۲۰۰ درجه سلسیوس خصوصیات و انعطاف خود را حفظ کرده و دچار کمترین ترک یا ترد شدن نمی‌شوند. همچنین در دماهای پایین تا بالا دچار انقباض و انبساط‌های مخرب نشده و خصوصیات کیفی عایق کاملا حفظ می‌شود. در دماهای بالا نیز بلنکت‌های آیروژل دارای بهترین مقاومت حرارتی بوده و بدون تخریب عایق و کاهش کارایی می‌تواند اختلاف دمای بسیار بالایی را تنها با ضخامت یک سانتیمتر ایجاد نماید (شکل ۱۷).

شکل ۱۷- عملکرد عالی در بازه دمای منفی ۲۰۰ الی مثبت ۶۵۰ درجه سلسیوس به صورت پایدار و با کمترین ضخامت

زیست سازگار و نداشتن مشکلات دفع پسماند

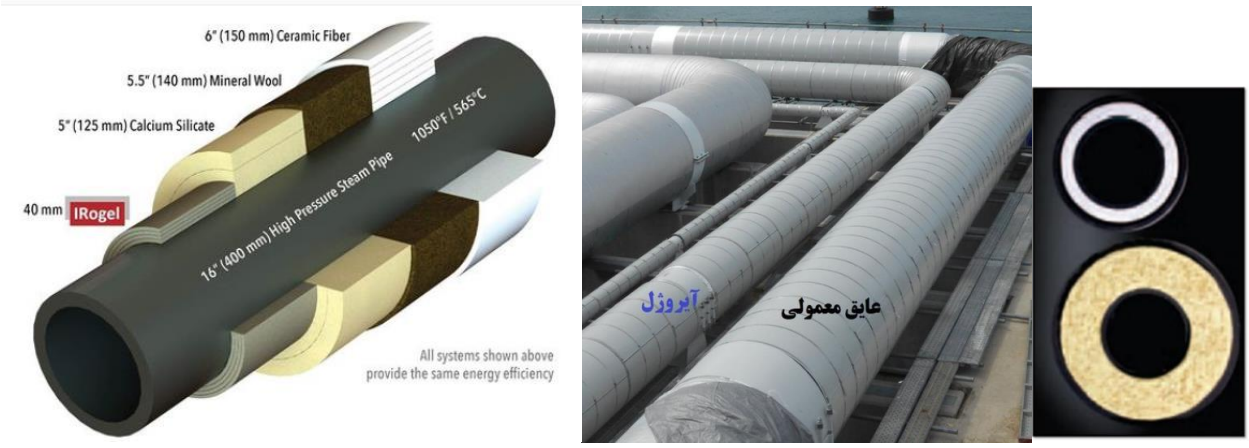
مسایل زیست محیطی در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی بسیار مهم بوده و روز به روز به خاطر مسایل جهانی گرمایش زمین، سخت گیری بیشتری در آن می‌شود. عایق‌های سنتی مانند پشم شیشه یا پشم سنگ علاوه بر اینکه در فرایند تولید انرژی بسیار زیادی را مصرف می‌کنند، قابل بازیافت نبوده و مشکلات زیست محیطی عدیده ای را ایجاد می‌کنند. الیاف استفاده در این عایق‌ها بسیار خطرناک بوده و می‌تواند سلامتی انسان را به خطر بیاندازد. عایق‌های سرد سنتی نیز مانند فوم‌های پلی یورتان از مواد غیر قابل بازیافت و بسیار سمی و نیز از گازهای مضر برای لایه ازن استفاده می‌کنند. عایق‌های فوم در هنگام حریق گازهای بسیار سمی و کشنده تولید می‌کنند. بلنکت‌های آیروژل منعطف از جنس سیلیکای آمورف بوده و هیچگونه مضرات انسانی یا زیست محیطی ندارند. طول عمر بالا و ضخامت و حجم بسیار کمتر عایق‌های آیروژل سبب می‌شود تا پسماند خاصی تولید نشود. ضایعات باقیمانده از بلنکت‌های آیروژل امکان استفاده به عنوان افزودنی در گچ، سیمان و رنگ را جهت ایجاد خصوصیات عایق حرارتی، رطوبتی و صوتی دارند.

مقاومت مکانیکی کششی، برشی و فشاری بسیار بالا

بلنکت‌های آیروژل از بسترهای فایبرگلس با الیاف بلند دوخت شده استفاده می‌نماند که تمامی این بستر از آیروژل سیلیکایی نانومتخلخل پر شده است. این بلنکت‌ها دارای استحکام کششی، برشی و فشاری بسیار بالایی هستند که سبب مزایای متعددی را ایجاد می‌کند. استحکام فشاری سبب می‌شود تا بتوان با بست‌های فلزی به خوبی عایق را روی سطوح مهار نمود. بسیاری از عایق‌های سنتی امکان فشرده شدن مناسب به سطح را ندارند و باقی ماند فضای خالی مابین عایق و سطحف کارایی عایق را به شدت کاهش می‌دهد. بلنکت‌های آیروژل خاصیت ارتجاعی داشته و با فشرده شدن روی سطحف به مرور زمان دچار فشردگی و خالی کردن زیر عایق ندارند. همچنین این خاصیت سبب می‌شود تا موقع تعمیرات و راه رفتن نفرات بر روی لوله های عایق‌کاری شده، کیفیت و کارایی عایق کاهش نیابد. مقاومت کششی و برشی بالای عایق نیز سبب می‌شود تا به خوبی بتوان سطح را بدون نگرانی از پارگی عایق، پوشش داد که کیفیت عایق‌کاری را بالا برده و کاهش اتلاف انرژی را بیشینه می‌کند. همچنین خصوصیات مکانیکی منحصر به فرد بلنکت‌های آیروژل تولید شرکت دانش نبیان پاکان آتیه نانودانش سبب می‌شود تا نیازی به استفاده از نگهدارنده های فلزی برای نصب نباشد که سبب کاهش هزینه‌های نصب و زمان نصب محسوسی می‌شود.

