



Estimating the Thermal Conductivity of Polymeric Foams Based on a Theoretical Model Using Cell Size and Foam Density

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hasanzadeh R.¹ PhD,
Azdast T.¹ PhD,
Doniavi A.*¹ PhD,
Darvishi M.M.² PhD

How to cite this article

Hasanzadeh R, Azdast T, Doniavi A, Darvishi M.M. Estimating the Thermal Conductivity of Polymeric Foams Based on a Theoretical Model Using Cell Size and Foam Density. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(9): 2273-2283.

ABSTRACT

Heat transfer of polymeric foams is consisting of three different mechanisms including heat transfer through a solid phase, gas phase, and thermal radiation. Thermal insulation properties of polymeric foams are affected by different structural properties. Also, these structural properties have a different influence on the different heat transfer's mechanisms. Therefore, it is necessary to use theoretical models. Several theoretical models have been presented so far, meanwhile, providing theoretical models that can estimate the thermal conductivity using the easiest measurable properties along with sufficient accuracy and reliability can be very helpful. In this regard in the present study, a theoretical model based on cell size and foam density is developed in order to predict the thermal properties of polymeric foams. It was concluded that the error of the developed theoretical model is lower than 8% in comparison to the experimental results. In the following, the effect of most important structural parameters i.e. foam density and cell size on the thermal conductivity is investigated. Based on the results, determining the optimum density is necessary to achieve the lowest thermal conductivity. Also, the gas thermal conduction has the most contribution to the overall thermal conductivity and achieving the nanometer cell sizes can be useful in order to decrease it.

Keywords Polymeric Foam; Thermal Insulation; Thermal Conductivity; Theoretical Model

CITATION LINKS

[1] Production method and analysis of the acoustic and mechanical properties of soft polyurethane foam ... [2] Park CB. Poly (lactic acid)-based in situ microfibrillar composites with enhanced crystallization ... [3] Molecular confinement of solid and gaseous phases of self-standing ... [4] Biobased polyols using thiol-ene chemistry for rigid polyurethane foams ... [5] Thermal degradation and flame retardant properties of isocyanate-based flexible ... [6] A multi-criteria decision analysis on injection ... [7] Development of high void fraction polylactide ... [8] Processing and cell morphology relationships ... [9] . Poly (lactic acid) ... [10] Key world energy ... [11] Canadian energy overview 2014 ... [12] Experimental validation of the Knudsen effect in ... [13] Heat transfer in microcellular polystyrene ... [14] Thermal diffusivity of rigid polyurethane foams blown with ... [15] Present and future trends in the atmospheric burden ... [16] Polymer nano-foams for insulating applications prepared from ... [17] Thermal conductivity of open-cell polyolefin ... [18] Dependence of thermal properties of expandable polystyrene ... [19] Production, cellular structure and thermal conductivity of microcellular ... [20] Experimental characterization and theoretical modeling of the ... [21] Low-density and structure-tunable microcellular PMMA foams with ... [22] Development of high thermal insulation and compressive strength ... [23] Correlation between structure and thermal conductivity ... [24] Extinction coefficient of polyolefin ... [25] Thermal properties predictive model for insulating ... [26] Radiative properties of extruded polystyrene ... [27] Low density cellular plastics: Physical basis of ... [28] Modelling of thermal transport through a nanocellular polymer foam ... [29] Heat transfer in one-dimensional micro- and nano-cellular ... [30] Towards a new generation of polymeric foams: PMMA ... [31] Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004-2015) and future ... [32] CO₂-blown nanocellular ... [33] Advanced bimodal polystyrene/multi-walled carbon nanotube ... [34] The scattering of light and other electromagnetic ... [35] Radiation heat transfer in foam ... [36] Thermal radiative properties of phenolic foam ... [37] Simultaneous decision analysis on the structural and mechanical properties of polymeric microcellular nanocomposites ... [38] Mechanisms of nanoclay-enhanced plastic foaming processes: Effects of nanoclay intercalation ...

¹Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

²Mechanical Department, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. Postal Code: 1531157561
Phone: +98 (44) 31942854
Fax: +98 (44) 12773591
a.doniavi@urmia.ac.ir

Article History

Received: April 17, 2018

Accepted: February 12, 2019

ePublished: September 01, 2019

تخمین ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری بر مبنای مدلی تئوری بر اساس اندازه سلولی و چگالی فوم

رزگار حسن‌زاده PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

طاهر ازدست PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

علی دنیوی* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

محمد مهدی درویشی PhD

گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

مکانیزم انتقال حرارت فوم‌های پلیمری متشکل از سه مکانیزم مختلف از طریق فاز جامد، فاز گاز و تشعشع حرارتی است. ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری، متأثر از خواص ساختاری این مواد است. از آنجایی که بررسی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری به دلیل وجود خواص مختلف و اثر متفاوت این خواص بر مکانیزم‌های انتقال حرارت، مشکل است، لزوم استفاده از مدل‌های تئوری مشهود است. تاکنون مدل‌های تئوری مختلفی برای تخمین ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری ارائه شده است ولی در این میان ارائه یک مدل تئوری که براساس تعداد کمتری خواص ساختاری که اندازه‌گیری آن‌ها نیز به سهولت انجام گیرد، در کنار دقت و اعتبار کافی می‌تواند بسیار مفید باشد. بر همین اساس در تحقیق حاضر یک مدل تئوری که صرفاً براساس اندازه سلولی و چگالی فوم، ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری را تخمین می‌زند، ارائه شده است. در قیاس با نتایج تجربی مشخص شد که خطای مدل تئوری ارائه شده، در بیشترین حالت تقریباً ۸٪ است. در ادامه، اثر دو پارامتر مهم ساختاری، شامل چگالی فوم و اندازه سلولی روی ضریب هدایت حرارتی، مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج به‌دست آمده، برای دستیابی به کمترین مقدار ضریب هدایت حرارتی، چگالی بهینه نیاز به شناسایی دارد. از طرفی دیگر، انتقال حرارت گاز بیشترین نقش را در انتقال حرارت کل داشته و به منظور کاهش آن، ایجاد سلول‌های نانومتری به دلیل کاهش انتقال حرارت گاز نقش موثری ایفا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: فوم پلیمری، عایق حرارتی، ضریب هدایت حرارتی، مدل تئوری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳

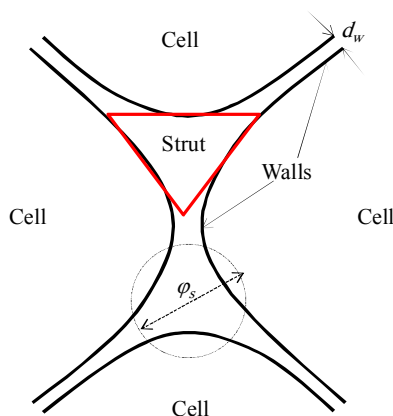
*نویسنده مسئول: a.doniavi@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

کاربرد قطعات پلیمری در دنیای امروزی به‌صورت چشم‌گیری رو به افزایش است اما صرفه‌جویی در مواد مصرفی این قطعات بنا به دلایل زیست محیطی و کمبود منابع آن، ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا، یکی از راه‌های مؤثر در صرفه‌جویی مواد مصرفی قطعات پلیمری، فوم کردن یا ایجاد ساختار سلولی است که ضمن کاهش مقدار ماده مصرفی، می‌تواند باعث بهبود خواصی مانند خواص مکانیکی [1, 2]، صوتی [1]، فیزیکی [3]، شیمیایی [4] و حرارتی [5] شود. تحقیقات متعددی روی فوم‌های پلیمری صورت گرفته که بیانگر ارائه خواص منحصر به فردی توسط این مواد است؛ به‌طور مثال، لی و همکاران [6] با استفاده از فوم کردن پلی‌آمید ۶، ضمن کاهش مقدار ماده مصرفی، بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی و سختی را گزارش نمودند. عاملی و همکاران [7] با فوم کردن پلی‌لاکتیک‌اسید، شکل‌پذیری این ماده را به‌صورت مؤثری افزایش دادند. ماتوآنا و همکاران [8] نشان دادند که فوم کردن پلی‌وینیل‌کلراید باعث افزایش چشم‌گیر استحکام در برابر ضربه می‌شود.

