



Effect of Cell Size and Cell Distribution on Dielectric Constant of Expanded Polystyrene Foam

D.Goudarzi¹, S. M. Hossaini², M. R.Pourhossaini³, M. Razavizadeh⁴, M. Khabiri⁵, S.Dare Khandan⁶

* Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2024/ 07 /12, revised: 2024/09/29 ,Accepted:2024/10/22 , published: 2024/11/06)

Abstract

Polymers have the lowest dielectric constant among materials because they mainly lack magnetic dipole moment, electric non-polar structure, amorphous microstructure and low specific weight (lower molecular density). These properties of polymers have caused them to be highly regarded by the electricity, telecommunication and communication industries. Also, preparing foams from polymer materials is a very effective way to further reduce their dielectric constant. The technology of preparing materials with desired dielectric constants is used in designing and manufacturing telecommunication equipment, including reflectors, Fresnel and Luenberg lenses, etc. The purpose of this article is to investigate the effect of the morphology of expanded polystyrene foams on the dielectric constant, which is the ratio of the displacement current density of electromagnetic waves to the conduction current density of waves in a lossy medium. Expanded polystyrene foam samples with different porosity, cavity wall thickness, average cavity size, and homogeneity and heterogeneity were prepared using an oven, and the structure of cavities, dielectric characteristics of foams were analyzed with scanning electron microscope, vector network analyzer, respectively. and lensed trumpet antenna were investigated using dielectric measurement method in free space method. The effect of the size of the diameter of the holes of polystyrene foams in equal and different densities on the dielectric constant was investigated in this article. The results show that in expanded polystyrene foams, the dielectric constant does not necessarily decrease with the increase in the size of the sponge cavities, but sometimes the dielectric constant increases, so that, with the increase in density, the average size of the sponge cavities increases and the dielectric constant and the loss coefficient It has an increasing trend, but at porosity and density equal to the increase in the average size of the foam cavities, it causes a decrease in the dielectric constant and the loss coefficient. It has also been determined that the dielectric constant and loss coefficient of the homogeneous sample is lower than that of the heterogeneous sample.

Keywords: Dielectric constant, expanded polystyrene, morphology, average cell size, size distribution

Cite this article: D. Goudarzi; S. M. Hossaini; M. R. Pourhossaini; M. Razavizadeh; M. Khabiri; S. Dare Khandan "Effect of Cell Size and Cell Distribution on Dielectric Constant of Expanded Polystyrene Foam," *Applied Electromagnetics* , vol.12 , no.2 , pp.7-15 . DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.2.2>



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: mr_pourhossaini@yahoo.com

علمی - پژوهشی

تأثیر اندازه حفره ها و توزیع اندازه حفره ها بر ثابت دی الکتریک اسفنج پلی استایرن انبساطی

داریوش گودرزی^۱، سید محمد حسینی^۲، محمدرضا پورحسینی^{۳*}، محمود رضوی زاده^۴، محمد خیبری^۵، سجاد دره خندان^۶

۱- دانشجوی دکتری، ۲- کارشناسی ارشد، ۳ و ۴ و ۵- استادیار، ۶- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶)