ضخامت و حجم مورد نیاز بسیار کم

بلنکت‌های آیروژل منعطف در ضخامت های ۶ و ۱۰ میلیمتر تولید می‌شوند و بر اساس دما و سطح نصب عایق از تعداد لایه‌های مختلف می‌توان استفاده نمود. به طور کلی حدود ۳ الی ۶ برابر ضخامت کمتر و حدود ۶ الی ۱۰ برابر حجم کمتر عایق در دماهای مختلف نسبت به عایق‌های سنتی مورد نیاز خواهد بود. ضخامت و حجم کمتر مورد نیاز سبب می‌شود تا فضای اشغال شده توسط عایق به شدت کاهش یافته و هزینه های طراحی لوله‌ها و تجهیزات می‌تواند کاهش قابل توجهی داشته باشد. در برخی از موارد فضای کافی برای عایق‌کاری خطوط با عایق‌های سنتی در ضخامت بالا وجود ندارد که استفاده از عایق‌های آیروژل می‌تواند بسیار موثر باشد. همچنین مطابق استانداردهای نصب عایق‌هایی مانند پشم سنگ، نیاز است تا برای ضخامت‌های بالا از ساپورت‌های فلزی جوشگاری شده روی خطوط لوله و تجیهزات به عنوان نگهدارنده استفاده شود که هزینه و زمان نصب را به شدت افزایش می‌دهد. تصویر نصب عایق و ساپورت عایق ضخامت و حجم کمتر عایق سبب می‌شود تا نصب راحت، کم هزینه و سریعی انجام شود. هزینه های حمل و نقل و انبارداری و دفع پسماند نیز با حجم کمتر به شدت کاهش می‌یابند (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- کمترین ضخامت مورد نیاز از بلنکت آیروژل در دماهای مختلف نسبت به انواع عایق‌های سنتی

ساخت عایق‌های ژاکتی مدرن

از عایق‌های ژاکتی در بخش‌های مهم صنایع مانند توربین‌های گازی، شیرآلات و غیره استفاده می‌شود. عایق‌های قابلیت باز و بسته کردن راحت و سریع برای تعمیرات و بازرسی دارند. استفاده از بلنکت‌های آیروژل در عایق‌های ژاکتی سبب می‌شود تا با کمترین ضخامت ممکن امکان ساخت ژاکت‌های سبک، نازک، با قابلیت پوشش دهی سطح دقیقتر و سرعت نصب بالاتر تهیه نمود. بلنکت‌های آیروژل طول عمر بالایی داشته و در درون ژاکت‌ها عمر مفید آنها افزایش نیز می‌یابد. ژاکت‌های کوچکتر سبب می‌شوند تا دسترسی به شیرآلات راحتتر بوده و مصرف پارچه های نسوز و هزینه دوخت کاهش یابند (شکل ۱۹).

شکل ۱۹- عایق‌های ژاکتی حاوی بلنکت آیروژل نصب شده روی لاینر اگزاست توربین گازی (تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش)

عدم نیاز به آماده سازی خاص بستر عایق کاری

در نصب انواع عایق‌های سنتی مانند پلی یورتان‌های تزریقی نیاز است تا سطح عایق‌کاری سندبلاست شده و کاملا آثار خوردگی سطوح از بین برود که هزینه بالایی ایجاد می‌کند. بلنکت‌های آیروژل بر اساس خصوصیات ضد آب و خنثی خود نیاز به آماده سازی خاصی نداشته و روی هر سطحی قابلیت استفاده دارند. پوشش‌های ضد خوردگی زینک ریچ نیز برای بلنکت‌های آیروژل مورد نیاز نمی‌باشد.

نداشتن هیچ کدام از مشکلات عایق‌های رایج و سنتی

انواع عایق‌های سنتی گرم و سرد دارای مشکلات مختلفی می‌باشند که در جدول ۱ به طور خلاصه عنوان شده‌اند. در برخی موارد مشکلات ناشی از نصب عایق‌های سنتی می‌تواند بیشتر از سود ناشی از کاهش مصرف انرژی آنها باشد. بلنکت‌های آیروژل هیچکدام از مشکلات عایق‌های سنتی را دارا نمی‌باشند.

جدول ۱- بررسی ضعف‌های انواع عایق‌های برودتی و حرارتی رایج مانند پشم شیشه، پشم سنگ، پلی یورتان و غیره

ردیف	ضعف‌های انواع عایق‌های رایج	ردیف	ضعف‌های انواع عایق‌های رایج
۱	طول عمر کم از ۱ تا چند سال و نیاز به تعویض عایق	۱۸	سختی و هزینه عایق‌کاری سطوح پیچیده
۲	ضریب انتقال حرارت بالا در بازه دمایی عملیاتی	۱۹	نیاز ضروری به پوشش دهی با ورق آلومینیومی ضخیم
۳	نرخ نفوذ حرارت بالا و اتلاف انرژی زیاد	۲۰	دسترسی سخت و زمان بر به محل تعمیرات یا بازرسی
۴	سرعت نصب پایین و زمان نصب طولانی	۲۱	نیاز به اصول نصب هزینه بر و پیچیده در ضخامت‌های بالا
۵	هزینه بالای تجهیزات نگهدارنده مختلف	۲۲	پسماند بسیار زیاد تولیدی و مشکلات دفع آن
۶	حجیم و هزینه حمل و نقل بالا	۲۳	رشد جلبک و انواع میکروارگانیسمها روی عایق‌ها
۷	ریزش اجزاء عایق‌ها و هزینه تعمیر و تعویض	۲۴	حجم بالای عایق‌ها و اشغال فضای زیاد روی تجهیزات
۸	جذب رطوبت و افت شدید کارایی عایق	۲۵	تولید زیاد انواع آلاینده‌ها ناشی از کارایی پایین عایق‌ها
۹	جذب آب و رطوبت و خوردگی شدید زیر سطح عایق	۲۶	عدم امکان اجرا در ساختمانها به خاطر ضعف‌های زیاد
۱۰	ضد آب نبودن و طول عمر کم ناشی از جذب و دفع آب	۲۷	ریزش سریع در صنایع دارای لرزش محسوس
۱۱	آویزان شدن عایق و عدم پوشش مناسب سطح	۲۸	ترک برداشتن عایق به مرور زمان و افت کارایی
۱۲	نیاز به بستن عایق با شرایط ویژه و هزینه بر	۲۹	هزینه بالای انبارداری ناشی از حجم بالای عایق
۱۳	عدم زیست سازگار بودن اکثر عایق‌های رایج	۳۰	زمان دیرتر راه‌اندازی واحدهای صنعتی جدید ناشی از نصب کند
۱۴	عدم ثبات در کارایی عایق به مرور زمان بعد از نصب	۳۱	هزینه بسیار بالای نصب برخی عایق‌های رایج مانند فوم گلس
۱۵	بازه دمایی کم قابل تحمل توسط عایق	۳۲	ضد حریق نبودن انواع عایق‌های سنتی و کاهش ایمنی آتش سوزی
۱۶	اتلاف انرژی بالا و هزینه آن	۳۳	نیاز به تجهیزات صنعتی مخصوص جهت نصب برخی عایق‌های سنتی
۱۷	خوردگی زیر سطح عایق در بسیاری از عایق‌های رایج	۳۴	تولید دود و مواد سمی خطرناک حجیم در هنگام آتش سوزی