فوم‌های پلیمری از لحاظ ساختاری به ۴ دسته تقسیم می‌شوند [9]:

- (۱) فوم‌های مرسوم با اندازه سلولی بیشتر از ۱۰۰ میکرومتر
 - (۲) فوم‌های ریزسلولی با اندازه سلولی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر
 - (۳) فوم‌های میکروسلولی با اندازه سلولی بین یک تا ۱۰ میکرومتر
 - (۴) فوم‌های نانوسلولی با اندازه سلولی کمتر از یک میکرومتر
- ساختار سلولی فوم‌های پلیمری متشکل از ۳ بخش مختلف دیواره‌های سلولی، استرات‌ها و گاز داخل سلول‌ها است. دیواره‌های سلولی، قسمتی از پلیمر جامد است که دو سلول را از یکدیگر مجزا کرده و استرات شامل بخشی است که در مرز مشترک ۳ دیواره با یکدیگر تشکیل می‌شود که معمولاً به شکل مثلثی با اضلاع مقعراند و برای توصیف ساختار آن از قطر معادل دایره‌ای هم‌مساحت با مساحت قسمت مثلثی، استفاده می‌شود. شماتیک این پارامترها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) شماتیک دیواره‌های سلولی و استرات‌ها

نگرانی تأمین انرژی به دلیل استفاده فراوان از سوخت‌های فسیلی، تهدیدی جدی برای بشر است و امروزه به‌عنوان یکی از بزرگترین مشکلات جهانی قلمداد می‌شود. کشورهای زیادی برای غلبه بر این مشکل روی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌منظور جایگزینی انرژی‌های سنتی، سرمایه‌گذاری کرده‌اند. اما این سرمایه‌گذاری‌های کلان، آنچنان که انتظار می‌رفت، مفید و سودبخش واقع نشدند [10]. به‌طور مثال، بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ فقط ۰/۲٪ از کل انرژی‌های تولیدی در کانادا از طریق انرژی‌های باد، خورشیدی و جزر و مد بوده است [11]. بنابراین ضرورت یافتن راهکاری دیگر، بیش از پیش نمایان شد. یکی از مناسب‌ترین راهکارهای صرفه‌جویی، جلوگیری از اتلاف انرژی با بهبود خواص عایق حرارتی مواد است. ساختمان‌های صنعتی و مسکونی، به‌طور معمول بیش از ۶۰٪ کل انرژی‌های مصرفی را شامل می‌شوند. همچنین ۲۵٪ از اتلاف انرژی کل در کشورهای غربی، مربوط به مصارف خانگی است که ۵۰٪ آن به گرمایش فضاها تعلق دارد (این میزان در کشورهای اروپایی بین ۶۰ تا ۸۰٪ است) [11]. بنابراین، افزایش راندمان گرمایش و سرمایه‌گذاری ساختمان‌ها و متعاقباً کاهش هدررفت انرژی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف انرژی و هزینه‌ها شود.

به‌عنوان مصداقی بر کارایی این رویکرد، اتلاف انرژی در ساختمان‌های مسکونی ساخته شده در سال ۲۰۰۹ نسبت به موارد مشابه در سال ۱۹۹۰، بین ۳۰ تا ۶۰٪ کمتر گزارش شده است [12].

هواژل‌ها (Aerogel) یکی از اولین موادی بودند که با نمایش خواص فوق عایق حرارتی منحصر به فرد خود، به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های کارآمد در بهبود عایق‌کاری ارائه شدند. اما این مواد، به

فوم‌هایی با خواص عایق حرارتی مطلوب تولید کنند. ژائو و همکاران^[22] اثر افزودن نانوالیاف پلی‌تترافلوئوراتیلن را روی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلی‌پروپیلن بررسی نموده و مشاهده کردند که با افزایش میزان این نانوالیاف، ضریب هدایت حرارتی کاهش می‌یابد.

در تحقیقات مختلفی که به‌صورت تجربی صورت گرفته، مشاهده شد که با توجه به مکانیزم‌های انتقال حرارت مختلف (رابطه ۱) و پارامترهای مؤثر بر هر یک، بررسی تجربی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری به‌صورت جامع و گسترده بسیار دشوار است. ضمن اینکه بررسی تجربی مکانیزم‌های انتقال حرارت در فوم‌های پلیمری، نیازمند تجهیزات پیشرفته از جمله اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی در شرایط خلاء است^[23] که البته این روش‌ها نیز صرفاً در فوم‌های پلیمری سلول-باز جوابگو بوده و استفاده از آن‌ها در فوم‌های سلول-بسته ممکن نیست^[12]. بنابراین استفاده از مدل‌های تئوری به‌منظور بررسی مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت و بررسی تأثیر خواص ساختاری روی آن‌ها، ضروری است.

تاکنون چندین مدل تئوری به‌منظور پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری ارائه شده است. اما مشکل اصلی این مدل‌ها، نیاز به تعیین خواص متعدد است که اندازه‌گیری این خواص یا دشوار بوده یا نیازمند صرف وقت و هزینه است؛ به‌طور مثال، کامپو آرنایز و همکاران^[24] به بررسی دقت مدل تئوری تخمین ضریب تشعشعی فوم‌های پلی‌الفین پرداختند و مشاهده کردند که این مدل با دقت قابل قبولی ضریب تشعشعی را پیش‌بینی می‌کند. علاوه بر اینکه این مدل تئوری فقط به‌منظور تخمین ضریب تشعشعی کاربرد دارد، نیازمند محاسبه تجربی پارامترهای مختلفی از جمله کسر حجمی استرات‌ها است. پلاسیدو و همکاران^[25] یک مدل هندسی را برای پیش‌بینی خواص حرارتی فوم‌های پلیمری ارائه دادند. در این پژوهش، سلول‌ها، دیواره‌ها و استرات‌ها را به ترتیب به‌صورت دوازده وجهی‌هایی با وجوه پنج‌ضلعی، صفحه باریک و استوانه در نظر گرفتند. استوانه‌ها به‌صورت دایره‌هایی با سطح مقطع برابر با سطح مقطع استرات‌ها در نظر گرفته شدند، درحالی که ضخامت صفحات باریک با ضخامت دیواره سلولی یکسان در نظر گرفته شد. هرچند که مدل هندسی ایشان تطابق خوبی در مقایسه با نتایج تجربی از خود نشان داد ولی نیازمند محاسبه پارامترهای مختلفی مانند قطر سلولی، قطر استرات، ضخامت دیواره سلولی و چگالی فوم بود. در ادامه کائمرلین و همکاران^[26] تشعشع حرارتی فوم‌های پلی‌استایرن را به‌صورت تجربی و تئوری بررسی کردند. تفاوت مدل تئوری این پژوهش با مدل پلاسیدو و همکاران^[25] در استرات‌ها بود. در مدل کائمرلین و همکاران^[26]، استرات‌ها را به‌صورت منشور سه‌گوشه مقعری در نظر گرفتند که دو سوم سطح معادل مثلی با طول ضلع سلول‌های پنج‌ضلعی است. مدل ارائه‌شده در این پژوهش مانند مدل پلاسیدو نیازمند محاسبه پارامترهای مختلفی مانند قطر سلولی، قطر استرات، ضخامت دیواره سلولی و چگالی فوم بود.

تاکنون مدل‌های تئوری مختلفی به‌منظور پیش‌بینی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل‌های ارائه‌شده توسط پلاسیدو و همکاران^[25] و کائمرلین و همکاران^[26] اشاره کرد. ولی این مدل‌های تئوری، نیازمند خواص مختلفی هستند که اندازه‌گیری آن‌ها با آزمایش‌های متعدد با صرف هزینه و وقت زیاد صورت می‌پذیرد. چگالی فوم و اندازه سلولی جزء مهم‌ترین خواص فوم‌های پلیمری است که اندازه‌گیری آن‌ها نیز به سهولت امکان‌پذیر است. محاسبه چگالی فوم از طریق

دلیل مشکلات عدیده‌ای که داشتند خیلی زود جایگاه خود را از دست دادند. از جمله معایب آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد^[13]:

- ✓ روش فرآیندی وقت‌گیر
- ✓ مقدار زیاد حلال آلی درگیر در ساخت آن
- ✓ هزینه بهره‌وری پایین

از این رو فوم‌های پلیمری به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین خود که کمتر از پلیمر پایه است (ضریب هدایت حرارتی پلیمرها تقریباً ۲٪ فلزات است)، به‌عنوان مواد عایق حرارتی معرفی شدند. در سالیان قبل، از گازهایی مانند کلروفلوئوروکربن‌ها یا هیدروکلروفلوئوروکربن‌ها به‌عنوان گاز در فوم‌های پلیمری استفاده می‌شد که پس از مدتی به دلیل مسائل زیست‌محیطی استفاده از آن‌ها ممنوع شد^[12, 14, 15]. در کل، گازهایی با خواص مناسب عایقی، دو مشکل اساسی دارند. اولاً این گازها معمولاً برای محیط زیست مضر هستند و ثانیاً نکه‌داشتن این گازها داخل سلول‌ها در طولانی مدت امکان‌پذیر نبوده و ناگزیر پس از مدتی از ساختار فوم خارج شده و جای خود را به هوا می‌دهد. بنابراین استفاده از هر گونه گاز غیر از هوا، در فوم‌های پلیمری، راه‌کار مناسبی برای کاهش ضریب فاز گاز نبوده و هوا، رایج‌ترین گاز استفاده‌شده در فوم‌های پلیمری برای کاربردهای عایق حرارتی است.