چکیده

پلیمرها کمترین ثابت دیالکتریک را در بین مواد دارا هستند زیرا بطور عمده فاقد ممان دوقطبی مغناطیسی، ساختار غیرقطبی الکتریکی، ریزساختار بیشکل و وزن مخصوص کم (تراکم مولکولی کمتری) هستند. این خواص پلیمرها باعث شده به شدت مورد توجه صنایع برق، مخابرات و ارتباطات قرار گیرند. همچنین تهیه اسفنج از مواد پلیمری، روشی بسیار مؤثر برای کاهش بیشتر ثابت دیالکتریک آن ها است. فناوری تهیه مواد با ثابت های دی الکتریک دلخواه در طراحی و ساخت تجهیزات مخابراتی از جمله بازتابندهها، لنزهای فرنل و لوئبرگ و غیره کاربرد دارد. هدف این مقاله بررسی تأثیر مورفولوژی اسفنج های پلی استایرن انبساطی بر ثابت دی الکتریک میباشد که نسبت چگالی جریان جابجایی امواج الکترومغناطیس به چگالی جریان هدایتی امواج در محیط تلفدار است. نمونه های اسفنج پلی استایرن انبساطی با میزان تخلخل، ضخامت دیواره حفره ها، میانگین اندازه حفره ها متفاوت و همگنی و ناهمگنی با استفاده از کوره تهیه شد و ساختار حفره ها، مشخصات دی الکتریک اسفنجها به ترتیب با میکروسکوپ الکترونی روبشی، دستگاه تحلیل گر شبکههای برداری و آنتن شیپوری لنزدار با استفاده از روش اندازه گیری دی الکتریک به روش فضای آزاد بررسی شدند. اثر اندازه قطر حفره های اسفنج های پلی استایرن در چگالی های برابر و متفاوت بر ثابت دی الکتریک در این مقاله بررسی شد. نتایج نشان میدهد، در اسفنج های پلی استایرن انبساطی با افزایش اندازه حفره های اسفنج لزوماً ثابت دی الکتریک کاهش نمی یابد، بلکه برخی اوقات ثابت دی الکتریک افزایش می یابد، بدین صورت که، با افزایش چگالی، میانگین اندازه حفره های اسفنج افزایش می یابد و ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف روند افزایشی دارد، اما در تخلخل و چگالی برابر افزایش میانگین اندازه حفره های اسفنج باعث کاهش ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات میشود. همچنین مشخص شده است، ثابت دیالکتریک و ضریب تلفات نمونه همگن از نمونه ناهمگن کمتر است.

کلیدواژه‌ها: ثابت دی الکتریک، پلی استایرن انبساطی، مورفولوژی، میانگین اندازه قطر حفره ها، توزیع اندازه حفره ها.

۱- مقدمه

پائین، مواد جذابی برای استفاده در شبکه‌های ارتباطی با سرعت بالا، مانند دی الکتریک‌های لایه‌ای مورد استفاده در بازتابنده‌ها، آنتن‌ها، عدسی‌های لوئبرگ و فرنل، تجهیزات مختلف مخابراتی و غیره هستند [۱]. اسفنج‌های پلی استایرن به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی نظیر قیمت بسیار کم، خواص مکانیکی مناسب، عایق حرارت بودن [۱]، قابلیت جذب انرژی در مواجهه با ضربه [۲]، خواص دی الکتریک [۳] و جذب امواج [۴] دارای کاربردهای فراوانی در صنایع مختلفی نظیر خودروسازی [۵]، بسته‌بندی [۳، ۶، ۷]، ساختمان‌سازی [۸] و

با توسعه سریع شبکه ارتباطی 5G، مواد پلیمری با ثابت دی الکتریک کمتر از ۲/۵ و ضریب تلفات دی الکتریک کم برای استفاده در دستگاه‌های ارتباطی با سرعت بالا کاربرد پیدا کرده‌اند [۱-۲]. هنگامی که مقدار ثابت دی الکتریک مواد پلیمری به ۱/۵ کاهش یابد، سرعت انتقال سیگنال ۱/۶ برابر افزایش می یابد [۳]. در نتیجه، پلیمرهای با ثابت دی الکتریک

استاد: گودرزی، داریوش، حسینی، سید محمد، پورحسینی، محمدرضا، رضوی زاده، محمود، خیبری، محمد، "تأثیر اندازه حفره‌ها و توزیع اندازه حفره‌ها بر ثابت دی الکتریک....."، الکترو مغناطیس کاربردی، ۱۲ (۲)، ۱۵-۱۴۰۳، <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.2>

مخابرات [۹] هستند.

۱۰۰ میکرومتر به ۳۶۰ میکرومتر ثابت دی‌الکتریک از ۱/۲۵ به ۱/۳۳ در ۱۰۰۰ هرتز افزایش می‌یابد.