راه‌اندازی سریع واحدهای صنعتی جدید

عایق‌کاری واحدهای صنعتی جدید پالایشگاهی و پتروشیمی و غیره جزء آخرین مرحله ساخت قبل از راه‌اندازی و تولید محصول است. بعد از نشتی یابی و رفع ایرادات ساخت و زمانی که واحد آماده بهره برداری شد، عایق‌کاری بخش‌های مختلف انجام و نهایی می‌شود. استفاده از بلنکت‌های آیروژل حدود ۳۳ درصد سریعتر از عایق‌های سنتی انجام شده و مدت زمان شروع به تولید و فروش واحد را کاهش محسوس می‌دهد. با توجه به اینکه واحدهای نفتی و گازی تولید پیوسته در مقادیر بسیار بالای روزانه داشته و محصولات آنها مشتری دائمی دارد، لذا هر روزی که زودتر تولید انجام شود، درآمد سرشاری را عاید سرمایه‌گذارن خواهد کرد.

عایق صوتی بسیار قوی

بلنکت‌های آیروژل به واسطه ساختار نانومتری خود و سطحی ویژه بسیار بالای حدود ۵۰۰ متر مربع به ازای هر گرم و اندازه حفرات ۲۰ الی ۳۰ نانومتری به خوبی می‌توانند فرکانس‌های مختلف تولید شده در صنایع را جذب نمایند و محیطی آرامتر و با آلودگی صوتی کمتری ایجاد نمایند. بلنکت‌های آیروژل منعطف در بدنه دیوارها، کف و سقف ساختمانها و سوله‌های مختلف صنعتی قابل استفاده هستند که عایق صوتی بودن می‌تواند مزیت مهمی باشد. ضرایب جذب شدت صوت در فرکانس‌های مختلف در جداول آورده شده است.

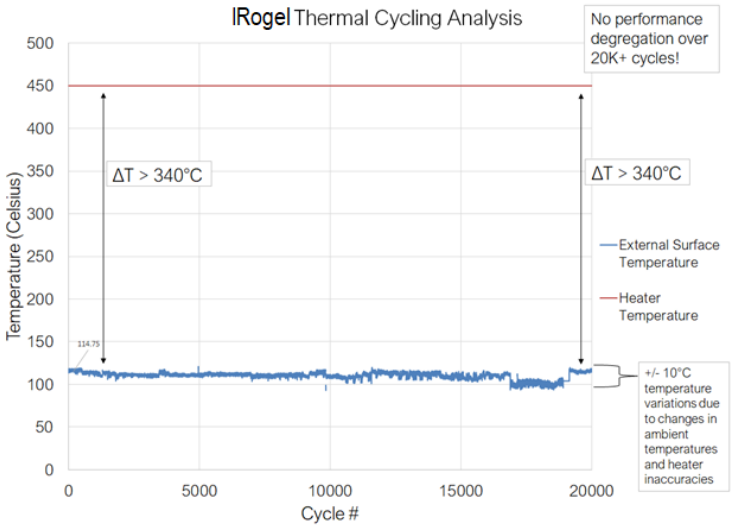
عدم رشد جلبک و قارچ

نفوذ رطوبت در عایق‌های سنتی و جنس آب دوست این عایق‌ها سبب می‌شود تا انواع جلبکها و قارچها بر روی عایق‌ها رشد کنند که علاوه بر تسریع خوردگی و شدت بخشیدن به آن، موجبات افزایش اتلاف انرژی و از بین رفتن کارایی عایق را فراهم می‌کنند. برخورد نفرات با میکروارگانیسم‌های رشد کرده بر روی عایق می‌تواند موجبات آلرژی و بیماریهایی را فراهم آورد و ظاهر بسیار بدی را برای سطوح عایق‌کاری شده ایجاد می‌کند (شکل ۲۰). بلنکت‌های آیروژل با خاصیت ضد آبی خود و حفرات نانومتری امکان رشد هیچگونه جلبک یا قارچی را در درون و سطح خود نمی‌دهند و کارایی عایق بدون مشکل باقی می‌ماند.

شکل ۲۰- کندانس شدن رطوبت روی خطوط ال ان جی عسلویه و زنگ زدگی و رشد میکروارگانیسمها روی عایق

مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی سرد و گرم

شوک حرارتی زمانی رخ می‌دهد که مواد به سرعت در معرض دماهای شدید قرار گیرند. قرار گرفتن شدید و یا مکرر در معرض تغییرات ناگهانی دما می‌تواند منجر به کاهش قدرت یا عملکرد عایق شود. بسته به ضرایب انبساط حرارتی، مواد مختلف ممکن است تحت سطوح مختلفی از انبساط قرار گیرند که می‌تواند باعث پارگی، پارگی و شکستگی شود. از سوی دیگر، چرخه حرارتی، الگویی را توصیف می‌کند که در آن اجزاء به طور مداوم در معرض دو یا چند درجه حرارت متفاوت قرار می‌گیرند. در یک فرآیند چرخه حرارتی، یک جزء یا ماده در یک محدوده دما در یک الگوی چرخه‌ای و قابل پیش‌بینی دچار تغییرات می‌شود. به عبارت دیگر، قرار گرفتن در معرض شوک حرارتی ممکن است در یک مورد اتفاق بیفتد، در حالی که چرخه حرارتی ممکن است به طور مکرر رخ دهد (شکل ۲۱).