ضریب هدایت حرارتی کلی فوم‌های پلیمری (λ_t) متأثر از ۴ بخش مختلف است^[16]:

۱) ضریب ناشی از جابجایی بین فاز گاز و جامد (λ_c)

۲) ضریب ناشی از فاز جامد (λ_s)

۳) ضریب ناشی از فاز گاز (λ_g)

۴) ضریب ناشی از تشعشع (λ_r)

بنابراین:

$$\lambda_t = \lambda_c + \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \quad (1)$$

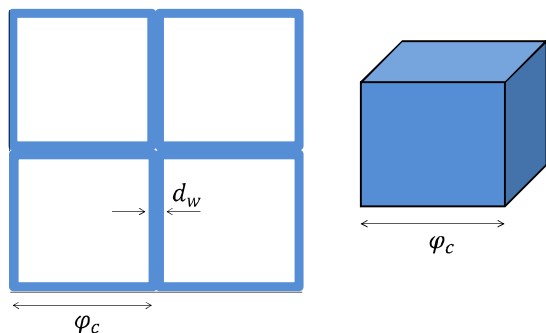
ضریب هدایت حرارتی فوم‌های مرسوم پلیمری حاوی هوا، حدود ۰.۱ میلی‌وات بر متر کلون است که برای استفاده در کاربردهای عایق حرارتی مناسب نیست؛ بنابراین محققین به دنبال راه‌کارهایی برای کاهش این ضریب بودند و تاکنون تحقیقات تجربی و تئوری مختلفی در این زمینه صورت گرفته است.

آلوارز لایز و همکاران^[17]، ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلی‌الفین را به‌صورت تجربی بررسی کردند. هر چند که به دلیل ماکروسلولی بودن فوم‌های تولیدشده در این پژوهش (اندازه‌های سلولی از مرتبه ۱۰۰۰ میکرومتر)، نتایج را نمی‌توان به فوم‌های ریزسلولی و مخصوصاً میکروسلولی تعمیم داد. در تحقیق اسکندر برگ و والیس^[18] ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلی‌استایرن بررسی شده و وابستگی آن‌ها به اندازه سلولی و چگالی فوم بر اساس مدل‌های رگرسیون بیان شد. در تحقیق رگرورویز و همکاران^[19]، اثر چگالی روی ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری بررسی شده است. در تحقیق آردوینی‌شوستر و همکاران^[20] بررسی تجربی با تمرکز بر خواص تشعشعی انجام گرفته است. بررسی اثر اندازه سلولی روی ضریب گاز فوم‌های پلیمری در تحقیق نوتاریو و همکاران^[12] صورت گرفته است. گونگ و همکاران^[13] اثر درصد وزنی نانولوله کربنی را روی ضریب تشعشعی فوم‌های پلیمری نانوکامپوزیتی بررسی کردند. در این تحقیق، اندازه سلولی و چگالی فوم ثابت در نظر گرفته شده و نشان داده شد که افزودن نانولوله‌های کربنی در یک حد بهینه، ضریب تشعشعی فوم‌های پلیمری را کاهش می‌دهد. ونگ و همکاران^[21] با تولید فوم‌های پلیمری پلی‌متیل‌متاکریلات با نسبت‌های انبساط بالا و اندازه سلولی‌های پایین، توانستند

با در نظر گرفتن ساختار سلولی مطابق شکل ۲، رابطه نسبت انبساط را می‌توان به صورت رابطه ۱۰ نیز استخراج نمود.

$$\varphi = \frac{(\varphi_c + d_w)^3}{(\varphi_c + d_w)^3 - \varphi_c^3} \quad (10)$$

در این رابطه، d_w معرف ضخامت دیواره سلولی است.



شکل ۲) ساختار سلولی

با ترکیب روابط ۹ و ۱۰ می‌توان نشان داد که ضخامت دیواره سلولی به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$d_w = \left(\sqrt[3]{\frac{\varphi}{\varphi - 1}} - 1 \right)^3 \sqrt[3]{\frac{\varphi - 1}{N}} \quad (11)$$

ارتباط بین خواص ساختاری توسط پلاسیدو و همکاران^[25] به صورت رابطه ۱۲ ارائه شد:

$$d_{w,P} = \frac{\frac{\rho_f}{\rho_s} 0.348 \varphi_c^3 - 2.8 \varphi_s^2 \varphi_c + 3.93 \varphi_s^3}{1.3143 \varphi_c^2 - 7.367 \varphi_s \varphi_c + 10.323 \varphi_s^2} \quad (12)$$

که از این رابطه، φ_s (قطر متوسط استرات‌ها) حاصل می‌شود. این رابطه از مرتبه ۳ بر حسب φ_s است که فقط یک ریشه قابل قبول دارد.

ارتباط بین خواص ساختاری توسط کائمرلن و همکاران^[26] به صورت رابطه ۱۳ ارائه شد:

$$d_{w,K} = \frac{-x_2 + \sqrt{x_2^2 - 4x_1x_3}}{2x_1} \quad (13)$$

که در این رابطه:

$$x_1 = 4.639 \varphi_c - 17.976 \varphi_s \quad (14\text{-الف})$$

$$x_2 = 1.317 \varphi_c^2 - 13.4284 \varphi_s \varphi_c + 34.2375 \varphi_s^2 \quad (14\text{-ب})$$

$$x_3 = 2.805 \varphi_c \varphi_s^2 - 0.349 \left(\frac{1}{\varphi} \right) \varphi_c^3 \quad (14\text{-ج})$$

که این معادله بر حسب φ_s از مرتبه ۲ بوده و بنابراین ۲ ریشه دارد. کسر حجمی استرات‌ها (f_s) به صورت نسبت حجمی استرات‌ها به حجم کل جامد (متشکل از استرات‌ها و دیواره‌های سلولی) تعریف شده و مطابق رابطه ۱۵ به دست می‌آید:

$$f_s = \frac{V_{struts}}{V_{struts} + V_{walls}} \quad (15)$$

که V_{walls} و V_{struts} به ترتیب حجم اشغال شده سلول توسط استرات‌ها و دیواره‌های سلولی است.

V_{walls} و V_{struts} توسط پلاسیدو و همکاران^[25] به ترتیب به صورت رابطه ۱۶ و ۱۷ ارائه شدند:

$$V_{struts,P} = 2.8 \varphi_s^2 \varphi_c - 3.93 \varphi_s^3 \quad (16)$$

$$V_{walls,P} = \frac{\rho_f}{\rho_s} 0.348 \varphi_c^3 - 2.8 \varphi_s^2 \varphi_c + 3.93 \varphi_s^3 \quad (17)$$

آزمایشگاهی و طبق روش ارشمیدس و اندازه‌گیری اندازه سلولی بر اساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام می‌گیرد. بر همین اساس، در تحقیق حاضر یک مدل تئوری برحسب اندازه سلولی و چگالی فوم ارائه می‌شود و کارایی آن در قیاس با نتایج تجربی تحقیقات دیگر محققین بررسی شده است. در ادامه، پس از حصول اطمینان از دقت این مدل، مطالعات گسترده‌ای روی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری صورت گرفته است.

۲- تئوری

همان طور که بیان شد، هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه یک مدل تئوری به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری بر اساس اندازه سلولی و چگالی فوم است. در این پژوهش، اندازه سلولی (φ_c) و چگالی فوم (ρ_f) مشخص فرض شده است. نسبت انبساط (φ_c)، نسبت حجم فوم (V_f) به حجم پلیمر (V_p) بوده و مطابق رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$\varphi = \frac{V_f}{V_p} = \frac{V_g + V_p}{V_p} \quad (2)$$

که در این رابطه، V_g حجم گاز داخل فوم است. می‌توان به راحتی نشان داد که با صرف نظر کردن از جرم گاز داخل فوم در مقابل جرم پلیمر، نسبت انبساط را می‌توان به صورت نسبت چگالی پلیمر (ρ_s) به چگالی فوم، تعریف کرد (رابطه ۳):

$$\varphi = \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (3)$$

چگالی سلولی به صورت تعداد سلول‌های موجود در واحد حجم پلیمر فوم نشده، تعریف شده و به صورت رابطه ۴ بیان شده است.

$$N = \left(\frac{n}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \times \varphi \quad (4)$$

که در این رابطه N چگالی سلولی بر حسب cell/cm^3 و n تعداد سلول‌های موجود در مساحت مشخص A از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع نمونه فوم شده است.

