Journal of Health and Safety at Work 2023; 13(2): 328-344

REVIEW ARTICLE

Improvement of Thermal Insulation Performance Using Nano -Materials in Heat Control: Systematic Review

Maryam Ghaljahi[1,2], Elnaz Rahimi[2], Azam Biabani[2], Zahra Beigzadeh[2], Farideh Golbabaei[2,*]

[1]Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran
[2]Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 2023-02-26 Accepted: 2023-05-01

ABSTRACT

Introduction: Numerous studies have been conducted on the development of modern insulators, including nano-insulators. However, a comprehensive study has yet to be performed to review and investigate the thermal properties of these insulators. Consequently, this study aimed to examine the effect of nanomaterials on thermal insulation function.

Material and Methods: In this review, articles were searched for in English databases (PubMed, Web of Science, and ScienceDirect), Persian databases (Magiran, SID), and Google Scholar. The keywords used in the search were Nano Material, Nano Insulation, Thermal Insulation, Thermal Insulator Stability, and Thermal Conductivity in both English and Persian.

Results: Of the 4068 studies identified through search databases, 15 were selected according to the entry criteria. Among the studies, the three types of silicone, composite, and aerogel insulation had the highest frequency (each 26.67%), and SiO2 nanoparticles were the most prevalent nanomaterial (26.67%). According to the studies, the type of nanomaterial used in insulation will improve its properties such as thermal resistance, mechanical strength, dielectric strength, tensile strength, elasticity, and hardness.

Conclusion: The results of this study showed that using nanotechnology could be an effective step in improving the properties of insulation materials, the most important of which is increased thermal resistance. Moreover, nanotechnology insulators can prevent thermal energy loss, reduce costs, and provide safety and comfort.

Keywords: *Heat insulators, Nanotechnology, Heat, Systematic review*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ghaljahi M, Rahimi E, Biabani A, Beigzadeh Z, Golbabaei F. Improvement of Thermal Insulation Performance Using Nano -Materials in Heat Control: Systematic Review. Journal of Health and Safety at Work. 2023; 13(2): 328-344.

1. INTRODUCTION

Thermal energy is one of the most important forms of energy and its loss should be prevented. The function of insulation is to regulate heat transfer. To this end, numerous studies have been conducted on thermal insulation and nanomaterials. However, comprehensive research on the effect of various nanomaterials on thermal insulation performance has yet to be conducted. Therefore, this study aims to integrate previous research results and investigate the impact of nanomaterials on thermal insulation performance.

2. MATERIALS AND METHODS

In this review, articles were searched for in English databases (PubMed, Web of Science, and ScienceDirect), Persian databases (Magiran,

* Corresponding Author Email: *fgolbabaei@tums.ac.ir*

Copyright © 2023 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

Table 1: Summary of information related to the reviewed studies

First author (year)	Type of insulating base	Type of nanomaterial	The type of nanomaterials	The effect of nanomaterials on the properties and performance of thermal insulation				
				Tensile strength	Hardship	breaking point strain	Thermal conductivity	Radiant thermal conductivity
Sebnem Kemaloglu (2010)	Silicone rubber	Nano tube	Boron nitride	Decrease	Increase	Decrease	Increase	……
Gaosheng Wei (2011)	Aerogel	Nanoparticle	Calcium silicate	……	……	……	Decrease	……
Tao Gao (2013)	Polystyrene	Nanoparticle	SiO_2	……	…….	…….	Decrease	…….
Wei Yan (2014)	Composite Poly amid	Nano tube	Boron nitride	…….	…….	…….	Increase	Decrease
Dounia Bendahou (2015)	Composite Polypropylen	Nanofiber	Xeolite	……...	…….	…….	Decrease	…….
Jinchuan Zhao (2017)	Aerogel	Nanofiber	Polytetra fluoroethylene	……...	…….	…….	Decrease	…….
KHAN (2017)	Composite silicone rubber, epoxy and EPDM	Nanoparticle	SiO_2	Increase	Increase	Decrease	Decrease	…….
Yang (2018)	polyvinylidene fluoride	Nanoparticle	Titanium dioxide	…….	…….	…….	Decrease	Decrease
Chao Xu (2019)	Aerogel	Nanofiber	cellulose	…….	…….	…….	Decrease	…….
Rahmat Ullah (2020)	Silicone rubber HTV	Nanoparticle	Silica and alumina trihydrate	…….	…….	……	Decrease	……..
Faizan Tahir Butt (2020)	Silicone rubber	Nanoparticle	alumina	……	…….	…….	Increase	……..
Taghvaei (2020)	Porcelain coated with RTV silicone rubber	Nanoparticle	SiO_2 & ZNO	……	…….	……	Decrease	……..
El-Gamal (2021)	Porcelain	Nanoparticle	Alumina	……..	……	…….	Decrease	……
Saleh (2021)	Concrete	nanoparticle	SiO_2	……	……	…..	Decrease	…..
Yinghe Hu (2022)	Aerogel	Nanofiber	ANF	……	……..	…….	Decrease	…….

SID), and Google Scholar. The keywords used in the search were Nano Material, Nano Insulation, Thermal Insulation, Thermal Insulator Stability, and Thermal Conductivity in both English and Persian.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The studies retrieved were published between 2010 and 2022. Research was conducted on insulations made from silicone rubber, aerogel, polystyrene, polyvinylidene fluoride, porcelain, concrete, or a composite of various compounds. Among the nanostructures whose effects on thermal insulation performance were investigated were nanoparticles, nanotubes, and nanofibers. These nanomaterials were boron nitride, calcium silicate, silicon dioxide, zeolite, polytetrafluoroethylene, titanium dioxide nanoparticles, cellulose, alumina, alumina trihydrate, zinc oxide, and aramid. Among the input studies, the three types of silicone, composite, and aerogel insulation had the highest frequency (each 26.67%), and SiO_2 nanoparticles were the most prevalent nanomaterial (26.67%). According to studies, the type of nanomaterial utilized in insulation will enhance its properties such as thermal resistance, mechanical strength, dielectric strength, tensile strength, elasticity, and hardness.

4. CONCLUSIONS

This study examined research conducted on nano-insulations and demonstrated that the use of nanotechnology or the addition of various nano-sized materials improves the properties of the insulating material, most notably an increase in thermal resistance. In addition to the composition of the nanomaterial used, it was observed that other factors such as particle size or pore size, density of materials used, loading level and concentration of applied materials affect its effectiveness.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The study was founded by Tehran University of Medical Sciences (TUMS).

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار جلد ۱۳/ شماره ۲/ تابستان ۱۴۰۲ صفحات ۳۲۸-۳۴۴

ارتقای عملکرد عایق‌های حرارتی با استفاده از نانو مواد در کنترل گرما؛ مطالعه ی مروری سیستماتیک

مریم قلع جهی[۲،۱]، الناز رحیمی[۲]، اعظم بیابانی[۲]، زهرا بیگ زاده[۲]، فریده گلبابایی[۲*]

[۱] گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران
[۲] گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

مقدمه: مطالعات زیادی درخصوص توسعه ی عایق‌های مدرن، ازجمله نانو عایق‌ها در جهان انجام گرفته است؛ اما تاکنون مطالعه ی جامعی در جهت مرور و بررسی خواص حرارتی این عایق‌ها انجام نشده است؛ بنابراین، مطالعه ی حاضر با هدف بررسی تأثیرات استفاده از مواد نانو بر عملکرد عایق‌های حرارتی انجام گردید.

روش کار: در این مطالعه ی مروری، جستجوی مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی انگلیسی Web of Science، PubMed، ScienceDirect و پایگاه‌های اطلاعاتی فارسی SID، Magiran و موتور جستجوگر Google Scholar صورت گرفت. کلیدواژه‌های مورد استفاده برای جستجو، شامل Thermal Insulator Stability, Thermal Insulation, Thermal Conductivity Thermal به زبان انگلیسی و عایق، نانو مواد و هدایت حرارتی به زبان فارسی بود.

یافته ها: ۴۰۶۸ مطالعه، از طریق جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعاتی یافت شد. با توجه به معیارهای ورود، ۱۵ مقاله انتخاب گردید. در بین مطالعات ورودی، بیشترین فراوانی مربوط به سه نوع عایق سیلیکونی، کامپوزیتی و آئروژلی (هر یک ۲۶/۶۷٪) و رایج‌ترین نوع نانو ماده مورد استفاده، نانو ذرات SiO_2 (۲۶/۶۷٪) بود. بر اساس مطالعات مورد بررسی، نوع نانو ماده مورد استفاده در عایق، منجر به بهبود خواص آن مانند مقاومت حرارتی، استحکام مکانیکی، استحکام دی‌الکتریک، استحکام کششی، کشسانی، سختی و... می‌گردد.