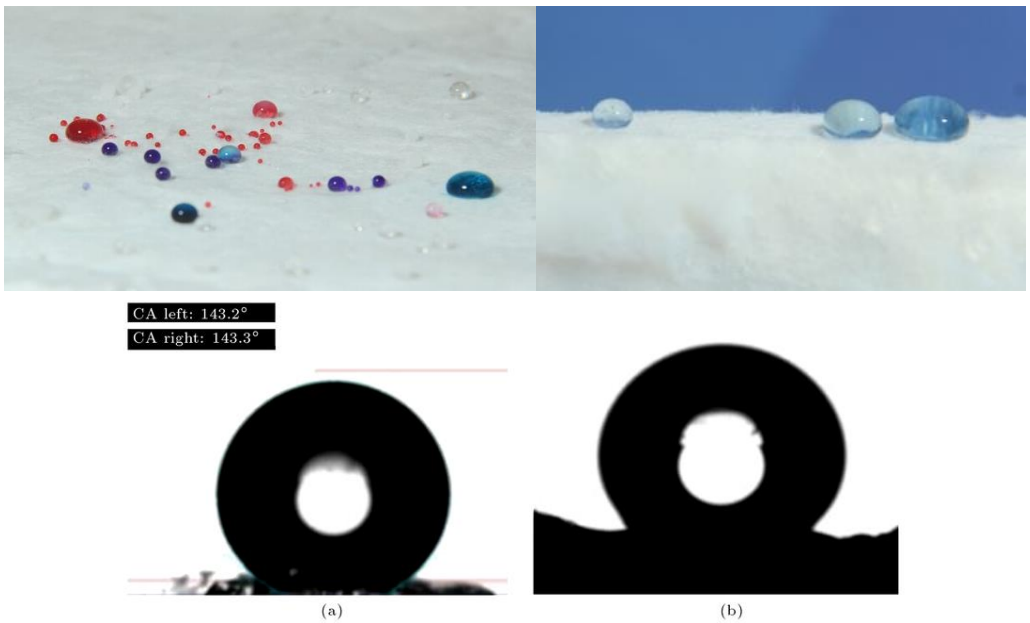


شکل ۲۱- مقاومت بسیار بالای عایق‌های بلنکت آیروژل منعطف در برابر شوک‌های حرارتی سرد و گرم

برای تست شوک حرارتی عایق در معرض ۲۰۰۰۰ چرخه حرارتی در ۴۵۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد بدون اینکه کاهش قابل اندازه‌گیری در عملکرد نشان دهد. هر ۳ دقیقه یکبار دمای عایق افزایش یافته و سپس خنک می‌شود. بسته به کاربرد، اجزاء و مواد عایق ممکن است نیاز به مقاومت در برابر انواع ضربه‌ها و تنش‌ها داشته باشند .علاوه بر شوک حرارتی و چرخه حرارتی، برخی از سیستم‌ها به قطعات یا موادی نیاز دارند که بتوانند در برابر شوک مکانیکی یا تست ارتعاش مقاومت کنند.

ضد آب بودن بلنکت‌های آیروژل

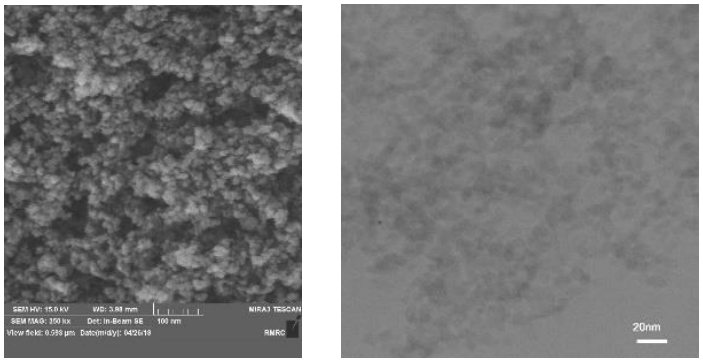
تخلخل نانومتری عایق‌های آیروژل و گروه های عاملی خاص ضد آب روی آنها در کنار سطح ویژه بسیار بالای حدود ۵۰۰ متر مربع به ازای هر گرم آیروژل، سبب می‌شود تا بلنکت‌های آیروژل خاصیت ضد آبی فوق العاده ای با زاویه تماس بیش از ۱۴۰ درجه داشته باشند (شکل ۲۲). خاصیت ضد آب بودن تنها در سطح عایق نبوده و تمامی بخش‌های داخلی عایق نیز کاملا ضد آب است. ضد آب بودن بلنکت‌های آیروژل سبب افزایش شدید طول عمر، حفظ کارایی اولیه عایق به مرور زمان، جلوگیری از خوردگی زیر سطحی، جلوگیری از تشکیل کمربند انتقال انرژی در عایق، عدم تشکیل کندانس و جذب آن، عدم مچاله شدن عایق در اثر جذب آب و عدم امکان رشد میکروارگانیسم‌ها در سطح عایق می‌شود. خاصیت ضد آب بودن کاملا پایدار بوده و به مرور زمان از بین نمی‌رود. این خاصیت بلنکت‌های آیروژل تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش سبب می‌شود بتوان از آنها در هر شرایط آب و هوایی همانند شرایط شرجی عسلویه استفاده کرد.



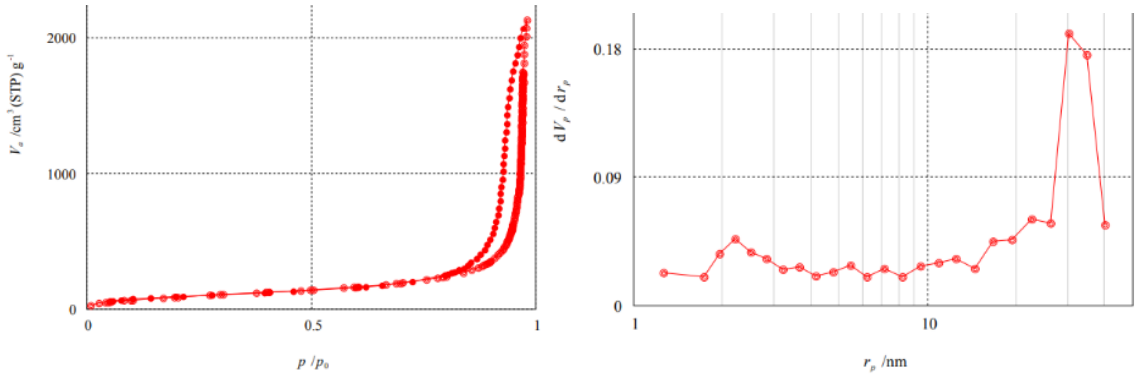
شکل ۲۲- خاصیت فوق آب گریزی بلنکت‌های آیروژل نانومتخلخل تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش با زاویه تماس بیش از ۱۴۰ درجه