برای به دست آوردن همبستگی بین اندازه سلولی و چگالی سلولی، دو حالت سلول مکعبی و کروی در نظر گرفته شده است. حجم گاز را می‌توان به صورت حاصل ضرب تعداد سلول‌ها در حجم یک سلول به دست آورد. برای حالت سلول مکعبی با طول ضلع φ_c و برای حالت سلول کروی با قطر φ_c ، حجم گاز به ترتیب، مطابق روابط ۵ و ۶ حاصل می‌شود.

$$V_g = N \cdot \varphi_c^3 \quad (5)$$

$$V_g = N \cdot \frac{\pi}{6} \varphi_c^3 \quad (6)$$

بنابراین اندازه سلولی برای حالت مکعبی و کروی بر حسب اندازه سلولی و به ازای واحد حجم پلیمر را می‌توان به ترتیب مطابق روابط ۷ و ۸ ارائه داد:

$$\varphi_c = \left[V_g \cdot \frac{1}{N} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[(\varphi - 1) \frac{1}{N} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$\varphi_c = \left[V_g \cdot \frac{6}{\pi N} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[(\varphi - 1) \frac{6}{\pi N} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

قابل ذکر است که مقدار $\left[\frac{6}{\pi} \right]^{\frac{1}{3}}$ در رابطه ۸ تقریباً برابر ۱/۲۴ است. بنابراین در حالت کلی و صرف نظر از شکل سلولی می‌توان با در دست داشتن اندازه سلولی، چگالی سلولی را به صورت رابطه ۹ بیان کرد.

$$N = \frac{6(\varphi - 1)}{\pi \varphi_c^3} \quad (9)$$

$$K_n = \frac{l_{\text{mean}}}{\varphi_c} \quad (23)$$

که l_{mean} متوسط مسیر آزاد (Mean free path) مولکول‌های گاز بوده و برای هوا حدود ۷۰ نانومتر است. یعنی هر مولکول هوا به صورت متوسط تقریباً ۷۰ نانومتر فاصله می‌پیماید تا به مولکول بعدی هوا برخورد کند.

بخش λ_r توسط معادله روزلند (Rosseland) مطابق رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود [12, 21, 22]:

$$\lambda_r = \frac{16n^2\sigma T_r^3}{3K_R} \quad (24)$$

که در این رابطه n ضریب شکست بوده و برای فوم‌های پلیمری حدود یک در نظر گرفته می‌شود [13]. همچنین σ ثابت استفان-بولتزمن بوده و برابر $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ است. از طرفی T_r متوسط دما داخل فوم پلیمری بر حسب کلین (K) است. ضریب K_R ضریب خاموشی (Extinction coefficient) بوده که عکس متوسط مسیر آزاد مربوط به فوتون‌های یک ماده بر حسب m^{-1} است و به صورت رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود [24]:

$$K_R = K_{\text{struts}} + K_{\text{walls}} \cdot K_{\text{Solid}} \quad (25)$$

که در آن K_{walls} و K_{struts} به ترتیب بخشی از ضریب خاموشی بوده که مربوط به استرات‌ها و دیواره‌های سلولی است. K_{Solid} ضریب خاموشی مربوط به پلیمر پایه بوده که برای مثال مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده برای پلی‌استایرن و پلی‌اتیلن به ترتیب برابر ۸۰ [26] و ۱۴۰ [24] بر حسب cm^{-1} است.

K_{struts} و K_{walls} به ترتیب طبق رابطه‌های ۲۶ و ۲۷ محاسبه می‌شوند [24]:

$$K_{\text{struts}} = 4.10 \frac{\sqrt{f_s} \frac{\rho_f}{\rho_s}}{\varphi_c} \quad (26)$$

$$K_{\text{walls}} = (1 - f_s) \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (27)$$

بر این اساس، مدل ارائه شده، ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری را با در اختیار داشتن اندازه سلولی و چگالی فوم، تخمین می‌زند. فلوچارت محاسباتی در شکل ۳ نشان داده شده است.

این مقادیر توسط کاتمرکن و همکاران [26] به صورت روابط ۱۸ و ۱۹ ارائه شد:

$$V_{\text{struts},K} = 2.805 \varphi_c^2 \quad (18)$$

$$V_{\text{walls},K} = [1.317 \varphi_c^2 - 13.4284 \varphi_s \varphi_c + 34.2374 \varphi_s^2] \cdot d_w + 4.639 \varphi_c d_w^2 - 17.976 \varphi_s d_w^2 \quad (19)$$

همان طور که بیان شد، ضریب هدایت حرارتی کلی فوم‌های پلیمری (λ_t) متأثر از ۴ بخش مختلف است (رابطه ۱).

تحقیقات متعدد صورت گرفته نشان داده‌اند که جابه‌جایی حرارتی (λ_c) برای فوم‌های سلول-باز با اندازه سلولی کوچکتر از ۲ میلی‌متر و فوم‌های سلول-بسته با اندازه سلولی کوچکتر از ۴ میلی‌متر، ناچیز است و به راحتی می‌توان از آن صرف نظر نمود [27]. گونگ و همکاران [13] بیان کردند که در فوم‌های پلیمری، به دلیل کوچک بودن اندازه‌های سلولی، مولکول‌های هوا قادر به جریان یافتن داخل سلول‌ها نیستند که این امر ناشی از اختلاف ناچیز چگالی هوا داخل سلول‌ها است. بنابراین بخش λ_c از رابطه ۱ حذف می‌شود.

بخش λ_s مطابق رابطه ۲۰ محاسبه می‌شود [28]:

$$\lambda_s = (1 - \epsilon_{VF}) \left(\frac{2 - f_s}{3} \right) \lambda_{s0} \quad (20)$$

که در این رابطه λ_{s0} ضریب هدایت حرارتی پلیمر پایه بر حسب W/m.K است. ϵ_{VF} کسر حفره توخالی بوده و برابر است با:

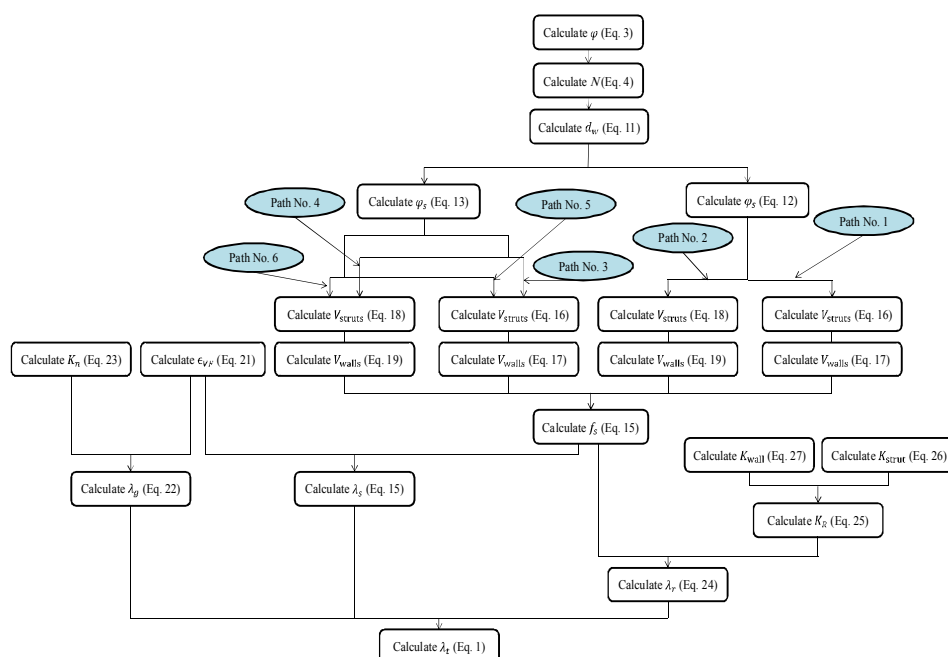
$$\epsilon_{VF} = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (21)$$

بخش λ_g مطابق رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود [۲۹]:

$$\lambda_g = \frac{\epsilon_{VF}}{1 + \beta K_n} \lambda_{g0} \quad (22)$$

در این رابطه λ_{g0} ضریب هدایت حرارتی برای گاز داخل سلول‌ها بوده که برای هوا در دمای محیط، تقریباً ۲۶ میلی‌وات بر متر کلین است. β ضریبی برای محاسبه انتقال انرژی بین مولکول‌های گاز و دیواره‌های جامد محدودکننده است که در فوم‌های پلیمری حدود ۲ لحاظ می‌شود [12, 13, 29].

از طرفی K_n عدد نادسن (Knudsen) بوده و طبق رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود [12]:



شکل ۳) فلوچارت محاسباتی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی مدل تئوری

به‌منظور بررسی صحت روابط تئوری ارائه شده در قسمت قبلی، نتایج این روابط با تحقیق اسکلنبرگ و والیس^[18] مقایسه شده است که در آن چگالی فوم و اندازه سلولی فوم‌های پلی‌استایرن به‌صورت تجربی به‌دست آمده است. این نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱) خواص ساختاری تجربی پلی‌استایرن^[18]

فوم	اندازه سلولی (میکرومتر)	چگالی فوم (کیلوگرم بر مترمربع)
۱	۳۰۲	۱۳/۹
۲	۱۱۳	۱۴/۰
۳	۱۵۶	۱۵/۵
۴	۹۱	۱۷/۲
۵	۱۴۸	۱۸/۲
۶	۲۱۳	۱۸/۵
۷	۱۲۸	۲۲/۶
۸	۸۶	۲۲/۸
۹	۱۹۴	۲۲/۸
۱۰	۱۶۶	۳۰/۵
۱۱	۷۵	۳۰/۶
۱۲	۱۱۳	۳۳/۶