نتیجه گیری: نتایج این مطالعه، نشان داد استفاده از فناوری نانو می‌تواند گامی مؤثر جهت بهبود خواص مواد عایق باشد که مهم‌ترین آن، افزایش مقاومت حرارتی است. بدین ترتیب، استفاده از عایق‌های حرارتی نانو می‌تواند باعث جلوگیری از هدر رفتن انرژی حرارتی، کاهش هزینه و تأمین ایمنی و آسایش شود.

کلمات کلیدی: *عایق‌های حرارتی، فناوری نانو، گرما، مرور سیستماتیک.*

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: *fgolbabaei@tums.ac.ir*

مقدمه

زندگی بشر، از ابتدای وجود تاکنون به ماده و انرژی وابسته است. یکی از مهم‌ترین انرژی‌ها، انرژی حرارتی است و بایستی از اتلاف آن جلوگیری نمود (۱). در حقیقت جلوگیری از هدر رفتن انرژی حرارتی، نه‌تنها موجب صرفه‌جویی در انرژی و هزینه می‌گردد، بلکه زمینه‌های ایمنی و آسایش را نیز فراهم می‌سازد که برای این مهم می‌توان از عایق‌های حرارتی استفاده نمود. عایق حرارتی، به‌عنوان غلافی مابین دو لایه جسم با درجه حرارت‌های مختلف عمل می‌کند و علاوه بر کاهش اتلاف حرارت از جسم گرم، انتقال گرما به جسم با دمای پایین‌تر را نیز کم می‌کند (۲).

به‌طور کلی، عملکرد عایق‌ها به‌صورت ذخیره ی انرژی، کنترل انتقال گرما، کنترل درجه ی حرارت، پیشگیری از یخزدگی، حفاظت در برابر سوختگی و کنترل آتش است (۳). عایق‌کاری دیوارها و سقف و نیز عایق‌کاری حرارتی تأسیسات ساختمان، کمتر از ۵ درصد سبب افزایش هزینه‌های ساختمان در این قسمت می‌شود؛ ولی از طرف دیگر، موجب کاهش حداقل ۴۰ درصدی هزینه‌های سرمایش و گرمایش می‌گردد (۴). در هنگام انتخاب عایق، توجه به برخی نکات حائز اهمیت است که ازجمله ی آن می‌توان به مقاومت حرارتی در طولانی‌مدت، استحکام فیزیکی، استحکام در برابر فشردگی، پایداری مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی و خطرات آتش‌سوزی و انفجار اشاره نمود (۲).

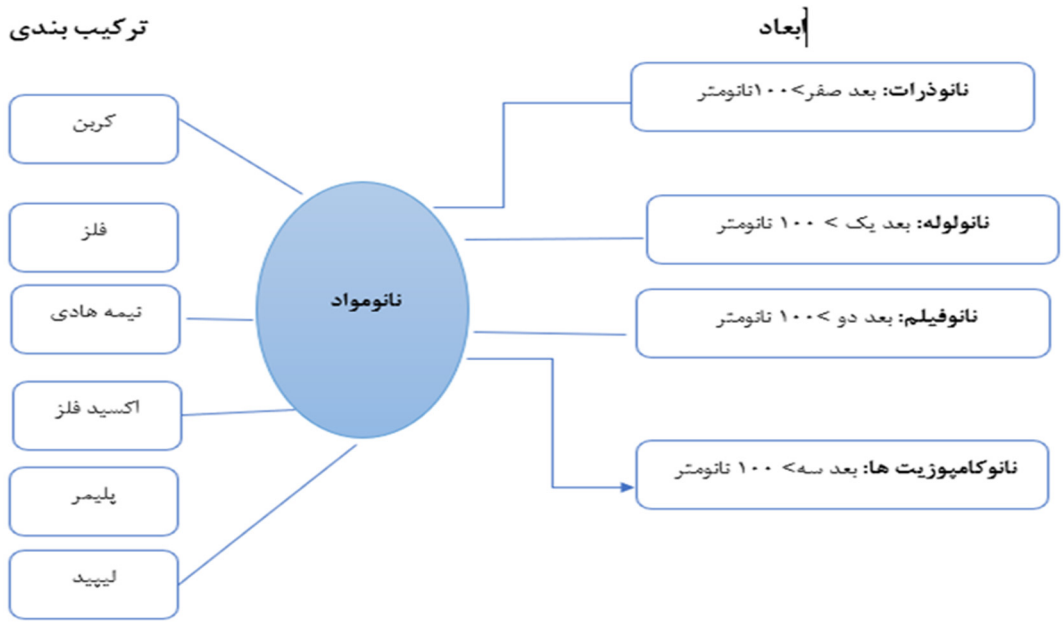
عایق‌های حرارتی با توجه به مواد پایه ی تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها، تنوع بالایی دارند و شامل عایق‌های پایه معدنی، پایه شیمیایی، پایه گیاهی، عایق‌های مرکب، عایق‌های مصالح ساختمانی و عایق‌های مدرن هستند (۳). امروزه، عایق‌های حرارتی مدرن با استفاده از تکنیک‌های مختلف و افزودن مواد شیمیایی به‌منظور ارتقای خصوصیات عایق‌های متداول طراحی می‌شوند. یکی از انواع عایق‌های مدرن، نانو عایق‌ها هستند که با استفاده از تکنولوژی نانو، تولید گردیده و به‌راحتی همانند رنگ بر روی سطوح فلزی و غیرفلزی توسط پیستوله و برس استفاده می‌شوند (۵).

مواد نانو با سطح ویژه ی بالا، چگالی کم و تخلخل بالا، نوعی از مواد کاربردی با عملکردهای متعدد هستند که به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند فیزیک، مهندسی شیمی، مهندسی اکولوژی، هوافضا، انرژی‌های نو و ساختمان‌ها استفاده می‌شوند (۶). یکی از ویژگی‌های مهم این ترکیبات، رسانایی حرارتی پایین آن‌ها است که آن‌ها را گزینه ی مناسبی جهت استفاده در عایق حرارتی می‌کند (۷). آلومینا، دی‌اکسید سیلیسیم، اکسید تیتانیوم، نیترید بور، اکسیدهای منیزیوم، نانو الیاف سلولزی و اکسید روی، ازجمله ی نانومواد هستند که جهت استفاده در عایق‌های حرارتی مورد توجه قرار گرفته‌اند (۸).

انواع عایق‌های حرارتی و کاربرد آن

عایق حرارتی، ماده یا ترکیبی از مواد است که در صورت استفاده ی صحیح، سرعت جریان گرما را با هدایت، همرفت و تشعشع به تأخیر می‌اندازد (۱۰). مواد عایق حرارتی، معمولاً از یک ماده ی ماتریکس جامد با یک ماده ی گازی که به‌طور تصادفی یا منظم در داخل سلول‌ها، منافذ یا میان‌ها پراکنده می‌شوند، تشکیل شده‌اند (۱۱). بیشتر عایق‌های حرارتی موجود را می‌توان در چهار گروه کلی شامل مواد معدنی، آلی، ترکیبی و پیشرفته طبقه‌بندی کرد. آن‌ها به اشکال مختلفی ازجمله متخلخل، پتویی یا خفاشی، صلب، شکل طبیعی و ساختار بازتابنده ایجاد می‌شوند (۱۲). مواد معدنی (پشم شیشه و پشم سنگ)، ۶۰ درصد بازار را به خود اختصاص داده‌اند، در حالی که مواد عایق آلی، ۲۷ درصد از بازار را تشکیل می‌دهند. مواد معمولی مانند پلی اورتان (PUR)، پلی ایزوسیانورات (PIR)، پلی استایرن اکسترودشده (XPS) و پلی استایرن منبسط‌شده (EPS) در بسیاری از ساختمان‌ها و کاربردهای ذخیره ی انرژی حرارتی به دلیل رسانایی حرارتی کم و هزینه ی کم، ترجیح داده می‌شوند (۹).

خواص برخی از پرمصرف‌ترین عایق‌ها، در ادامه آورده شده است.