خصوصیات نانومتری عایق‌های آیروژل

عایق‌های حرارتی و برودتی آیروژل دارای خصوصیات بسیار کاربردی و منحصر به فردی هستند که سبب شده است امروزه به شدت از طرف صنایع بزرگ مورد توجه و استفاده قرار بگیرند. عایق‌های عمدتا بر اساس حبس هوای ساکن در حفرات خود مانع از انتقال حرارت می‌شوند. عایق‌های آیروژل دارای دانسیته بسیار کم بوده و حفرات آنها در ابعاد ۲۰ الی ۳۰ نانومتر می‌باشد (شکل ۱). این دو خصوصیت سبب می‌شود تا ضریب انتقال هدایتی حرارت و انتقال حرارت جابجایی در آیروژل‌ها بسیار کندتر از عایق‌های رایج با حفرات میلیمتری یا میکرومتری باشد. در اشکال زیر تصاویر TEM و SEM مربوط به آیروژل‌های تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش نشان داده شده است. حفرات نانومتری مشهود بوده و تصاویر TEM نشان می‌دهد ذرات سازنده اندازه حدود ۵ نانومتر دارند (شکل ۲۳).



شکل ۲۳- تصاویر TEM و SEM آیروژل سیلیکایی تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش



شکل ۲۴- نتایج تست اندازه گیری اندازه حفرات (BJH) و مساحت سطح ویژه (BET) آیروژل‌های سیلکایی تولید شرکت پاکان آتیه نانودانش

نتایج آزمایش‌های BET عمده اندازه حفرات عایق‌های آیروژل را در محدوده ۳۰ نانومتر و سطح ویژه را ۴۰۰ متر مربع بر گرم نشان می‌دهد (شکل ۲۴).

استانداردهای عایق‌های بلنکت آیروژل

عایق‌های حرارتی و برودتی آیروژل به عنوان نسل جدید عایق‌ها، دارای استاندارد مخصوص ASTM C ۱۷۲۸ می‌باشند. این استاندارد دارای چندین زیر مجموعه می‌باشد که در ادامه تست‌های انجام گرفته بر روی نمونه بلنکت منعطف آیروژل (IRogel) با ضخامت اسمی ۱۰ میلیمتر تولید شرکت دانش بنیان پاکان آتیه نانودانش در محل پژوهشگاه متالورژی رازی انجام گرفته است.

آزمون استاندارد اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی ASTM C۱۷۷-۱۹

آزمون برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی عایق‌های مختلف در دماهای متفاوت استفاده می‌شود. نمونه در ابعاد ۳۰ سانت در ۳۰ سانت مابین صفحات با دماهای مختلف و کنترل شده قرار گرفته و بعد از یکنواخت شدن و پایدار شدن شرایط، ضریب هدایت حرارتی از قانون فوریه محاسبه می‌شود. نتایج اندازه‌گیری برای عایق‌های آیروژل در چند دمای مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج اندازه گیری ضرایب انتقال حرارت بلنکت منعطف آیروژل (IRogel™) در دماهای مختلف

ردیف	ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر کلوین)	دما (سلسیوس)
۱	۰.۰۲۱	۲۰
۲	۰.۰۴	۲۰۰
۳	۰.۰۵۴	۴۰۰
۴	۰.۰۷۹	۶۰۰

عایق‌های آیروژل دارای کمترین ضریب هدایت حرارت مابین تمامی عایق‌های رایج دنیا بوده و این خصوصیت سبب می‌شود تا با کمترین ضخامت ممکن بتوان به کارایی حرارتی مد نظر رسید. ضخامت ۳ الی ۶ برابر کمتر مورد نیاز عایق‌های آیروژل نسبت به عایق‌های سنتی سبب می‌شود تا نصب سریع و راحت، وزن کم، فضای اشغالی کمتر و زمان راه‌اندازی سریعتر واحد ممکن شود. با توجه به اینکه مرحله عایق‌کاری واحدهای صنعتی جدید به عنوان آخرین مرحله قبل از راه‌اندازی واحد می‌باشد، لذا هرچه سریعتر بتوان واحد را راه‌اندازی کرد، درآمد بیشتری عاید صنعت می‌شود. به طور کلی حدود ۳۵ درصد زمان راه‌اندازی واحد کاهش می‌یابد.

آزمون استاندارد عملکرد نسبت به سطح داغ (ASTM C ٤٤٧ / ASTM C ٤١١ / ASTM D ١٧٢٨)

در این آزمون عملکرد عایق نسبت به یک سطح داغ در مدت زمان مشخص سنجیده می‌شود. عایق باید بتواند برای مدت‌های طولانی دماهای بالا را بدون تخریب یا افت کارایی تحمل نماید. در این آزمون نمونه‌های بلنکت به مدت ۹۶ ساعت بر روی یک سطح فلزی با دمای ۶۴۹ درجه سلسیوس قرار داده می‌شود. دمای سطح فلز در تمام طول آزمایش ثابت نگه داشته می‌شود. بعد از انجام آزمون میزان تاب برداشتن نمونه (در صورت تاب برداشتن) اندازه گیری می‌شود. بعد از انجام آزمون برای نمونه بلنکت منعطف آیروژل تولید شرکت دانش بنیان پاکان آتیه نانودانش (IRogel™) نتایج توسط پژوهشکده متالورژی رازی زیر گزارش شده است:

- هیچ گونه تاب برداشتگی (Warpage) مشاهده نشد.
- هنگام انجام آزمون، شعله ور شدن نمونه، انتشار دود و سرخ شدگی مشاهده نشد.
- پس از انجام آزمون نیز عیوبی نظیر ترک خوردگی و لایه لایه شدن در نمونه مشاهده نشد.

در صنایع مختلف دماهای بالایی وجود دارد که امکان اتلاف انرژی بیشتر و قویتر را در پی دارد. عایق‌های سنتی در دماهای بالای ۴۰۰ درجه سلسیوس با افت کارایی بسیار زیادی مواجه می‌شوند. عایق‌های منعطف آیروژل بهترین گزینه برای عایق‌کاری چنین سطوح داغ می‌باشند و با توجه به نتایج آزمون می‌توانند برای مدت‌های بسیار طولانی مانع از اتلاف انرژی شوند. در کوره ها، توربین‌های گازی، خروجی کوره ها، راکتورهای مختلف دماهای ۴۰۰ الی ۶۵۰ درجه سلسیوس وجود دارند.