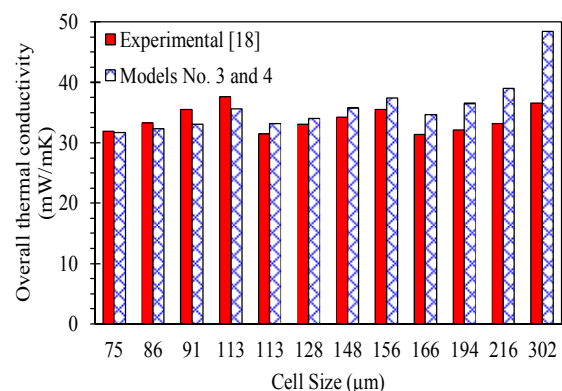
همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، از ۶ مسیر مختلف مقدار کسر حجمی استرات‌ها محاسبه شده است. از آنجایی که محاسبه ϕ_s از رابطه ۱۳ منجر به ۲ جواب می‌شود، بنابراین از هر جواب، ۲ مقدار برای f_s حاصل می‌شود. در کل ۶ مقدار مختلف برای

جدول ۲) صحت‌سنجی مدل تئوری ارائه‌شده در مقایسه با نتایج تجربی^[18]

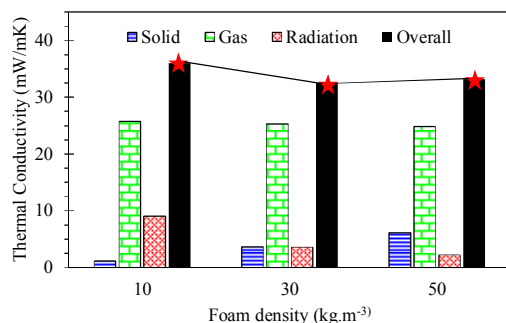
فوم	λ_f (میلی‌وات بر متر کلوین) تجربی ^[18]	ضریب هدایت حرارتی کل (تئوری) (کیلووات بر متر کلوین)					خطا (%)						
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۳۶/۶	۳۶/۰	۳۵/۹	۴۸/۵	۴۸/۵	۷۱/۷	۷۱/۷	۱/۹	۱/۹	۳۲/۵	۳۲/۵	۹۵/۹	۹۵/۹
۲	۳۷/۶	۳۴/۵	۳۴/۵	۳۵/۶	۳۵/۶	۴۴/۷	۴۴/۷	۸/۲	۸/۲	۵/۳	۵/۳	۱۸/۹	۱۸/۹
۳	۳۵/۵	۳۳/۸	۳۳/۸	۳۷/۴	۳۷/۴	۵۰/۴	۵۰/۴	۴/۸	۴/۸	۵/۴	۵/۴	۴۲/۰	۴۲/۰
۴	۳۵/۵	۳۳/۱	۳۳/۰	۳۳/۱	۳۳/۱	۴۰/۹	۴۰/۹	۷/۸	۷/۸	۶/۸	۶/۸	۱۵/۲	۱۵/۲
۵	۳۴/۲	۳۳/۴	۳۳/۳	۳۵/۸	۳۵/۸	۴۸/۳	۴۸/۳	۲/۳	۲/۳	۴/۷	۴/۷	۴۱/۲	۴۱/۲
۶	۳۳/۲	۳۴/۱	۳۴/۱	۳۹/۰	۳۹/۰	۵۶/۹	۵۶/۹	۲/۷	۲/۷	۱۷/۵	۱۷/۵	۷۱/۴	۷۱/۴
۷	۳۳/۱	۳۳/۵	۳۳/۸	۳۴/۰	۳۴/۰	۴۴/۴	۴۴/۴	۰/۹	۰/۹	۲/۷	۲/۷	۳۴/۱	۳۴/۱
۸	۳۳/۳	۳۲/۱	۳۲/۳	۳۲/۳	۳۲/۳	۳۹/۴	۳۹/۴	۳/۶	۳/۶	۳/۰	۳/۰	۱۸/۳	۱۸/۳
۹	۳۲/۱	۳۳/۵	۳۳/۴	۳۶/۵	۳۶/۵	۵۲/۰	۵۲/۰	۴/۴	۴/۴	۱۳/۷	۱۳/۷	۶۲/۰	۶۲/۰
۱۰	۳۱/۴	۳۳/۰	۳۳/۰	۳۴/۶	۳۴/۶	۴۶/۵	۴۶/۵	۵/۱	۵/۱	۱۰/۲	۱۰/۲	۴۸/۱	۴۸/۱
۱۱	۳۱/۹	۳۱/۸	۳۱/۷	۳۲/۰	۳۲/۰	۳۷/۷	۳۷/۷	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۱۸/۲	۱۸/۲
۱۲	۳۱/۵	۳۲/۷	۳۲/۲	۳۳/۲	۳۳/۲	۴۱/۱	۴۱/۱	۳/۸	۳/۸	۵/۴	۵/۴	۳۰/۵	۳۰/۵

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این مدل‌ها نیز در اندازه‌های سلولی پایین، دقت مناسبی داشته ولی در اندازه‌های سلولی بالا، دقت آن‌ها در مقایسه با نتایج تجربی پایین می‌آید. به‌طور کلی می‌توان گفت که تقریباً برای اندازه‌های سلولی پایین‌تر از ۱۵۰ میکرومتر، نتایج حاصل از مدل‌های شماره ۳ و ۴ نیز قابل اعتماد هستند. از آنجایی که تحقیقات اخیر صورت گرفته روی فوم‌های پلیمری^[30] [32] به دنبال کاهش اندازه‌های سلولی به محدوده میکرومتری هستند و تقریباً در تمامی این تحقیقات، اندازه‌های سلولی کمتر از ۱۰۰ میکرومتر است، بنابراین برای این فوم‌ها می‌توان از مدل‌های شماره ۳ و ۴ بهره گرفت.

در کل می‌توان گفت که مدل‌های شماره ۱ و ۲ در تمامی اندازه‌های سلولی با دقت کمتر از ۸٪، ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری



نمودار ۱) کارایی مدل‌های شماره ۳ و ۴ برحسب اندازه سلولی

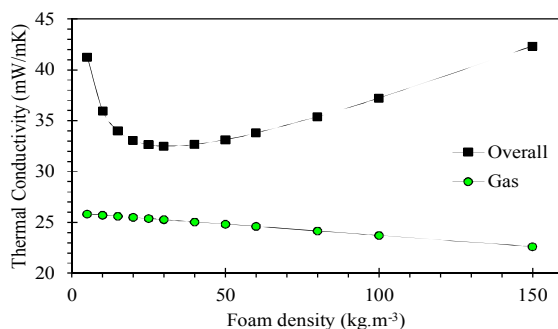


نمودار ۳) سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت فوم‌های پلیمری به ازای چگالی‌های فوم مختلف در اندازه سلولی ۱۰۰ میکرومتر

همان طور که نمودار ۲ نشان می‌دهد، با کاهش چگالی فوم، ضریب جامد، کاهش می‌یابد. با کاهش چگالی فوم، سهم حرارتی جامد در نمونه فوم پلیمری پایین آمده و به دلیل اینکه ضریب هدایت حرارتی پلیمر بسیار بیشتر از گاز (حدود ۱۰ برابر [33]) است، بنابراین ضریب جامد کاهش می‌یابد. افزایش ضریب تشعشعی با کاهش چگالی، از دیگر نتایج نمودار ۳ است. از آنجایی که تشعشع، نوعی از انتقال حرارت است که توسط امواج الکترومغناطیسی منتقل می‌شود [34] و این امواج نه تنها برای انتقال نیازی به محیط مادی ندارند، بلکه بیشترین میزان انتقال آن‌ها در خلاء است، بنابراین میزان تشعشع در هوا بیشتر از پلیمر (اکثر پلیمرها شفاف یا نیمه شفاف هستند) است. با کاهش چگالی فوم، سهم پلیمر در نمونه فوم پلیمری کاهش یافته و بنابراین تشعشع کمتری مسدود شده [35] و ضریب تشعشعی افزایش می‌یابد (نمودار ۲).

بنابراین وجود یک چگالی بهینه برای دستیابی به کمترین ضریب هدایت حرارتی (نمودار ۲) را می‌توان به عملکرد متفاوت دو مکانیزم جامد و تشعشعی نسبت به تغییرات چگالی ربط داد. در چگالی‌های پایین، ضریب تشعشعی بالا بوده و با افزایش چگالی تا چگالی بهینه، این ضریب کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر، در چگالی‌های بالا، ضریب جامد بالا بوده و با کاهش چگالی تا چگالی بهینه، این ضریب کاهش می‌یابد. در چگالی بهینه، حالتی اتفاق می‌افتد که تلرانسی بین ضرایب جامد و تشعشعی برقرار شده و ضریب هدایت حرارتی کل به کمترین مقدار خود می‌رسد.

همان طور که قبلاً بیان شد، تغییر چگالی فوم در بازه در نظر گرفته شده، تأثیری روی ضریب هدایت حرارتی گاز نداشت. به منظور بررسی بیشتر این اثر، تغییرات ضریب هدایت حرارتی گاز در بازه گسترده‌تری از چگالی بررسی شد و نتایج به صورت نمودار ۴ استخراج شد.