شکل ۱: طبقه بندی نانومواد بر اساس ترکیب و ابعاد (۹)

عایق‌های سیلیکونی: لاستیک سیلیکونی، به دلیل پایداری حرارتی ویژه‌ای که دارد، در عایق‌ها استفاده می‌شود. همچنین این ماده، دارای آب‌گریزی عالی، استحکام مکانیکی بالا، نیازهای تعمیر و نگهداری پایین، استحکام دی‌الکتریک قوی و همچنین هزینه ی اقتصادی به‌صرفه است؛ اما از آنجایی که قابلیت تحمل تمامی تنش‌های وارده‌شده را ندارد، باعث فرسایش سطح و شکست می‌شود و در شرایط سخت آب‌وهوایی نیز به دلیل ماهیت آلی تغییر می‌کند. با توجه به ویژگی‌های ذکرشده، این نوع عایق، در بین مطالعات ورودی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعات، تلاش شده با افزودن ترکیبات نانو به عایق‌های با پایه ی سیلیکونی، این خواص را بهبود بخشند (۱۵).

عایق‌های کامپوزیتی پلیمری: در میان مواد عایق رایج، فوم‌های پلیمری که در حال حاضر در رتبه ی دوم کاربردهای گسترده قرار دارند، دارای خواص برتر بسیاری ازجمله عایق‌بندی بهتر، حمل و نصب آسان‌تر، هزینه ی کمتر و عدم جذب آب هستند. فناوری‌های عمومی برای ساخت فوم‌های پلیمری، شامل فوم‌سازی دسته‌ای، فوم کردن مهره‌ای، اکستروژن فوم و قالب‌گیری تزریقی فوم است. فوم‌های پلی‌پروپیلن، یکی از انواع خاص پلیمرها هستند که استحکام در برابر ضربه و دوام قابل توجهی دارند؛ اما عموماً به‌طور خاص به دلیل ساختار خطی مولکول‌ها ضعیف عمل می‌کنند (۱۰). همچنین یکی دیگر از انواع پلیمرها، پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF) است که ترکیبی از خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی همراه با مقاومت شیمیایی مطلوبی را دارد (۱۹). با توجه به جذابیت این نوع از عایق‌های حرارتی، در بین مطالعات ورودی، سه مطالعه، عایق‌های کامپوزیتی پلی آمید، پلی‌پروپیلن و همچنین کامپوزیت‌لاستیک سیلیکونی، اپوکسی و EPDM را مورد بررسی قرار داده بودند (۱۴، ۲۰، ۳۲).

عایق‌های پورسیلن: پورسیلن، نوعی چینی است که خواص الکتریکی، فیزیکی و حرارتی بسیار خوبی دارد. این خصوصیات، تحت تأثیر مقدار فاز شیشه‌ای تشکیل‌شده از عناصر فلدسپات و کوارتز بوده و از پایداری حرارتی بالایی برخوردار است و ویژگی‌های آن طول عمر عایق‌های با روکش چینی را در خطوط برق انتقال به‌ویژه در شرایط سخت محیطی تعیین می‌کند. در مطالعات ورودی، این نوع از عایق به‌تنهایی و در کنار لاستیک سیلیکونی RTV مورد توجه قرار گرفته است (۲۲).

عایق‌های آئروژلی: آئروژل‌ها، گروهی از عایق‌ها هستند که مطالعات زیادی روی آن‌ها صورت گرفته است. انتقال حرارت در مواد نانوعایق متخلخل آئروژل، به دلیل رسانایی حرارتی بسیار کم و کاربردهای گسترده از صرفه‌جویی در انرژی تا حفاظت و ایمنی توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۷). در حقیقت آئروژل‌ها، یکی از بهترین مواد عایق با خواص متمایز هستند که می‌توانند جایگزین عایق‌های ساختمانی مثل پشم شیشه و پلی اورتان باشند. تقویت آئروژل با مواد اتصال‌دهنده، می‌تواند خواص مکانیکی و حرارتی آن را بهبود بخشد تا بر شکنندگی آن غلبه کند (۳۰). در بین مطالعات ورودی، محققان در چهار مطالعه سعی کرده‌اند با تقویت آئروژل با نانومواد مختلف، این خواص را بهبود بخشند (۱۰، ۱۲، ۳۱، ۳۳).

عایق‌های بتنی :کاربرد فناوری نانو در معماری، گستره ی وسیعی از مصالح و تجهیزات را در بر می‌گیرد که هدف از آن، بهینه‌سازی مصالح در راستای کاهش اتلاف انرژی حرارتی و افزایش مقاومت و طول عمر مواد است. استفاده از بتن با ضریب هدایت حرارتی پایین و ظرفیت حرارتی بالا، انتخاب مناسبی در ساخت منازل، تأسیسات مسکونی و صنعتی است (۳۶). در یکی از مطالعات ورودی، از فناوری نانو در بتن و سیمان برای بهبود خواص آن‌ها استفاده شده است (۴۰).

مطالعات مختلفی در زمینه‌ی عایق‌های حرارتی و نانومواد انجام شده است. با وجود این، تاکنون مطالعه‌ای جامع درخصوص تأثیر انواع مواد نانو بر عملکرد عایق‌های حرارتی ارائه نشده است؛ بنابراین هدف این مطالعه، یکپارچه کردن یافته‌های مطالعات مختلف و بررسی تأثیرات استفاده از مواد نانو بر عملکرد عایق‌های حرارتی است. همچنین به تأثیر نانو ماده بر دیگر خواص عایق از جمله مقاومت کششی، سختی، نقطه ی شکست و هدایت حرارتی تشعشعی هم سعی شده که اشاره گردد؛ اما با توجه به هدف اصلی مطالعه و همین‌طور طولانی شدن بحث، لازم است که در مطالعات جداگانه‌ای به تأثیر مواد نانو بر هر یک از خواص عایق پرداخته شود.

روش کار

فرآیند کلی مطالعه ی حاضر، شامل جستجوی مقالات در پایگاه‌های معتبر داده ی داخلی و خارجی بوده است. پس از گزینش مقالات و کدبندی آن‌ها، اطلاعات لازم بر اساس سؤال اصلی این پژوهش (مواد نانو بر عملکرد عایق‌های حرارتی چه تأثیری دارند؟) استخراج گردیده و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

در ادامه، مراحل انجام این مطالعه شرح داده شده است.

جمع‌آوری داده‌ها

در این مقاله ی مروری، جستجوی مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی انگلیسی Scopus، PubMed، Web of Science، Science Direct و پایگاه‌های اطلاعات فارسی Magiran، Medex و SID انجام شد. موتور جستجوگر Google Scholar و رفرنس مقالات انتخاب‌شده نیز به‌منظور اطمینان از یافتن تمامی مقالات مرتبط مورد بررسی قرار گرفتند.

کلیدواژه‌های مورد استفاده جهت جستجو، شامل Nano Material, Nano Insulation, Thermal Insulation, Thermal Insulator, Thermal Stability, Thermal Conductivity به زبان انگلیسی و عایق، نانومواد و هدایت حرارتی به زبان فارسی بود. راهبرد جست‌وجو در هر یک از پایگاه‌های اطلاعاتی ذکرشده، در جدول ۱ ارائه شده است.

معیارهای ورود و خروج

مطالعات ورودی با توجه به معیارهای ورود زیر انتخاب گردیدند:

- مقالات اصیل پژوهشی، مقالات تجربی و آزمایشگاهی که عملکرد عایق‌های حرارتی نانو را مورد بررسی قرار داده باشند؛
- مقالات فارسی و انگلیسی‌زبان.

معیارهای خروج از مطالعه نیز شامل موارد زیر بود:

- مقالاتی با موضوع غیرمرتبط؛
- مقالاتی که متن کامل آن‌ها در دسترس نبود؛

جدول ۱: راهبرد جست و جو

ردیف	بخش ها	کلیدواژه ها
۱	عایق حرارتی	"Thermal insulation" OR " Thermal insulator "
۲	نانومواد یا نانوعایق	"Nano material" OR " Nanomaterial" OR " Nano insulation " OR "Nano-insulation" OR " Nano insulator " OR " Nano-insulator"
۳	هدایت یا مقاومت	"Thermal stability" OR " Thermal Conductivity "
۴	زبان	انگلیسی و فارسی
۵	تاریخ جست جو	۲۰ مارس ۲۰۲۲
۶	استراتژی جست و جو	ترکیب ردیف های ۱ تا ۵

● مقالات غیرپژوهشی شامل مقالات مروری، کتب، سرمقالات، یادداشت‌های نویسندگان و نامه به سردبیر.

گزینش مقالات

مطالعات یافت‌شده بر اساس جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعاتی، وارد نرم‌افزار اندنوت نسخه ی ۸/۱ شدند. در گام اول، عنوان و چکیده ی مقالات بر اساس معیارهای در نظر گرفته‌شده[1] بررسی شدند. در گام بعدی، متن کامل مطالعات برگزیده‌شده مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور افزایش دقت کار، دو نفر از نویسندگان به‌طور مجزا این کار را انجام دادند. فرایند استخراج مقالات، در شکل ۲ قابل مشاهده است.