آزمون استاندارد انقباض خطی (ASTM C ٣٥٦ / ASTM C ١٧٢٨)

مواد مختلف در هنگام قرار گیری در معرض دماهای بالا دچار ذوب شدن موضعی شده و حجم آن‌ها تا حدودی کاهش می‌یابد. عایق‌هایی که برای دماهای بالا طراحی شده‌اند باید بتوانند دماهای بالای‌کاری را بدون انقباض قابل توجه تحمل نمایند. انقباض بی از حد عایق می‌تواند سبب عاری شدن بخشی از سطح از عایق شده و مشکلات مختلفی به وجود بیاورد. در این آزمون ۴ نمونه به مدت ۴۸ ساع در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس خشک شده و سپس طول و عر نمونه‌ها به طور دقیق اندازه گیری می‌شود. نمونه‌ها به ترتیب در کوره قرار داده شده و دمای کوره به ۶۴۹ درجه سلسیوس رسانده شده و نمونه‌های به مدت ۲۴ ساعت در این دما باقی می‌مانند. سپس نمونه‌ها از کوره خارج شده و بعد از همدما شدن با محیط ابعاد آن‌ها مجددا با دقت بالا و طبق روابط استاندارد اندازه گیری می‌شود.

در تست نمونه‌های بلنکت آیروژل تولید داخل هیچ گونه تغییر ظاهری در نمونه‌های مشاهده نشد (جدول ۳). در طول انجام آزمایش شعله ور شدن نیز گزارش نشد. در جدول زیر میزان انقباض خطی در جهت طول و عرض عایق‌ها نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود میزان متوسط تغییر طول حدود ۰.۸ درصد می‌باشد که نسبت به میزان ۲ درصد قابل قبول مقدار بسیار کمی دارد. عایق‌های سنتی در این دما به شدت دچار انقباض خواهند شد.

جدول ۳- نتایج انقباض خطی بلنکت منعطف آیروژل (IRogel™) در دمای ۶۴۹ درجه سلسیوس به مدت ۹۶ ساعت

شماره نمونه	انقباض خطی در جهت طول ٪	انقباض خطی در جهت عرض ٪
۱	۰.۸۷	۰.۷۳
۲	۰.۷۵	۰.۷۴
۳	۰.۹۱	۰.۸۲
۴	۰.۹۵	۱.۰۱
میانگین	۰.۸۷	۰.۸۳

آزمون استاندارد میزان عایق صوتی

عایق‌های حرارتی به خاطر تخلخل بالا و دانسیته کم و سطح ویژه بالا معمولا دارای خاصیت عایق صوتی مناسبی نیز می‌باشند. عایق‌های آیروژل با دارا بودن تخلخل‌های نانومتری و سطح ویژه بالای ۴۰۰ الی ۱۶۰۰ مترمربع بر گرم دارای خاصیت عایق صوتی بسیار بهتر و قویتری نسبت به عایق‌های رایج هستند. عایق صوتی بهتر سبب می‌شود در کاربردهای مختلف در صنایع و ساختمان‌ها میزان آلودگی صوتی به شدت کاهش یابد که امروز جزء معزلات کلان شهرها می‌باشد. جهت بررسی عایق صوت بودن، نمونه در داخل محفظه استاندارد به صورتی قرار می‌گیرد که مانع از عبور صوت شود. در این حالت با ایجاد شدت و فرکانس‌های مختلف از یک سمت و اندازه‌گیری شدت صوت در سمت دیگر آن، میزان کاهش شدت صوت توسط نمونه اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول ۴ زیر ارائه شده است.

جدول ۴- میزان کاهش شدت صوت در فرکانس‌های مختلف بلنکت منعطف آیروژل (IRogel)

موقعیت	فرکانس ۱۰۰ هرتز	۴۴۰ هرتز	۱۰۰۰ هرتز	۱۰۰۰۰ هرتز
شدت صوت اندازه گیری شده در حضور نمونه (db)	۸۱.۸	۱۰۲.۲	۸۴.۶	۶۵.۴
شدت صوت اندازه گیری شده بدون حضور نمونه (db)	۱۰۲.۳	۱۱۵.۳	۱۱۳.۷	۱۱۴.۷
میزان کاهش شدت صوت (db)	۲۰.۵	۱۳.۱	۲۹.۱	۴۹.۳

آزمون استاندارد مقاومت به ارتعاش (ASTM C ۵۹۲)

در بسیاری از صنایع بزرگ، سطوح عایق‌کاری شده تجهیزات مختلف در معرض لرزش با فرکانس‌های مختلفی هستند که سبب می‌شود الیاف عایق‌های سنتی مانند پشم سنگ یا شیشه در مدت کوتاهی دچار ریزش شوند. در آزمون مقاومت به ارتعاش نمونه اولیه با دقت وزن شده و فاصله سطح نمونه با استفاده از سیستم اندازه گیری دقیق در ۴۰ نقطه از کف سطح صاف اندازه گیری می‌شود. سپس نمونه‌ها در معرض سطح داغ با دمای ۳۹۹ درجه سلسیوس به مدت ۵ ساعت قرار می‌گیرند. در ادامه نمونه‌ها در معرض آزمون رتعاش با فرکانس ۱۲ هرتز و دامنه ۳ میلیمتر قرار می‌گیرند. در انت‌های آزمون وزن نمونه‌ها و فاصله بخش‌های مختلف از کف مجددا اندازه گیری می‌شود. نتیجه آزمون برای نمونه بلنکت منعطف آیروژل تولید داخل در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- اندازه‌گیری میزان مقاومت به ارتعاش بلنکت منعطف آیروژل (IRogel™)

پارامتر	قبل از آزمون	بعد از آزمون	مقدار	نتیجه	معیار پذیرش	وضعیت
وزن (گرم)	۱۳۹۳.۷	۱۳۷۴.۴	درصد تغییر وزن ٪	۱.۳۸	۱۵ ٪ بیشینه	قبول
میانگین طول (میلیمتر)	۹۱۶.۴۰	۹۱۲.۴۵	میزان تغییر sagging در راستای طولی (میلیمتر)	۳.۹۵	۷۶ میلیمتر بیشینه	قبول

آزمون استاندارد اندازه گیری استحکام فشاری (ASTM C ۱۶۵)

عایق‌های سنتی مانند پشم شیشه یا پشم سنگ دارای مقاومت مکانیکی بسیار کمی بوده و با کمترین فشار، منقبض شده و کارایی خود را از دست می‌دهند. با توجه به اینکه در صنعت برای بستن و مهار کردن عایق نیاز به محکم کردن آن‌ها روی سطوح است، بدین منظور