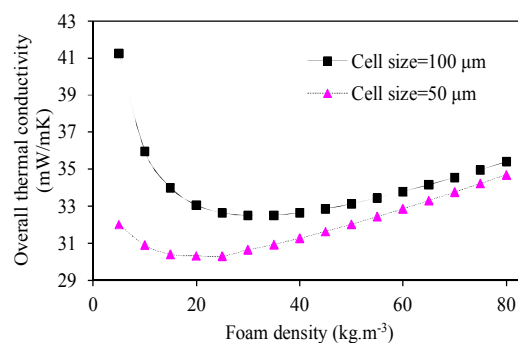


نمودار ۴) بررسی اثر تغییرات چگالی روی ضریب گاز

را پیش‌بینی می‌کنند. ضمن اینکه نتایج حاصل از مدل‌های شماره ۳ و ۴ نیز برای اندازه‌های سلولی کمتر از ۱۰۰ میکرومتر قابل اعتماد هستند. در ادامه مقاله حاضر، به منظور تحلیل‌های مختلف از مدل شماره ۱ که تقریباً بهترین تخمین را در بین مدل‌های دیگر داشته است، بهره گرفته شده است. باید خاطرنشان شود که تخمین ضریب هدایت حرارتی با استفاده از این مدل، صرفاً با در دست داشتن چگالی فوم و اندازه سلولی صورت می‌گیرد. از آنجایی که اندازه‌گیری این ۲ خاصیت به سادگی انجام می‌شود، بنابراین مدل حاضر، دقت کافی و مزیت بسیار زیادی نسبت به مدل‌های دیگر دارد.

۳-۲- اثر چگالی فوم

بررسی اثر چگالی فوم بر ضریب هدایت حرارتی در اندازه‌های سلولی ۱۰۰ و ۵۰ میکرومتر در نمودار ۲ ارائه شده است.



نمودار ۲) اثر چگالی فوم بر ضریب کلی هدایت حرارتی

همان طور که نتایج نشان می‌دهد، برای دستیابی به کمترین ضریب هدایت حرارتی در فوم‌های پلیمری، یک مقدار چگالی بهینه وجود دارد. در ادامه به صورت مفصل به تحلیل این امر پرداخته شده است. نتایج مویید این امر است که با کاهش اندازه سلولی، مقدار چگالی بهینه برای دستیابی به کمترین ضریب هدایت حرارتی، کاهش می‌یابد.

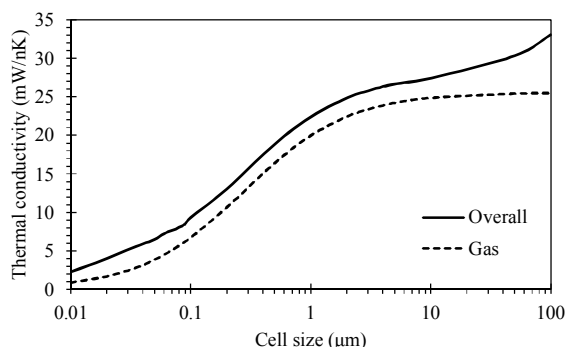
از دیگر نتایج مهم نمودار ۲ می‌توان به کاهش ضریب هدایت حرارتی با کاهش اندازه سلولی اشاره کرد که در بخش بعدی به تفصیل، تحلیل شده است. نکته قابل توجه، افزایش اختلاف بین ضرایب هدایت حرارتی در اندازه‌های سلولی مختلف، با کاهش چگالی فوم است. به عبارت دیگر، اثر اندازه سلولی در چگالی‌های پایین فوم، بسیار بیشتر از چگالی‌های بالاست.

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر چگالی روی ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری، مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در این مواد در ۳ چگالی مختلف و در اندازه سلولی ثابت در نمودار ۳ ارائه شده است. با تغییر چگالی از ۱۰ به ۳۰ کیلوگرم بر مترمربع و سپس ۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، ضریب هدایت حرارتی کل ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است.

همان طور که نتایج نمودار ۳ نشان می‌دهد، در تمامی چگالی‌های فوم، ضریب گاز بیشترین سهم در ضریب هدایت حرارتی کل را دارد. همچنین سهم حرارتی گاز با تغییر چگالی در یک اندازه سلولی ثابت، تقریباً تغییر نمی‌کند. به عبارت دیگر، ضریب گاز متأثر از چگالی فوم نیست. مطابق رابطه ۲۲، ضریب گاز متأثر از کسر حفره بوده و از طرفی دیگر، کسر حفره وابسته به چگالی فوم است (رابطه ۲۱) اما تغییرات چگالی فوم از ۱۰ به ۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، کسر حفره را تنها ۳/۵٪ تغییر می‌دهد و متعاقباً، تأثیر بسیار کمی بر ضریب گاز خواهد داشت. به گونه‌ای که با تغییر چگالی فوم از ۱۰ به ۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، ضریب هدایت حرارتی گاز از ۲۵/۷۱ به

حرارت به خود اختصاص داده است. همچنین تغییرات ضریب گاز با کاهش اندازه سلولی، بسیار ناچیز است. مطابق رابطه ۱۸ با کاهش اندازه سلولی، عدد نادسن افزایش می‌یابد و بنابراین طبق رابطه ۱۷، انتظار می‌رود که ضریب گاز کاهش یابد اما نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌های سلولی به میزانی کاهش نیافته است که پیوستاری فاز گاز را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین نتایج موید این امر است که ضریب جامد با کاهش اندازه سلولی تغییر نمی‌کند.

مطابق نتایج ارائه شده در نمودار ۶، کاهش ضریب هدایت حرارتی در اثر کاهش اندازه سلولی، به دلیل کاهش ضریب تشعشعی است. طبق رابطه ۲۶، ضریب خاموشی مربوط به استرات‌ها با کاهش اندازه سلولی، افزایش می‌یابد. افزایش ضریب خاموشی استرات‌ها، طبق رابطه ۲۵، باعث افزایش ضریب خاموشی خواهد شد و متعاقباً، افزایش ضریب خاموشی طبق رابطه ۲۴ موجب کاهش ضریب تشعشعی می‌شود. تعداد استرات‌ها و دیواره‌های سلولی، نقش برجسته‌ای در میرایی تشعشع دارند [36]. با کاهش اندازه سلولی، چگالی سلولی یا به عبارتی تعداد سلول‌های موجود در نمونه فوم پلیمری، افزایش می‌یابد [37]. افزایش تعداد سلول‌ها به معنی وجود تعداد بیشتری استرات و دیواره سلولی است که به دلیل انعکاس‌های چندگانه صورت گرفته توسط آن‌ها، تشعشع میرا خواهد شد [13]. بنابراین با کاهش اندازه سلولی و متعاقباً کاهش ضریب تشعشعی، ضریب هدایت حرارتی کل کاهش می‌یابد. در ادامه به بررسی اثر نادسن و به عبارتی، اثر اندازه سلولی بر ضریب گاز خواهیم پرداخت. این نتایج در نمودار ۷ ارائه شده است.



نمودار ۷) اثر اندازه سلولی روی ضریب گاز (اثر نادسن)

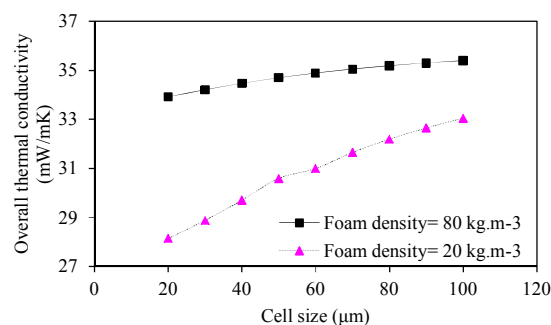
همان طور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود، ضریب گاز با کاهش اندازه سلولی از ۱۰۰ تا تقریباً ۵ میکرومتر، با کاهش بسیار اندکی همراه است (همان گونه که در نمودار ۶ نیز مشاهده شد). گونگ و همکاران [13] نشان دادند که اثر نادسن در اندازه‌های سلولی ۵ میکرومتر به صورت جزئی مشاهده می‌شود. با کاهش بیشتر اندازه سلولی، ضریب گاز به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر، اثر نادسن اتفاق می‌افتد. مطابق رابطه ۲۳، اگر اندازه سلولی به ۰/۷ میکرومتر برسد، عدد نادسن برابر یک شده و متعاقباً طبق رابطه ۲۲، ضریب گاز، به یک سوم ضریب هدایت حرارتی هوا در دمای اتاق (۲۶ میلی‌وات بر متر کلین) یعنی تقریباً ۸/۷ میلی‌وات بر متر کلین خواهد رسید. همان طور که نتایج قبلی نشان داده بود، ضریب گاز، بیشترین سهم را در ضریب هدایت حرارتی کل دارد و بنابراین با افت شدید آن، ضریب هدایت حرارتی کل به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد.