استخراج اطلاعات

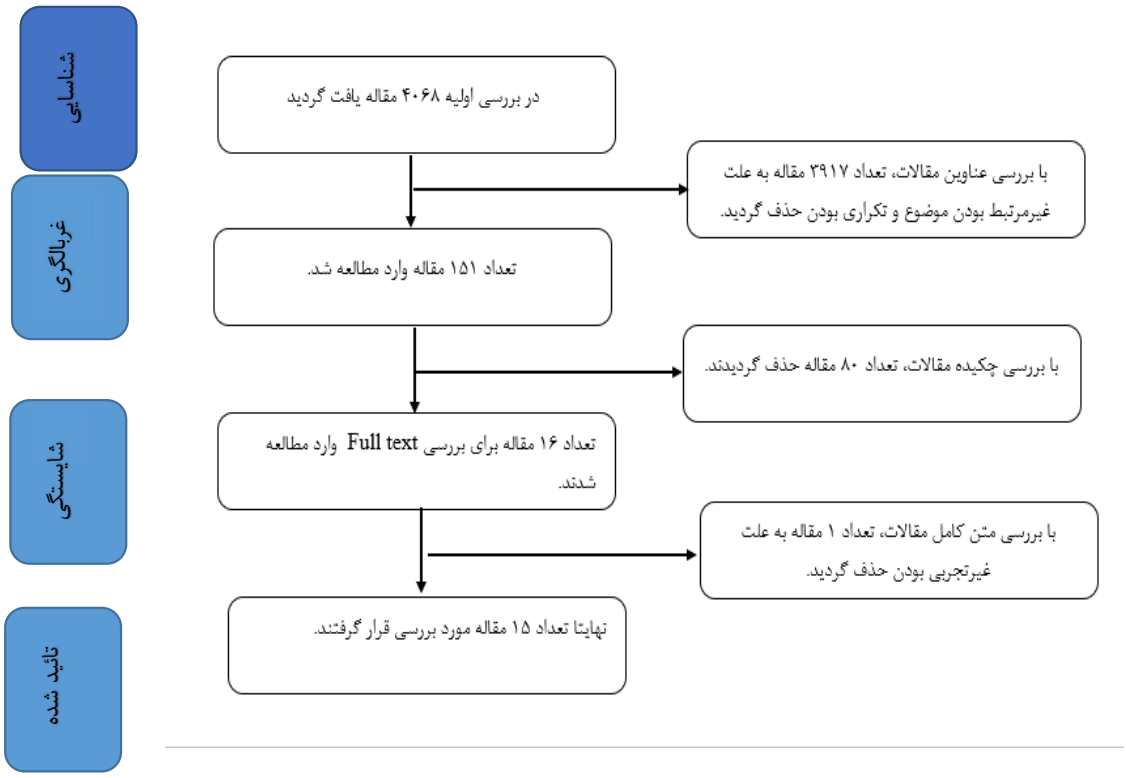
مقالات ورودی، به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته و اطلاعات لازم از آن‌ها استخراج گردید. این اطلاعات، عبارت بودند از: نام نویسنده ی اول، سال انجام مطالعه، نوع عایق، نوع و جنس نانومواد، تأثیر نانومواد بر خواص و عملکرد عایق حرارتی ازجمله مقاومت کششی، سختی، کرنش نقطه ی شکست، هدایت حرارتی و هدایت حرارتی تشعشعی.

یافته ها

در این مطالعه که صرفاً به بررسی مقالات مرتبط به نانوعایق‌های حرارتی پرداخته شده، بر اساس جستجو در پایگاه‌های اطلاعات، در صورتی که مقاله معیارهای ورود به مطالعه را داشت، انتخاب و اطلاعات لازم استخراج گردید. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، در جست‌وجوی اولیه، تعداد ۴۰۶۸ مقاله یافت شد. با مطالعه ی عنوان مقالات، تعداد ۳۹۱۷ مقاله به دلیل غیرمرتبط بودن با موضوع، حذف گردید. با بررسی چکیده ی مقالات، ۸۰ مقاله به علت تکراری بودن و غیرپژوهشی بودن، حذف شدند. متن کامل ۱۶ مقاله دانلود و بر اساس معیارهای ورود مورد بررسی قرار گرفتند که از این تعداد، یک مقاله به دلیل غیرتجربی بودن حذف گردید (۹) و درنهایت ۱۵ مقاله، مورد بررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. اطلاعات اصلی مطالعات ورودی که بیانگر تأثیرات نانومواد بر عملکرد عایق‌های حرارتی بوده، در جدول ۱ نشان داده شده است.

مطالعات به‌دست‌آمده، بین سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۰ منتشر شده بودند. در این بین، عایق‌های با پایه لاستیک سیلیکونی، ایروژل، پلی استایرن، پلی وینیلدین فلوراید، پورسیلن، بتن و یا کامپوزیتی از ترکیبات مختلف مورد بررسی قرار گرفته بودند. نانوذرات، نانولوله‌ها و نانوالیاف، ازجمله ی ساختارهای نانویی بودند که تأثیرشان بر عملکرد عایق‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته بود. جنس این نانومواد، از نیتریدبور، سیلیکات کلسیم، دی‌اکسید سیلیس، زئولیت، پلی تترا فلوئورو اتیلن، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، سلولز، آلومینا، تری هیدرات آلومینا، اکسید روی و آرامید بود.

1. Eligibility criteria



شکل ۲: فلوچارت فرآیند مرور سیستماتیک

بحث

این مطالعه، اولین مرور سیستماتیک در کشور است که با هدف مرور مطالعات انجام‌گرفته در زمینه‌ی بررسی تأثیر نانومواد بر عملکرد عایق‌های حرارتی انجام گرفته است؛ و نشان‌دهنده ی افزایش توجه به موضوع ارتقای خواص عایق‌های حرارتی با استفاده از نانومواد است. با توجه به استفاده ی گسترده از عایق‌ها در صنایع و منازل برای جلوگیری از هدر رفت انرژی و همچنین جلوگیری از مواجهات شغلی با گرما، این مطالعه ی مروری با هدف بررسی تأثیر نانومواد بر عملکرد عایق‌های حرارتی در ایران انجام گرفته است.

انواع نانوماده و ویژگی‌های آن

توسعه ی سریع فناوری نانو، منجر به سنتز نانومواد متعددی با خواص و عملکردهای متفاوت شده است. نانومواد سنتزشده، بسته به ترکیب آن‌ها، می‌توانند به نانومواد مبتنی بر کربن، نانومواد فلزی، نانومواد نیمه‌هادی، نانومواد اکسید فلزی، نانومواد پلیمری، نانومواد مبتنی بر لیپید و موارد دیگر تقسیم شوند. نانو مواد بر اساس ابعادشان، به نانوذرات، نانولوله، نانوفیلم و نانوکامپوزیت تقسیم‌بندی می‌شوند. در بین نانومواد مورد بررسی در مطالعات ورودی، نانوذرات مبتنی بر نانوفلزات، بیش از سایر موارد مورد توجه قرار گرفته‌اند (۹).

نانومواد مبتنی بر اکسیدهای فلزی (نانو ساختار و نانو پراکنده)، دسته ی متنوعی از مواد از نظر ساختار الکترونیکی و خواص فیزیکی، شیمیایی و الکترومغناطیسی هستند (۱۴). استفاده از نانومواد اکسید فلزی و نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر آن‌ها، به‌طور فزاینده‌ای