از ورق‌های آلومینیومی به عنوان نگهدارنده استفاده می‌شود. ورق‌های آلومینیومی علاوه بر ایجاد هزینه و زمان تهیه بسیار بالا، امکان چسباندن دقیق عایق به سطوح را نداشته و بعد از مدت کوتاهی عایق به قسمت پایین پوشش آلومینیومی ریزش کرده و یا از سطح آویزان می‌شود. علاوه بر این نفوذ آب به داخل پوشش آلومینیومی سبب جذب آن توسط عایق شده و خوردگی زیر سطحی ایجاد می‌کند. عایق‌های بلنکت آیروژل مقاومت مکانیکی بسیار بالایی داشته و به راحتی می‌توان با بست‌های فلزی به صورت محکم آن‌ها را روی سطوح مهار نمود. چسبیدن کامل عایق به سطح سبب جلوگیری از درزهای حرارتی و اتلاف انرژی به صورت پنهان می‌شود. همچنین خاصیت ارتجاعی این عایق‌ها سبب می‌شود تا به مرور زمان دچار تغییر شکل و خالی کردن قسمت زیرین خود نشوند. در جدول ۶ نتایج تست استاندارد نشان داده شده است.

جدول ۶- نتایج اندازه‌گیری استحکام فشاری بلنکت‌های منعطف آیروژل (IRogel™)

ردیف	ابعاد نمونه (mm*mm)	سطح مقطع تحت فشار (mm^2)	سرعت (mm/min)	ارتفاع نمونه (mm)	میزان فشردگی (mm)			نیروی فشاری (N)			استحکام فشاری (MPa)		
					۳۰٪	۵۰٪	۷۰٪	۳۰٪	۵۰٪	۷۰٪	۳۰٪	۵۰٪	۷۰٪
۱	۵۲.۹۹*۵۳.۲۸	۲۸۲۳.۳۱	۱.۳	۱۱.۶۹	۳.۵۱	۵.۸۵	۸.۱۸	۴۳۴.۷۹	۱۵۸۹.۵۲	۴۸۸۴.۳۲	۰.۱۵۴	۰.۵۶۳	۱.۷۳
۲	۵۶.۵۴*۵۲.۱۵	۲۹۴۳.۸۷	۱.۳	۱۲.۳۳	۳.۷۰	۶.۱۷	۸.۶۳	۳۵۳.۲۶	۱۳۴۲.۴۰	۴۲۹۸..۰۵	۰.۱۲۰	۰.۴۵۶	۱.۴۶
۳	۵۴.۵۶*۵۳.۰۶	۲۸۹۴.۹۵	۱.۳	۱۰.۸۵	۳.۲۶	۵.۴۳	۷.۶۰	۵۱۲.۴۱	۱۶۷۹.۰۷	۴۷۱۸.۷۷	۰.۱۷۷	۰.۵۸۰	۱.۶۳
۴	۵۴.۸۳*۵۳.۹۳	۲۹۵۶.۹۸	۱.۳	۱۲.۷۸	۳.۸۳	۶.۳۶	۸.۹۵	۴۲۸.۷۶	۱۷۶۲.۳۶	۵۸۸۴.۳۹	۰.۱۴۵	۰.۵۹۶	۱.۹۹
میانگین											۰.۱۴۹	۰.۵۴۹	۱.۷

آزمون استاندارد تعیین انعطاف پذیری یا سفتی عایق‌های معدنی (ASTM C ۱۱۰۱/ ASTM D ۱۷۲۸)

انعطاف عایق‌های حرارتی و بردتی میزان و راحتی کاربرد آن‌ها را در بسیاری از موارد تعیین می‌کند. عایق‌های منعطف امکان استفاده در بخش‌های بیشتری از صنایع را دارند. برای اندازه گیری انعطاف عایق نمونه در ابعاد مشخص بر روی یک لوله آهنی با قطر خارجی ۲۱.۳ میلیمتر و با زاویه ۹۰ درجه خم شده و سپس سطح بیرونی از نظر ایجاد گسیختگی مورد بازرسی قرار می‌گیرد. عایق‌های آیروژل علاوه بر اینکه دچار گسیختگی نمی‌شوند، بلکه پس از آزاد سازی نمونه به حالت اولیه خود بر می‌گردند که نمونه جزء عایق‌های انعطاف پذیر ارتجاعی طبقه بندی می‌شود.

آزمون استاندارد تعیین افزایش بیشینه دمای گرمازا (ASTM D ۱۷۲۸)

در برخی از عایق‌های سنتی مانند پشم سنگ از مواد پلیمری برای چسباندن الیاف استفاده می‌شود. این مواد در هنگام مواجهه با دمای بالا دچار احتراق شده و دمای عایق به شدت و سرعت بالا می‌رود. طبق استاندارد دمای داخل نمونه عایق نباید بالاتر از ۱۱۱ درجه سلسیوس نسبت به دمای سطح داغ ایجاد شده برسد. برای انجام، نمونه به مدت ۹۶ ساعت بر روی سطح داغ با دمای ۶۴۹ سلسیوس قرار داده شده و دمای داخل نمونه اندازه گیری می‌شود. در نمونه‌های بلنکت آیروژل ساخت داخل هیچگونه افزایش دمایی مشاهده نمی‌شود.

هزینه بلنکت‌های منعطف آیروژل تولید داخل

بلنکت‌های آیروژل نانومتخلخل منعطف دارای دانش فنی خاص تولید هستند که در اختیار کشور آمریکا بوده و شرکت پاکان آتیه نانودانش توانسته است این دانش فنی را بومی سازی نموده و با استفاده از مواد اولیه داخلی به صورت انحصاری در ایران و منطقه انواع عایق‌های آیروژل را تولید نماید. قیمت نمونه های آمریکایی انواع بلنکت‌های آیروژل در تصویر نشان داده است. نمونه های داخلی قیمتی بسیار کمتر از نمونه های آمریکایی داشته و در عین حال استانداردهای مشابهی را با کیفیت بالاتر اخذ کرده‌اند.