اثر نادسن را می‌توان بدین گونه توجیه کرد که اگر اندازه سلولی تقریباً با متوسط مسیر آزاد مولکول‌های گاز داخل سلول‌ها (در اینجا

مطابق این نتایج، مجدداً وجود چگالی بهینه به منظور دستیابی به کمترین ضریب هدایت حرارتی کل، مشاهده شد. همان طور که مشاهده می‌شود، ضریب گاز با کاهش چگالی فوم، افزایش می‌یابد. در چگالی‌های کمتر از چگالی بهینه، تغییرات ضریب گاز بسیار اندک بوده و تأثیری روی ضریب هدایت حرارتی کل ندارد. در چگالی‌های بالاتر از چگالی بهینه نیز، هرچند که تغییرات ضریب گاز مشهودتر است اما تغییرات آن برعکس تغییرات ضریب هدایت حرارتی کل است؛ به گونه‌ای که با افزایش چگالی (در چگالی‌های بالاتر از چگالی بهینه)، ضریب هدایت حرارتی کل افزایش می‌یابد، در حالی که ضریب گاز رفتار کاهشی دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که ضریب گاز که بیشترین سهم را در ضریب هدایت حرارتی کل دارد (نمودار ۳) را نمی‌توان با تغییرات چگالی فوم کنترل نمود و احتمالاً راه‌کار کاهش ضریب هدایت حرارتی کل در اثر کاهش ضریب گاز را بایستی در تغییرات اندازه سلولی یافت.

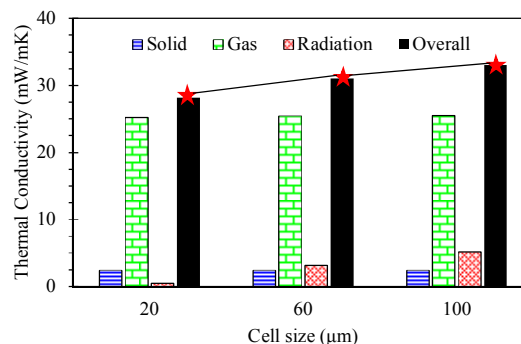
۳-۳- اثر اندازه سلولی

بررسی اثر اندازه سلولی روی ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری در چگالی‌های فوم مختلف در نمودار ۵ ارائه شده است. همان طور که نتایج نشان می‌دهد، ضریب هدایت حرارتی با کاهش اندازه سلولی، کاهش می‌یابد اما این کاهش در چگالی‌های فوم پایین، مشهودتر است. همان طور که قبلاً بیان شد، اثر اندازه سلولی در چگالی‌های پایین چشم‌گیرتر است که نمودار ۵ در تطابق با این موضوع است.



نمودار ۵) اثر اندازه سلولی روی ضریب هدایت حرارتی

به منظور بررسی دلیل کاهش ضریب هدایت حرارتی با کاهش اندازه سلولی، مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در اندازه‌های سلولی مختلف، در نمودار ۶ نشان داده شده است.



نمودار ۶) سهم مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت فوم‌های پلیمری به ازای اندازه‌های سلولی مختلف در چگالی فوم ۲۰ کیلوگرم بر مترمربع

همان گونه که نتایج نمودار ۶ نشان می‌دهد و در بخش قبلی نیز مشاهده شد، ضریب گاز بیشترین سهم را بین مکانیزم‌های انتقال

دنیا ارائه کنند. در همین راستا، در تحقیق حاضر مدلی تئوری به‌منظور پیش‌بینی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری بر اساس ۲ خاصیت اندازه سلولی و چگالی فوم ارائه شد. هر دوی این خواص جزو خواص ساختاری بسیار مهم فوم‌های پلیمری بوده و به سادگی قابل اندازه‌گیری هستند. صحت‌سنجی مدل تئوری ارائه‌شده در قیاس با نتایج تجربی نشان داد که این مدل از دقت و اعتبار کافی برخوردار بوده و ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری را با خطای کمتر از ۸٪ تخمین زد.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، مدلی تئوری به‌منظور بررسی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری بر اساس اندازه سلولی و چگالی فوم که جزء مهم‌ترین خواص ساختاری این مواد بوده و به سادگی قابل اندازه‌گیری است، ارائه شد. در قیاس با نتایج تجربی مشخص شد که این مدل با دقت و اعتبار کافی، ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری را پیش‌بینی کرده و در این راستا به‌منظور بررسی گسترده خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری، از آن بهره گرفته شده است. به‌منظور دست‌یابی به کمترین مقدار ضریب هدایت حرارتی، یک مقدار بهینه برای چگالی فوم وجود دارد که با کاهش اندازه سلولی، این مقدار بهینه کاهش می‌یابد. در چگالی‌های پایین، ضریب تشعشعی و در چگالی‌های بالا، ضریب جامد سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی کل خواهند شد. مطابق نتایج، ضریب گاز در بین مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در فوم‌های پلیمری، بیشترین سهم را در ضریب هدایت حرارتی کل دارد. ضریب گاز، متأثر از چگالی فوم نبوده ولی با کاهش اندازه سلولی به ابعاد نانومتری و متأثر شدن پیوستاری فاز گاز و فعال‌شدن اثر نادرین، به شدت کاهش می‌یابد و باعث کاهش ضریب هدایت حرارتی کل خواهد شد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از تمامی دوستان و همکارانی که در آماده‌سازی این مقاله به هر نحوی تاثیرگذار بوده‌اند، ابراز می‌دارند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که این مقاله حاصل دستاوردهای پژوهشی ایشان بوده و این مقاله یا بخشی از آن در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که هیچ گونه تعارض منافعی بین هر یک از عوامل مشارکت‌کننده در تولید این مقاله (حامیان مالی، پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

سهم نویسندگان: زرگار حسن‌زاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۰٪)، طاهر ازدست (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)، علی دنیوی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۲۰٪)، محمد مهدی درویشی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Yazdanpanah H, Farshidianfar A, Ahmadpour A, Faezian A, Mokhtari F. Production method and analysis of the acoustic and mechanical properties of soft polyurethane foam reinforced by nano-alumina particles. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(7):261-266. [Persian]

هوا، ۷/۰۰ میکرومتر) برابر شود، مولکول‌های گاز به جای برخورد با یکدیگر که لازمه انجام انتقال حرارت هدایتی از طریق گاز است، به دیواره‌های سلولی برخورد کرده و در نتیجه جلوی انتقال حرارت از طریق فاز گاز گرفته می‌شود^[12]. بنابراین کاهش اندازه سلولی تا ابعاد نانومتری را می‌توان به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش ضریب گاز و متعاقباً ضریب هدایت حرارتی کل معرفی نمود. همان‌طور که نمودار ۷ نشان می‌دهد، در اندازه‌های سلولی بزرگتر از ۵ میکرومتر هرچند که ضریب گاز تقریباً ثابت مانده است ولی ضریب هدایت حرارتی کل افزایش می‌یابد که دلیل آن، افزایش ضریب تشعشعی است (همان‌گونه که در نمودار ۵ نیز نشان داده شد).

البته باید به این نکته توجه داشت که تولید فوم‌های پلیمری با اندازه سلولی به اندازه‌ای کوچک که بتواند اثر نادرین را فعال کند، یک مشکل اساسی دارد. تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که در فوم‌های پلیمری نانوسلولی به دلیل نازک‌بودن دیواره، پارگی‌های شدید سلولی به وقوع پیوسته و با ایجاد ارتباط بین سلول‌ها، پدیده از دست‌رفت گاز باعث پایین آمدن نسبت انبساط و به عبارتی دیگر، افزایش چگالی فوم خواهد شد^[33]. همان‌طور که در نمودار ۳ نشان داده شد، افزایش چگالی سبب بالا رفتن ضریب جامد خواهد شد. گونگ و همکاران^[33]، استفاده از ساختارهای سلولی دوگانه را که شامل یک سری سلول‌های درشت اولیه و یک سری سلول‌های ریز ثانویه بودند، برای غلبه بر این مشکل ارائه دادند. سلول‌های درشت اولیه وظیفه افزایش نسبت انبساط (کاهش چگالی) و متعاقباً کاهش ضریب جامد و سلول‌های ریز ثانویه وظیفه کاهش ضریب گاز از طریق اثر نادرین را برعهده داشتند.

از دیگر راهکارهای غلبه بر این مشکل می‌توان به استفاده از نانوذرات و تولید فوم‌های پلیمری نانوکامپوزیتی اشاره کرد. بصورت مثال وونگ و همکاران^[38] نشان دادند که حضور نانورس‌های جادادنی به دلیل افزایش استحکام مذاب که در پدیده پایداری سلولی مفید است، می‌تواند در فرآیند فوم، مثر ثمر واقع شود که به دلیل جلوگیری از پدیده‌های مخاطره‌انداز پایداری سلولی مانند ادغام سلولی است. به عبارتی دیگر با افزودن چنین نانوذراتی، امکان تولید فوم‌های با اندازه‌های سلولی پایین و نسبت انبساط بالا فراهم می‌شود.