جدول ۲: خلاصه اطلاعات مربوط به مطالعه های مورد بررسی

نویسنده اول (سال)	نوع پایه عایق	نوع نانومواد	جنس نانومواد	تاثیر نانو مواد بر خواص و عملکرد عایق حرارتی				
				مقاومت کششی	سختی	کرنش نقطه شکست	هدایت حرارتی	هدایت حرارتی تشعشعی
Sebnem Kemaloglu (2010)	لاستیک سیلیکونی	نانو لوله	نیتریدبور	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش	-
Gaosheng Wei (2011)	ایروژل	نانوذره	سیلیکات کلسیم	-	-	-	کاهش	-
Tao Gao (2013)	پلی استایرن	نانوذره	دی اکسید سیلیس	-	-	-	کاهش	-
Wei Yan (2014)	کامپوزیت پلی آمید	نانو لوله	نیتریدبور	-	-	-	افزایش	کاهش
Dounia Bendahou (2015)	کامپوزیت پلی پروپیلن	نانولیف	زئولیت	-	-	-	کاهش	-
Jinchuan Zhao (2017)	ایروژل	نانولیف	پلی تترا فلوئورو اتیلن	-	-	-	کاهش	-
Khan (2017)	کامپوزیت‌لاستیک سیلیکونی، اپوکسی و EPDM	نانوذره	دی اکسید سیلیس	افزایش	افزایش	کاهش	کاهش	-
Yang (2018)	پلی وینیلدین فلوراید	نانوذره	نانوذرات دی اکسید تیتانیوم	-	-	-	کاهش	کاهش
Chao Xu (2019)	ایروژل	نانولیف	سلولز	-	-	-	کاهش	-
Rahmat Ullah (2020)	لاستیک سیلیکونی HTV	نانوذره	سیلیس و تری هیدرات آلومینا	-	-	-	کاهش	-
Faizan Tahir Butt (2020)	لاستیک سیلیکونی	نانوذره	آلومینا	-	-	-	افزایش	-
Taghvaei (2020)	پورسیلن پوشش داده شده با لاستیک سیلیکونی RTV	نانوذره	دی اکسید سیلیس و اکسید روی	-	-	-	کاهش	-
El-Gamal (2021)	پورسیلن	نانوذره	آلومینا	-	-	-	کاهش	-
Saleh (2021)	بتن	نانوذره	دی اکسید سیلیس	-	-	-	کاهش	-
Yinghe Hu (2022)	ایروژل	نانولیف	آرامید	-	-	-	کاهش	-

در بحث عایق‌های حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. این ترکیبات، دارای سطح ویژه ی بزرگ، هدایت حرارتی کم و مقاوم در برابر گرما هستند. در بین این گروه از نانومواد، ترکیبات SiO_2 دارای خواص فیزیکی و شیمیایی برجسته‌ای بوده و برای تقویت عایق‌های بر پایه ی پلی استایرن، کامپوزیت‌لاستیک سیلیکونی، اپوکسی و EPDM، پورسیلن پوشش داده‌شده با لاستیک سیلیکونی RTV و بتن مورد استفاده قرار گرفته است. این نانو ساختار، به دلیل داشتن خاصیت هدایت حرارتی پایین، توانسته با موفقیت هدایت حرارتی عایق‌ها را کاهش دهد. از دیگر دلایل کاهش هدایت حرارتی توسط نانوذرات SiO_2 می‌توان به تشکیل یک فضای هوایی کوچک بین ساختار پایه ی عایق اشاره کرد که مانع انتقال حرارت می‌شود. نکته ی قابل توجه دیگر، مقرون‌به‌صرفه بودن نانوذرات SiO_2 نسبت به سایر نانو مواد است (۱۵).

علاوه بر این، نانوذرات TiO_2 نوع دیگری از نانوذرات اکسید فلزی است که به دلیل خواص پراکندگی نور مؤثر آن، در توسعه ی پوشش‌های بازتابنده مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۶). در مطالعه ی Yang و همکاران نیز این ترکیب به‌عنوان یک بازتاب‌دهنده ی نور به پلی وینیلدین فلوراید اضافه گردیده است. اضافه کردن نانوذرات TiO_2 به این عایق، منجر به کاهش هدایت حرارتی و هدایت حرارتی تشعشعی شده است (۲۷).

اکسید روی (ZNO)، یک ترکیب غیرآلی است که به‌طور گسترده در عایق‌ها استفاده می‌شود (۱۷). پیشرفت در فناوری نانو، منجر به توسعه ی ZNO شده است که در مقیاس نانو، خواص و کاربردهای بالقوه ی متفاوتی را در بسیاری از زمینه‌ها نشان داده است (۱). ZNO، یک ماده غیرسمی و با محیط زیست سازگار و از نظر فیزیکی و شیمیایی پایدار است (۱۸). این ترکیب، با وجود داشتن هدایت حرارتی بالا، توانسته است در کنار نانوذرات SiO_2، هدایت حرارتی عایق‌ها را کاهش دهد؛ چراکه علاوه بر هدایت حرارتی، ظرفیت جذب بالایی در برابر گرما داشته و درنتیجه، تأثیر گرما بر پایه ی اصلی عایق را به تأخیر می‌اندازد. علاوه بر این، با ایجاد ساختار آمورف در پایه عایق، هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد (۱۹).

در میان نانوذرات سرامیکی متعدد، نانوآلومینای کم‌هزینه به دلیل خواص مکانیکی عالی، پایداری حرارتی بالا، خواص عایق الکتریکی فوق‌العاده، مساحت سطح بالا و کم‌هزینه بودن، به‌عنوان یک تقویت‌کننده در عایق‌های حرارتی شناخته شده است. این ماده، دارای هدایت حرارتی کمی بوده (~30 W/m-K) (۲۰) و با توجه به این هدایت حرارتی ذاتی کم، در مطالعه ی Gamal و همکاران و مطالعه ی Rahmat Ullah و همکاران، منجر به کاهش هدایت حرارتی عایق شده است (۲۳، ۳۰)؛ اما در مطالعه‌ای دیگر، میزان هدایت حرارتی عایق لاستیک سیلیکونی با اضافه کردن نانو ذرات آلومینا، افزایش پیدا کرده است. اعتقاد بر این است که ذرات نانو آلومینا، ضمن افزایش سطح، منجر به کاهش فاصله ی بین‌مولکولی شده و با ایجاد شبکه‌هایی، مسیرهای جریان گرمای بیشتری را در نانو کامپوزیت‌ها فراهم می‌کنند؛ از این‌رو، هدایت حرارتی عایق افزایش پیدا می‌کند (۲۱).

نانومواد‌ی از جنس سیلیکات کلسیم، دارای مقاومت مکانیکی بالا، مقاوم در برابر شوک حرارتی و مقاوم در برابر خوردگی هستند؛ به همین دلیل، در عایق‌های آئروژلی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳۱). نیریدبور، در گروه نانولوله‌های کربنی قرار می‌گیرد که Sebnem Kemaloglu در مطالعه‌ی خود به خواص آن ازجمله پایداری حرارتی و شیمیایی، اشاره کرده است (۲۱).

در میان نانوالیاف، آرامیدها با توجه به رسانایی حرارتی کم، وزن سبک و خواص مکانیکی قوی، مورد توجه قرار گرفته‌اند (۳۳). همچنین نانوالیاف زئولیتی، پایداری بسیار خوبی در برابر گرما دارند و یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی است (۳۲). پلی تترافلوئورواتیلن نیز که سردسته ی خانواده ی پلی فلوروکربن‌ها بوده، نانوالیافی بلوری، محکم، غیرقابل اشتعال و تقریباً دارای مقاومت بالایی در برابر تمام مواد شیمیایی است (۱۰، ۱۹). نانوالیاف سلولزی (CNFs)، اخیراً به‌عنوان بلوک‌های ساختمانی برای ساخت کامپوزیت‌های نانوالیافی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که

خواص امیدوارکننده‌ای را برای کاربردهای مختلف نشان داده‌اند. CNFها، حاوی گروه‌های عاملی آلی در سطح هستند. بسترهای ایده‌آل برای اصلاح یا هیبریداسیون از طریق نانومهندسی سطح، فرصت‌هایی را برای غلبه بر مشکلات دیرینه ی حساسیت به رطوبت، اشتعال‌پذیری و خواص مکانیکی ضعیف مرتبط با مواد مبتنی بر CNF ارائه می‌دهد (۳۴).

تأثیر نانومواد بر خواص عایق‌های حرارتی

علاوه بر هدایت حرارتی، دیگر خواص حرارتی، خواص مکانیکی و خواص الکتریکی، ازجمله ی ویژگی‌هایی است که در حین انتخاب عایق‌های حرارتی مورد توجه قرار می‌گیرد و در مطالعات ورودی مورد بررسی قرار گرفته است؛ به‌طوری که در مطالعه‌ی KHAN و همکاران در سال ۲۰۱۷، خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی کامپوزیت‌های لاستیک سیلیکونی، اپوکسی و EPDM (اتیلن پلی‌پروپیلن دیین مونومر) ترکیب‌شده با ذرات SiO_2 در ابعاد میکرو و نانو مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت؛ نتایج این مطالعه، نشان‌دهنده‌ی اثربخشی بیشتر ذرات نانو نسبت به ذرات میکرو در بهبود خواص مواد عایق از جمله استحکام کششی، سختی، استحکام دی‌الکتریک و پایداری حرارتی است. دمای کاهش جرم ۱۰ درصدی EPDM، ۲۹۰ درجه ی سانتی‌گراد است، در حالی که با افزودن میکروسیلیس و نانو سیلیس، این دما بین ۱ تا ۲/۵ درصد افزایش یافت. در تمام نمونه‌های EPDM، اپوکسی و لاستیک سیلیکونی، نمونه‌های نانو پایدارتر بودند؛ به‌عنوان مثال، ادغام ذرات نانو SiO_2 در ماتریس لاستیک سیلیکونی، باعث افزایش قابل توجهی در دمای تخریب، وزن‌های باقیمانده ی بالاتر و پایداری حرارتی شد (۲۲).