نتیجه گیری

عایق‌های آیروژل نانومتخلخل خصوصیات منحصر به فردی دارند که می‌توانند در صنایع مختلف از جمله پالایشگاه ها، پتروشیمی‌ها و ساختمان وارد شده و تحولی در کاهش میزان مصرف انرژی و تولید آلاینده‌ها داشته باشند. کشورهای در حال توسعه که به آخرین فناوریها در صنایع مختلف دسترسی ندارند، می‌توانند از عایق‌های نسل جدید برای کنترل مصرف انرژی استفاده کنند. مزایای متعدد بلنکت‌های آیروژل در بلند مدت هزینه های بسیار زیادی را از صنایع کاهش داده و مشکلات زیست محیطی، دفع پسماند و تولید آلاینده‌ها رفع می‌نماید. طول عمر بالای بلنکت‌های آیروژل و قابلیت تعویض مکرر آنها می‌تواند روند تعمیرات و زمان خاموشی واحدها را به شدت کاهش دهد. بر اساس روند گرمایش جهانی و اقدامات در حال انجام برای پیشگیری از آن، اقدام به ارتقاء استانداردهای عایق‌کاری در صنایع ایران می‌تواند گام مهمی در هماهنگی با پیمان‌های بین المللی کاهش مصرف انرژی باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بدین وسیله از شرکت دانش بنیان پاکان آتیه نانودانش بابت حمایت‌ها و در اختیار قرار دادن نتایج تست‌های مختلف کمال تشکر و قدردانی را دارد.

منابع

[۱] R. Wennersten, J. Fidler, and A. Spitsyna, "Nanotechnology: A New Technological Revolution in the ۲۱st Century," in *Handbook of Performability Engineering*, K. B. Misra, Ed. London: Springer London, ۲۰۰۸, pp. ۹۴۳-۹۵۲.

[۲] J. Lu, Z. Chen, Z. Ma, F. Pan ,L. Curtiss, and K. Amine, "The role of nanotechnology in the development of battery materials for electric vehicles," *Nature Nanotechnology,* vol. ۱۱, pp. ۱۰۳۱-۱۰۳۸, ۱۲/۰٦ ۲۰۱٦.

[۳] C. L. Ventola, "The nanomedicine revolution: part ۱: emerging concepts ",(in eng), *P & T : a peer-reviewed journal for formulary management,* vol. ۳۷, no. ۹, pp. ۵۱۲-۵۲۵, ۲۰۱۲.

[٤] O. B. Koshovets and N. A. Ganichev, "Nanotechnology and the new technological revolution: Expectations and reality," *Studies on Russian Economic Development,* vol. ۲۸, no. ٤, pp. ۳۹۱-۳۹۷, ۲۰۱۷/۰۷/۰۱ ۲۰۱۷.

[۵] P. K. Dey, "Energy management techniques," *International Journal of Energy Sector Management,* vol. ۹, no. ٤, ۲۰۱۵.

[٦] M. Golušin, S. Dodić, and S. Popov, "Chapter ۵ - Methods and Techniques for Implementation of Sustainable Energy Management," in *Sustainable Energy Management*, M. Golušin, S. Dodić, and S. Popov, Eds. Boston: Academic Press, ۲۰۱۳, pp. ۱٤۱-۲۱۰.

[۷] D. W. Yarbrough, "Thermal Insulation for Energy Conservation," in *Handbook of Climate Change Mitigation*, W.-Y. Chen, J. Seiner, T. Suzuki, and M. Lackner, Eds. New York, NY: Springer US, ۲۰۱۲, pp. ٦٤۹-٦٦۸.

[۸] M. Bojic, M. Miletić, and L. Bojic, "Optimization of thermal insulation to achieve energy savings in low energy house (refurbishment)," *Energy Conversion and Management,* vol. ۸٤, pp. ٦۸۱–٦۹۰, ۰۸/۰۱ ۲۰۱٤.

[۹] "مقررات ملّي ساختمان ايران مبحث نوزدهم صرفه جويي در مصرف انرژي," ۱۳۹٦.

[۱۰] د. ب. ر. و. ا. ک. ب. و. انرژي, "ترازنامه انرژي سال ۳۱۹٦," ۱۳۹٦.and م. ا. ب. و. انرژي

[۱۱] A. Cannavale *et al.*, "Modeling of an Aerogel-Based “Thermal Break” for Super-Insulated Window Frames," *Buildings,* vol. ۱۰, no. ۳, p. ٦۰, ۲۰۲۰.

[۱۲] F. Orsini, P. Marrone, F. Asdrubali, M. Roncone, and G. Grazieschi, "Aerogel insulation in building energy retrofit .Performance testing and cost analysis on a case study in Rome," *Energy Reports,* vol. ٦, pp. ۵٦-٦۱, ۲۰۲۰/۱۲/۰۱/ ۲۰۲۰.

[۱۳] P. C. Thapliyal and K. Singh, "Aerogels as Promising Thermal Insulating Materials: An Overview," *Journal of Materials,* vol. ۲۰۱٤, p.۲۰۱٤ ۲۷/۰٤/۲۰۱٤ ,۱۲۷۰٤۹ .

[١٤] A. Miros, B. Psiuk, and B. Szpikowska-Sroka, "Aerogel insulation materials for industrial installation: properties and structure of new factory-made products," *Journal of Sol-Gel Science and Technology,* vol. ٨٤, no. ٣, pp.٢٠١٧ ٠١/١٢/٢٠١٧ ,٥٠٦-٤٩٦ .

[١٥] M. Reim *et al.*, "Silica aerogel granulate material for thermal insulation and daylighting," *Solar Energy,* vol. ٧٩, no. ٢, pp. ١٣١-١٣٩, ٢٠٠٥/٠٨/٠١/ ٢٠٠٥.

[١٦] Z. Mazrouei-Sebdani, H. Begum, S. Schoenwald, K. V. Horoshenkov, and W. J. Malfait, "A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications," *Journal of Non-Crystalline Solids,* vol. ٥٦٢, p. ١٢٠٧٧٠, ٢٠٢١/٠٦/١٥/ ٢٠٢١.

[١٧] A. Roostaie, S. Mohammadiazar, H. Bargozin, and S. Ehteshami, "A Modified Nanoporous Silica Aerogel as a New Sorbent for Needle Trap Extraction of Chlorobenzenes from Water Samples," *Chromatographia,* vol. ٨١, no. ٤, pp. ٦٤٩-٦٥٥, ٢٠١٨/٠٤/٠١ ٢٠١٨.

[١٨] H. Bargozin, L. Amirkhani, J. S. Moghaddas, and M. M. Ahadian, "Synthesis and Application of Silica Aerogel-MWCNT Nanocomposites for Adsorption of Organic Pollutants," *Scientia Iranica,* vol. ١٧, no. ٢, pp. -, ٢٠١٠.