از طرفی دیگر تولید فوم‌های پلیمری با نسبت‌های انبساط بالا به‌منظور کاهش ضریب فاز جامد، باعث افزایش ضریب تشعشعی خواهد شد (نمودار ۳). در نسبت‌های انبساط بالا، ضریب تشعشعی می‌تواند تا ۴۰٪ در ضریب هدایت حرارتی کل مشارکت داشته باشد^[26]. به‌منظور غلبه بر این مشکل گونگ و همکاران^[13]، استفاده از مواد کربنی به ویژه نانولوله‌های کربنی را به‌عنوان راهکاری مفید ارائه دادند. ایشان مشاهده کردند که حضور نانولوله‌های کربنی در درصد‌های پایین، بصورت مؤثری در میرایی تشعشع مشارکت می‌کند ولی با بالا رفتن درصد آن، به دلیل افزایش ضریب جامد، سبب بالا رفتن ضریب هدایت حرارتی کل خواهد شد.

تمامی این مسائل نشان می‌دهد که علی‌رغم تلاش‌های صورت‌گرفته توسط محققین در سالیان اخیر روی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری، این مسئله هنوز با چالش‌های جدی روبرو است که در این زمینه، روش‌های تئوری به‌منظور بررسی این خواص، نقشی اساسی را ایفا می‌کنند. در این میان، ارائه روش‌هایی بر اساس تعداد خواص کمتر که اندازه‌گیری آن‌ها نیز به سهولت امکان‌پذیر باشد، می‌تواند نقش بسزایی در راستای تحقیقات روز

- 18- Schellenberg J, Wallis M. Dependence of thermal properties of expandable polystyrene particle foam on cell size and density. *Journal of Cellular Plastics*. 2010;46(3):209-222.
- 19- Reglero Ruiz JA, Saiz-Arroyo C, Dumon M, Rodríguez-Pérez MA, Gonzalez L. Production, cellular structure and thermal conductivity of microcellular (methyl methacrylate)-(butyl acrylate)-(methyl methacrylate) triblock copolymers. *Polymer International*. 2011;60(1):146-152.
- 20- Arduini-Schuster M, Manara J, Vo C. Experimental characterization and theoretical modeling of the infrared-optical properties and the thermal conductivity of foams. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015;98:156-164.
- 21- Wang G, Zhao J, Wang G, Mark LH, Park CB, Zhao G. Low-density and structure-tunable microcellular PMMA foams with improved thermal-insulation and compressive mechanical properties. *European Polymer Journal*. 2017;95:382-393.
- 22- Zhao J, Zhao Q, Wang L, Wang C, Guo B, Park CB, et al. Development of high thermal insulation and compressive strength BPP foams using mold-opening foam injection molding with in-situ fibrillated PTFE fibers. *European Polymer Journal*. 2018;98:1-10.
- 23- Lu X, Caps R, Fricke J, Alviso CT, Pekala RW. Correlation between structure and thermal conductivity of organic aerogels. *Journal of Non Crystalline Solids*. 1995;188(3):226-234.
- 24- Campo-Arnáiz RA, Rodríguez-Pérez MA, Calvo B, De Saja JA. Extinction coefficient of polyolefin foams. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*. 2005;43(13):1608-1617.
- 25- Placido E, Arduini-Schuster MC, Kuhn J. Thermal properties predictive model for insulating foams. *Infrared Physics & Technology*. 2005;46(3):219-231.
- 26- Kaemmerlen A, Vo C, Asllanaj F, Jeandel G, Baillis D. Radiative properties of extruded polystyrene foams: Predictive model and experimental results. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2010;111(6):865-877.
- 27- Hilyard NC, Cunningham A, editors. *Low density cellular plastics: Physical basis of behaviour*. Dordrecht: Springer Science & Business Media; 2012.
- 28- Wang G, Wang C, Zhao J, Wang G, Park CB, Zhao G. Modelling of thermal transport through a nanocellular polymer foam: Toward the generation of a new superinsulating material. *Nanoscale*. 2017;9(18):5996-6009.
- 29- Ferkl P, Pokorný R, Bobák M, Kosek J. Heat transfer in one-dimensional micro- and nano-cellular foams. *Chemical Engineering Science*. 2013;97:50-58.
- 30- Notario B, Pinto J, Rodríguez-Pérez MA. Towards a new generation of polymeric foams: PMMA nanocellular foams with enhanced physical properties. *Polymer*. 2015;63:116-126.
- 31- Okolieocha C, Raps D, Subramaniam K, Altstädt V. Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004-2015) and future directions - a review. *European Polymer Journal*. 2015;73:500-519.
- 32- Costeux S. CO₂-blown nanocellular foams. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014;131(23):41293.
- 33- Gong P, Wang G, Tran MP, Buahom P, Zhai S, Li G, Park CB. Advanced bimodal polystyrene/multi-walled carbon nanotube nanocomposite foams for thermal insulation. *Carbon*. 2017;120:1-10.
- 34- Kerker M. The scattering of light and other
- 2- Ramezani Kakroodi A, Kazemi Y, Ding WD, Ameli A, Park CB. Poly (lactic acid)-based in situ microfibrillar composites with enhanced crystallization kinetics, mechanical properties, rheological behavior, and foaming ability. *Biomacromolecules*. 2015;16(12):3925-3935.
- 3- Pinto J, Notario B, Verdejo R, Dumon M, Costeux S, Rodríguez-Pérez MA. Molecular confinement of solid and gaseous phases of self-standing bulk nanoporous polymers inducing enhanced and unexpected physical properties. *Polymer*. 2017;113:27-33.
- 4- Ranaweera CK, Ionescu M, Bilic N, Wan X, Kahol PK, Gupta RK. Biobased polyols using thiol-ene chemistry for rigid polyurethane foams with enhanced flame-retardant properties. *Journal of Renewable Materials*. 2017;5 Suppl 1:1-12.
- 5- Xiang A, Li Y, Fu L, Chen Y, Tian H, Varada Rajulu A. Thermal degradation and flame retardant properties of isocyanate-based flexible polyimide foams with different isocyanate indices. *Thermochimica Acta*. 2017;652:160-165.
- 6- Lee RE, Hasanzadeh R, Azdast T. A multi-criteria decision analysis on injection moulding of polymeric microcellular nanocomposite foams containing multi-walled carbon nanotubes. *Plastics Rubber and Composites*. 2017;46(4):155-162.
- 7- Ameli A, Jahani D, Nofar M, Jung PU, Park CB. Development of high void fraction polylactide composite foams using injection molding: Mechanical and thermal insulation properties. *Composites Science and Technology*. 2014;90:88-95.
- 8- Matuana LM, Park CB, Balatinecz JJ. Processing and cell morphology relationships for microcellular foamed PVC/wood-fiber composites. *Polymer Engineering and Science*. 1997;37(7):1137-1147.
- 9- Nofar MR, Park CB. Poly (lactic acid) foaming. *Progress in Polymer Science*. 2014;39(10):1721-1741.
- 10- International Energy Agency. *Key world energy statistics*. Paris: International Energy Agency; 2015.
- 11- National Energy Board. *Canadian energy overview 2014* [Internet]. Calgary: National Energy Board; 2014 [cited 2018 Apr 08]. Available from: <http://bit.ly/2WSYDj3>
- 12- Notario B, Pinto J, Solorzano E, De Saja JA, Dumon M, Rodríguez-Pérez MA. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams. *Polymer*. 2015;56:57-67.
- 13- Gong P, Buahom P, Tran MP, Saniei M, Park CB, Pötschke P. Heat transfer in microcellular polystyrene/multi-walled carbon nanotube nanocomposite foams. *Carbon*. 2015;93:819-829.
- 14- Prociak A, Pielichowski J, Sterzynski T. Thermal diffusivity of rigid polyurethane foams blown with different hydrocarbons. *Polymer Testing*. 2000;19(6):705-712.
- 15- Montzka SA, Butler JH, Elkins JW, Thompson TM, Clarke AD, Lock LT. Present and future trends in the atmospheric burden of ozone-depleting halogens. *Nature*. 1999;398:690-694.
- 16- Forest C, Chaumont P, Cassagnau P, Swoboda B, Sonntag P. Polymer nano-foams for insulating applications prepared from CO₂ foaming. *Progress in Polymer Science*. 2015;41:122-145.
- 17- Alvarez-Lainez M, Rodríguez-Pérez MA, De Saja JA. Thermal conductivity of open-cell polyolefin foams. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*. 2008;46(2):212-221.

Simultaneous decision analysis on the structural and mechanical properties of polymeric microcellular nanocomposites foamed using CO₂. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018;135(14):46098.

38- Wong A, Wijnands SFL, Kuboki T, Park CB. Mechanisms of nanoclay-enhanced plastic foaming processes: Effects of nanoclay intercalation and exfoliation. *Journal of Nanoparticle Research*. 2013;15:1815.

electromagnetic radiation. New York: Elsevier; 2016.

35- Glicksman L, Schuetz M, Sinofsky M. Radiation heat transfer in foam insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1987;30(1):187-197.

36- Tseng CJ, Kuo KT. Thermal radiative properties of phenolic foam insulation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2002;72(4):349-359.

37- Daryadel M, Azdast T, Hasanzadeh R, Molani S.