مطالعه‌ی دیگری توسط Rahmat Ullah و همکاران در سال ۲۰۲۰، انجام شد و خواص الکتریکی، حرارتی (مکانیسم TGA) و مکانیکی لاستیک سیلیکونی با نانوذرات سیلیس و تری هیدرات آلومینا مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، اشاره شده است که برای افزایش ردیابی و مقاومت در برابر فرسایش، از تری هیدرات آلومینا استفاده می‌شود. نتایج، نشان داد که وقتی این عایق‌های بارگذاری‌شده با نانوذرات در مناطق گرمسیری در معرض تنش‌های متعدد قرار می‌گیرند، تخریب آن‌ها به تأخیر می‌افتد و درنتیجه، طول عمر آن‌ها افزایش می‌یابد(۲۳). مطالعه‌ی Butt و همکاران نیز در همان سال، نشان داد که ردیابی و مقاومت به فرسایش عایق سیلیکونی، با افزودن نانو آلومینا به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. این می‌تواند به دلایل مختلف مانند پایداری حرارتی بهتر و کاهش فواصل بین ذرات باشد. مطالعات فیزیکی، نشان می‌دهد که جرم فرسایش یافته و طول ردیابی به‌صورت خطی با افزایش محتویات نانو آلومینا کاهش می‌یابد (۲۴).

در مطالعه‌ای که توسط Sebnem Kemaloglu و همکاران در سال ۲۰۱۰ انجام گردید، ۳ سایز میکرونی و دو سایز نانو از ذرات نیتریدبور به کامپوزیت‌های لاستیک سیلیکونی اضافه گردید. نتایج مطالعه، نشان داد که اضافه کردن ذرات نیتریدبور به ماتریس سیلیکونی، منجر به کاهش استحکام کششی و خمش هنگام شکست، ضریب انبساط حرارتی و همچنین افزایش مدول، سختی و هدایت حرارتی می‌شود و زمانی که نیاز به افزایش ثابت دی‌الکتریک کامپوزیت باشد، می‌توان از ذرات نیتریدبور استفاده کرد که اگر سایز آن در حد نانو باشد، تأثیر بارزتری بر خواص کامپوزیت دارد (۲۵).

در مطالعه ی Zhao و همکاران در سال ۲۰۱۷، برای بهبود خواص کامپوزیت پلی‌پروپیلن، از نانو الیاف پلی ترا فلوئورواتیلن استفاده شد که به‌طور چشمگیری باعث بهبود خاصیت عایق حرارتی و استحکام آن شد (۲۶). در پژوهش Yang و همکاران در سال ۲۰۱۸، به‌منظور بهبود عایق حرارتی PVDF، سطح الیاف PVDF با یک لایه ی متخلخل از نانو TiO_2 مونتاژ و مدل‌سازی خواص فیبرهای ترکیبی TiO_2/PVDF انجام شد (۲۷).

در مطالعه‌ای دیگر که توسط Wei Yan و همکاران انجام گردید، نانوکامپوزیت‌های پلی آمید با نانولوله‌های کربنی چند جداره توسط نیترید بور پوشش داده شدند که نتایج آن نشان داد افزایش نیتریدبور، منجر به افزایش

هدایت حرارتی می‌شود؛ ولیکن به‌عنوان یک عایق الکتریکی عمل می‌کند. در واقع ترکیب این ۳ ماده با هم، منجر به تشکیل کامپوزیتی با هدایت حرارتی خوب و مقاومت الکتریکی نسبتاً بالایی می‌گردد (۲۸).

Tao Gao و همکاران در سال ۲۰۱۳، پلیمر کره‌های توخالی پلی استایرن دارای قطر منافذ داخلی ۱۵۰ نانومتر و ضخامت پوسته ی ۱۰-۱۵ نانومتر را سنتز و آن‌ها را با نانوذرات SiO_2 پوشش دادند و بیان کردند ویژگی‌های کلی این نانو کره‌های توخالی، به پارامترهای مختلفی مانند قطر و ضخامت پوسته ی کره‌ها، ترکیب شیمیایی مواد پوسته، نوع گاز پرشده، نحوه ی بسته‌بندی و چگالی این کره‌ها بستگی دارد و از طریق اصلاح این پارامترهای ساختاری، می‌توان عملکرد حرارتی نانوکره‌های توخالی را در یک محدوده ی بزرگ کنترل نمود (۲۹).

با توجه به نتایج مطالعه ی انجام‌شده توسط El-Gamal و همکاران در سال ۲۰۲۱، افزودن نانوآلومینا به عایق‌های چینی (پورسیلن)، باعث افزایش چگالی، کاهش جذب آب، کاهش منافذ و تشکیل ماتریس متراکم شده و خواص عایق را بهبود می‌بخشد (۳۰). درواقع، مواد مبتنی بر اکسید آلومینیوم به دلیل سختی، عدم فعالیت شیمیایی، نقطه ی ذوب بالا، عدم فراریت و مقاومت در برابر خوردگی و سایش، دارای مزایای قابل توجهی هستند. افزودن نانوآلومینا به مواد پورسیلن، خواص الکتریکی، مکانیکی و نوری آن‌ها را افزایش می‌دهد(۳۱-۳۳). خواص این ذرات، به قطر، مورفولوژی و همگنی آن‌ها بستگی دارد (۳۴).

در مطالعه‌ای که توسط Monireh Taghvaei و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام گردید، نشان داده شد که در عایق‌های چینی (پورسیلن)، استفاده ی همزمان از نانومواد ZNO و SiO_2، خواص عایق را در مقایسه با استفاده ی جداگانه از آن‌ها بهبود می‌بخشد و پایداری حرارتی عایق را بالا می‌برد. این بهبود در پایداری حرارتی نانو کامپوزیت‌ها تأثیر قابل توجهی نیز در طول عمر عایق دارد. با افزودن نانوذرات، دمای کاهش جرم ۱۰ درصدی عایق پایه و همچنین میزان انرژی اکتیواسیون افزایش یافت که نشان‌دهنده ی طول عمر عایق پایه و افزایش پایداری حرارتی است (۳۵, ۳۶). ماده ی نانو ZNO، یکی از کاندیداهای مناسب برای استفاده در پلیمرها است؛ زیرا خواص فیزیکی و شیمیایی ویژه ازجمله پایداری شیمیایی، ثابت دی‌الکتریک پایین، گذر نوری بالا و فعالیت کاتالیزوری بالا دارد (۳۷).

طبق مطالعه ی G.H.Tang و همکاران در سال ۲۰۱۵، هدایت حرارتی بسیار کم مواد عایق نانو متخلخل آئروژل را می‌توان به نانوساختارهای پیچیده ذاتی آن نسبت داد. نانو ذرات مواد نانو متخلخل، به‌طور تصادفی کنار هم جمع می‌شوند و ستون فقرات کاتوله‌ای را تشکیل می‌دهند که به یکدیگر متصل می‌شوند و یک ساختار شبکه ی سه‌بعدی پیچیده ایجاد می‌کنند. چنین ساختاری، تعداد زیادی نانو منافذ را تولید می‌کند؛ به‌طوری که میانگین مسیر آزاد مولکول‌های گاز پرشده در ماده، به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و انتقال حرارت بین مولکول‌های گاز به‌طور جدی تضعیف می‌شود. علاوه بر این، هنگامی که گرما از طریق فاز جامد منتقل می‌شود، ساختار اسکلت پیچیده ی فاز جامد از مواد عایق نانو متخلخل می‌تواند طول مسیر شار حرارتی را افزایش دهد که باعث افزایش مقاومت حرارتی شده و هدایت حرارتی بسیار کم را تضمین می‌کند. فاکتورهای مؤثر در هدایت حرارتی مواد آئروژل، شامل اندازه ی ذرات، توزیع اندازه ی منافذ، افزودن مواد تقویت‌کننده در سایزهای مختلف، جذب آب یا رطوبت، گرمای ویژه و چگالی مواد به‌کار رفته است (۷). در مطالعه ی Gaosheng Wei و همکاران در سال ۲۰۱۱، هدایت حرارتی عایق آئروژل با افزودن نانو کره‌های سیلیکات کلسیم از نوع Xonotlite، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج، نشان داد افزودن نانوذرات باعث افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش هدایت حرارتی می‌شود که برای این منظور، عوامل مختلفی تأثیرگذار هستند که شامل ساختار و سایز نانوذره متخلخل، چگالی ماده ی اضافه‌شده به آئروژل و افت فشار است (۳۸).

در مطالعه ی Dounia Bendahou و همکاران در سال ۲۰۱۵، خواص عایق حرارتی آئروژل کامپوزیت

هیبریدی مبتنی بر سلولز- زئولیت مورد مطالعه قرار گرفت که مشخص شد افزودن نانوزئولیت‌ها نسبت به میکروفیبریل‌های سلولزی، هدایت حرارتی آئروژل‌های هیبریدی را به‌طور قابل توجهی کم می‌کند؛ علاوه بر این، افزودن این نانوفیبریل‌ها به آئروژل، باعث افزایش قابل توجهی در سفتی آن می‌شود و ارتقای بیشتر سفتی، زمانی حاصل می‌گردد که نانوفیبریل‌هایی با بار سطحی بالا اضافه گردند (۱۳). در مطالعه ی Yinghe Hu و همکاران در سال ۲۰۲۲، آئروژل مبتنی بر نانوالیاف آرامید (ANF) ساخته شد که یک عایق حرارتی با عملکرد عالی در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه ی سانتی‌گراد به دست آمد. نانوالیاف آرامید، نوعی نانوالیاف پلیمری استخراج‌شده از پلی فنیلن ترافتالات (PPTA)، یکی از قوی‌ترین الیاف پلیمری هستند که نام تجاری آن‌ها Kevlar است، این الیاف، خواص مکانیکی عالی، مقاومت حرارتی خوب و پایداری شیمیایی و حرارتی چشمگیر دارند (۳۹).

در پژوهشی دیگر که توسط Chao Xu و همکارانش در سال ۲۰۱۹ صورت گرفت، آئروژل هیبریدی مبتنی بر نانوالیاف سلولزی و یک چارچوب فلزی آلی (MOF[2]) مبتنی بر آلومینیوم ساخته شد که به دلیل نانوساختار ویژه (اندازه و غلظت ماده نانو) و پیوندهای متقابل MOF در آزمایش‌های عایق حرارتی (TGA,FLIR)، هدایت نسبتاً پایین (تقریباً ۴۰ میلی‌وات بر متر بر کلوین) را نشان داد. همچنین مقاومت در برابر رطوبت و حریق و استحکام مکانیکی ویژه ی بالایی (۸۰٪) را نشان داد. این مطالعه، فرصت‌های خوبی را برای توسعه ی نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر MOF برای کاربردهای عایق حرارتی و ضدحریق ایجاد می‌کند؛ و آئروژل‌های جدید مبتنی بر MOF و سلولزهای پایدار، ممکن است در ساختمان‌های با انرژی کارآمد و مواد ساختاری، بسته‌بندی و ذخیره‌سازی مواد غذایی و داروها کاربرد داشته باشند (۴۰). درواقع، در آئروژل‌های الاستیک، چارچوب‌های فلزی آلی (MOF) در اطراف نانوالیاف سلولزی، می‌توانند به‌عنوان عایق حرارتی پایدار استفاده شوند. MOFها، به دلیل ریزتخلخل‌های غنی و ساختارهای ترکیبی و همچنین مقاومت در برابر آتش و وزن کم و انعطاف‌پذیری مکانیکی خوبی که دارند، به استفاده از آن‌ها در ذخیره‌سازی انرژی توجه زیادی شده است؛ اما به دلیل مشکل در شکل‌دهی و پردازش کریستال‌های شکننده و نامحلول خود، به‌ندرت به‌طور خالص مورد استفاده قرار می‌گیرند(۴۱). همان‌طور که بیان شد، در مطالعه ی Chao Xu، از نانو الیاف سلولزی استفاده کرده بودند. استفاده از این نانوالیاف در ارتقای ویژگی‌های عایق‌ها، مزیت‌های فروانی دارد: ۱- به‌طور طبیعی فراوان یافت می‌شوند و کم‌هزینه هستند، ۲- هدایت حرارتی ذاتاً پایینی دارند، ۳- حاوی گروه‌های عاملی آلی در سطح هستند و ۴- در نواحی سطحی بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند و پتانسیل آن را دارند که انتقال گرما را مختل کنند (۵, ۴۲).

مطالعه‌ای توسط Saleh و همکاران، در سال ۲۰۲۱ انجام شد و در آن اثر نانوذرات سیلیس SiO_2 بر خواص حرارتی و مکانیکی بتن، مانند هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه و مقاومت فشاری بررسی گردید. نتایج، نشان‌دهنده ی ارتقای ویژگی‌های عایق بتن و کاهش در هدایت حرارتی با افزایش نسبت نانوذرات SiO_2 بود (۱۵).

بدین ترتیب، مرور مطالعات ورودی، نشان داد که استفاده از نانو مواد به عایق‌های حرارتی علاوه بر تأثیری که بر هدایت حرارتی آن‌ها دارد، می‌تواند باعث بهبود در سایر خصوصیات عایق‌های حرارتی ازجمله مقاومت کششی، سختی، نقطه ی شکست و هدایت حرارتی تشعشعی شود. مهم‌ترین ضعف در اکثر نانو مواد، حساسیت آن‌ها به رطوبت بود. همچنین عایق‌های کامپوزیتی، برای کاهش مصرف انرژی و کاربردهای زیست‌محیطی بیشتر مورد استفاده قرار گرفته بودند.

محدودیت‌ها

این مطالعه، با محدودیت‌هایی همراه بود که لازم است هنگام تفسیر نتایج، مورد توجه قرار گیرد؛ ازجمله می‌توان به عدم دسترسی به برخی مقالات به دلیل پرداخت هزینه، نبود متن کامل مقالات و مطالعه ی مقالات فقط به زبان

1. Metal–organic frameworks

فارسی و انگلیسی اشاره نمود. همچنین در همه ی مقالات، به تأثیر نانومواد بر همه ی عملکردهای عایق حرارتی (مقاومت کششی، سختی، کرنش نقطه ی شکست، هدایت حرارتی، هدایت حرارتی تشعشعی) اشاره نشده بود که لازم است در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار گیرند.

نتیجه گیری

این مطالعه، به بررسی پژوهش‌های صورت‌گرفته در ارتباط با نانوعایق‌ها پرداخت و نشان داد که استفاده از فناوری نانو و یا اضافه کردن مواد مختلف با سایز نانو، منجر به بهبود خواص ماده ی عایق می‌شود که مهم‌ترین آن، افزایش مقاومت حرارتی است. علاوه بر این، نوع نانوماده ی مورد استفاده، منجر به ارتقای برخی خواص دیگر عایق مانند استحکام مکانیکی، استحکام دی‌الکتریک، استحکام کششی، کشسانی، سختی و... می‌گردد. همچنین مشخص گردید علاوه بر ترکیب نانوماده مورد استفاده، فاکتورهایی دیگری نیز بر اثرگذاری آن دخالت دارند که می‌توان به‌اندازه ی ذرات یا اندازه ی منافذ، چگالی مواد مورد استفاده، سطح بارگذاری و غلظت مواد کاربردی اشاره نمود. با توجه به اینکه بررسی خواص نانو عایق‌ها در مطالعات مختلف با اهداف متفاوتی صورت گرفته است، پیشنهاد می‌گردد در زمینه‌ی تأثیر مواد نانو در کاهش هدایت حرارتی و استفاده از عایق‌های نانو به‌عنوان عایق‌های گرمایی برای استفاده در محیط‌های شغلی، تحقیقات بیشتری انجام شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان، از تمام کسانی که از تکمیل این پروژه حمایت کردند، نهایت تقدیر و تشکر را دارند.

تعارض منافع

بین نویسندگان، هیچ‌گونه تعارضی در منافع وجود ندارد.

منابع مالی

ندارد.

REFERENCES

1. Esfe MH, Afrand M, Rostamian SH, Toghraie D. Examination of rheological behavior of MWCNTs/ZnO-SAE40 hybrid nano-lubricants under various temperatures and solid volume fractions. Exp Therm Fluid Sci. 2017;80:384-90.
2. Ibrahiem DM. Evaluating cost of air pollution from using fossil fuels in some industries in Egypt. Advances in Management and Applied Economics. 2015;5(1):27-39.
3. Jelle BP. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions–Properties, requirements and possibilities. Energy Build. 2011;43(10):2549-63.
4. Ahmadi, H., Bagheripourasil, M., & Nabi Pouramleshi, S. A. (2013). Optimization of energy consumption and the application of provisions of section 19 of the national building regulations. In The First National Conference on Sustainable Building (pp. 1-10). Mashhad. Retrieved from https://civilica.com/doc/213570
5. Wicklein B, Kocjan A, Salazar-Alvarez G, Carosio F, Camino G, Antonietti M, et al. Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide. Nat Nanotechnol. 2015;10(3):277-83.
6. Sieben JM, Morallon E, Cazorla-Amorós D. Flexible ruthenium oxide-activated carbon cloth composites prepared by simple electrodeposition methods. Energy. 2013;58:519-26.
7. Tang G, Bi C, Zhao Y, Tao W. Thermal transport in nano-porous insulation of aerogel: factors, models and outlook. Energy. 2015;90:701-21.
8. Nazir MT, Phung BT. Accelerated ultraviolet weathering investigation on micro-/nano-SiO2 filled silicone rubber composites. High Voltage. 2018;3(4):295-302.
9. Villasmil W, Fischer LJ, Worlitschek J. A review and

evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. Renew Sustain Energy Rev. 2019;103:71-84.
10. ASHRAE Handbook Committee. ASHRAE fundamentals handbook. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers; 2001.
11. Peavy B. A heat transfer note on temperature dependent thermal conductivity. Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes. 1996;20(1):76-90.
12. Yüksel N. The review of some commonly used methods and techniques to measure the thermal conductivity of insulation materials. Energy Build. 2012;54:68-74.
13. Bendahou D, Bendahou A, Seantier B, Grohens Y, Kaddami H. Nano-fibrillated cellulose-zeolites based new hybrid composites aerogels with super thermal insulating properties. Ind Crops Prod. 2015;65:374-82.
14. Golbamaki N, Rasulev B, Cassano A, Robinson RLM, Benfenati E, Leszczynski J, et al. Genotoxicity of metal oxide nanomaterials: review of recent data and discussion of possible mechanisms. Nanoscale. 2015;7(6):2154-98.
15. Saleh AN, Attar AA, Ahmed OK, Mustafa SS. Improving the thermal insulation and mechanical properties of concrete using Nano-SiO2. Results Eng. 2021;12:100303.
16. Blanco M, Monteserín C, Uranga N, Gómez E, Aranzabe E, García JI. Thermal and photocatalytic performance of unsaturated polyester resins modified with TiO2 nanoparticles as panel bodies for vehicles. Polymers. 2021;13(13):2036.
17. Özgür Ü, HofstetterD, Morkoc H. ZnO devices and applications: a review of current status and future prospects. Proc IEEE Inst Electr Electron Eng. 2010;98(7):1255-68.
18. Souza V, Fernando A. Nanoparticles in food packaging: biodegradability and potential migration to food: a review. Food Packag Shelf Life. 2016;8:63-70.
19. Bakkardouch FE, Atmani H, El Khalloufi M, Jouaiti A, Laallam L. Modified cellulose-based hybrid materials: Effect of ZnO and CuO nanoparticles on the thermal insulation property. Mater Chem Phys. 2021;271:124881.
20. Osman A, Elhakeem A, Kaytbay S, Ahmed A. Thermal, electrical and mechanical properties of graphene/nano-alumina/epoxy composites. Mater Chem Phys. 2021;257:123809.
21. Butt FT, Nazir MT, Hussain H, Phung BT, Akram S, Bhutta M, et al. Physical, thermal and partial discharge evaluation of nano alumina filled silicone rubber in inclined plane test. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2020;6(4):815-22.
22. Khan H, Amin M, Ali M, Iqbal M, Yasin M. Effect of micro/nano-SiO2 on mechanical, thermal, and electrical properties of silicone rubber, epoxy, and EPDM composites for outdoor electrical insulations. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2017;25(2):1426-35.
23. Ullah R, Akbar M, Amin S. Measuring electrical, thermal and mechanical properties of DC-stressed HTV silicone rubber loaded with nano/micro-fillers exposed to long-term aging. Appl Nanosci. 2020;10(7):2101-11.
24. Butt FT, Nazir MT, Hussain H, Phung BT, Akram S, Bhutta MS, et al. Physical, thermal and partial discharge evaluation of nano alumina filled silicone rubber in inclined plane test. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2020;6(4):815-22.
25. Kemaloglu S, Ozkoc G, Aytac A. Properties of thermally conductive micro and nano size boron nitride reinforced silicon rubber composites. Thermochim Acta. 2010;499(1-2):40-7.
26. Zhao J, Zhao Q, Wang C, Guo B, Park CB, Wang G. High thermal insulation and compressive strength polypropylene foams fabricated by high-pressure foam injection molding and mold opening of nano-fibrillar composites. Mater Des. 2017;131:1-11.
27. Yang J, Wu H, Wang M, Liang Y. Prediction and optimization of radiative thermal properties of nano TiO2 assembled fibrous insulations. Int J Heat Mass Transfer. 2018;117:729-39.
28. Yan W, Zhang Y, Sun H, Liu S, Chi Z, Chen X, et al. Polyimide nanocomposites with boron nitride-coated multi-walled carbon nanotubes for enhanced thermal conductivity and electrical insulation. J Mater Chem A Mater. 2014;2(48):20958-65.
29. Gao T, Jelle BP, Sandberg LIC, Gustavsen A. Monodisperse hollow silica nanospheres for nano insulation materials: synthesis, characterization, and life cycle assessment. ACS Appl Mater Interfaces. 2013;5(3):761-7.
30. El-Gamal S, Abd-Allah M, Belal E, Eliyan T, Desouky

OA. Amelioration of The Dielectric Properties of Ceramic Insulators Using Nano-alumina. Matrix. 2021;18:21.
31. Gautam CR, Madheshiya A, Mazumder R. Preparation, crystallization, microstructure and dielectric properties of lead bismuth titanate borosilicate glass ceramics. Journal of Advanced Ceramics. 2014;3(3):194-206.
32. Krell A, Schädlich S. Nanoindentation hardness of submicrometer alumina ceramics. Materials Science and Engineering: A. 2001;307(1-2):172-81.
33. Einaga H, Futamura S. Comparative study on the catalytic activities of alumina-supported metal oxides for oxidation of benzene and cyclohexane with ozone. Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2004;81(1):121-8.
34. Sun P-L, Wu S-P, Chin T-S. Melting point depression of tin nanoparticles embedded in a stable alpha-alumina matrix fabricated by ball milling. Mater Lett. 2015;144:142-5.
35. Taghvaei M, Sedighizadeh M, NayebPashaee N, Fini AS. Thermal stability of nano RTV vs. RTV coatings in porcelain insulators. Thermal Science and Engineering Progress. 2020;20:100696.
36. Taghvaei M, Sedighizadeh M, NayebPashaee N, Fini AS. Reliability assessment of RTV and nano-RTV-coated insulators concerning contamination severity. Electric Power Systems Research. 2021;191:106892.
37. El-Naggar ME, Hassabo AG, Mohamed AL, Shaheen TI. Surface modification of SiO2 coated ZnO nanoparticles for multifunctional cotton fabrics. J Colloid Interface Sci. 2017;498:413-22.
38. Wei G, Liu Y, ZhangX, Yu F, Du X. Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials. Int J Heat Mass Transfer. 2011;54(11-12):2355-66.
39. Hu Y, Yang G, Zhou J, Li H, Shi L, Xu X, et al. Proton Donor-Regulated Mechanically Robust Aramid Nanofiber Aerogel Membranes for High-Temperature Thermal Insulation. ACS Nano. 2022;16(4):5984-93.
40. Zhou S, Apostolopoulou-Kalkavoura V, Tavares da Costa MV, Bergström L, Strømme M, Xu C. Elastic aerogels of cellulose nanofibers@ metal–organic frameworks for thermal insulation and fire retardancy. Nano-Micro Lett. 2020;12(1):1-13.
41. Sun L, Liao B, Sheberla D, Kraemer D, Zhou J, Stach EA, et al. A microporous and naturally nanostructured thermoelectric metal-organic framework with ultralow thermal conductivity. Joule. 2017;1(1):168-77.
42. Zhou S, Nyholm L, Strømme M, Wang Z. Cladophora cellulose: unique biopolymer nanofibrils for emerging energy, environmental, and life science applications. Acc Chem Res. 2019;52(8):2232-43.