خواص مختلف اسفنج‌های پلی‌استایرن به هر دو خواص زمینه پلیمری و ساختار حفره‌ها بستگی دارد. خواص مهمی از قبیل تراکم، اندازه، ضخامت دیواره و همگنی ساختار حفره‌ها و میزان تخلخل برای ارزیابی کیفیت ساختار حفره‌ها اسفنج‌های پلی‌استایرن استفاده می‌شود [۲۰]. در تحقیقی دیگر لیاو و همکاران [۲۱] تأثیر انواع گرافن (بلند و کوتاه و ترکیبی) بر فرآیند اسفنج شدن، ساختار حفره‌ها، ثابت دی‌الکتریک و آستانه نفوذ را در فرآیند اسفنج نانو کامپوزیتی گرافن-پلی‌استایرن با استفاده از دی‌اکسید کربن در دما و فشار مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنان دریافتند، یک درصد حجمی گرافن بیشترین ثابت دی‌الکتریک در اسفنج پلی‌استایرن ایجاد می‌کند. همچنین در این تحقیق مشخص شد، اسفنج‌های تهیه‌شده در شرایط اسفنج سازی ۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰ مگا پاسکال و ۸۰ درجه سانتی‌گراد حباب کوچک‌تر به نمایش می‌گذارند و تراکم حفره‌ها و رسانایی الکتریکی بالاتری را نشان می‌دهند. هدف این مقاله اثر هم‌زمان دو عامل اندازه قطر حفره‌ها و چگالی اسفنج‌های پلی‌استایرن انبساطی بر ثابت دی‌الکتریک آن‌ها است. همچنین تأثیر همگن یا غیر همگن بودن ساختار حفره‌ها اسفنج‌های پلی‌استایرن انبساطی بر ثابت دی‌الکتریک آن‌ها مورد توجه است. در این راستا اسفنج‌های پلی‌استایرن انبساطی با چگالی‌های مختلف یا برابر تهیه و عوامل ساختاری آن‌ها از قبیل میانگین قطر حفره‌ها، همگنی و ناهمگنی توزیع آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی اندازه‌گیری شد. سپس ثابت دی‌الکتریک این اسفنج‌ها مورد نظر ارزیابی و تحلیل قرار گرفت.

۲- روش تحقیق و ابزارها

برای ساخت اسفنج پلی‌استایرن انبساطی از پلی‌استایرن انبساطی نوع HS-321 ساخت پتروشیمی تبریز با چگالی ۰/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب، اندازه دانه بین ۱-۰/۷ میلی‌متر و ۵/۲ درصد وزنی پنتان نرمال استفاده شد. ساخت نمونه‌ها با استفاده از یک قالب فلزی با حجم مشخص و کوره در یک فرآیند دومرحله‌ای انجام شد. ابتدا قالب متناسب با چگالی مدنظر و نسبت ترکیب درصد پلی‌استایرن پیش پف شده پلی‌استایرن پیش پف نشده پر و در کوره در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان ۶۰ دقیقه قرار داده‌شده و در مرحله دوم پس از گذشت ۶۰ دقیقه دمای آن از ۱۰۰ به ۱۱۵ درجه تغییر یافت و در همان دما به مدت ۳۵ دقیقه باقی ماند. سپس قالب از اون خارج و در معرض باد سرد قرار داده شد. جدول ۱ شرایط پردازش و ویژگی نمونه‌های تهیه‌شده را نشان می‌دهد.

در حال حاضر مشخص شده است که تهیه اسفنج از مواد پلیمری، روشی بسیار مؤثر برای کاهش ثابت دی‌الکتریک بیشتر مواد پلیمری است [۱۰-۱۴]. در سال ۲۰۱۹ چن^۱ و همکاران [۱۵] تأثیر غلظت‌های مختلف (۱۰ تا ۴۰ درصد وزنی) نیکل-روی-کبالت فریت (NZCFO) را بر خواص مغناطیس و استحکام فشاری اسفنج پلی‌متاکریلیمید (PMI) بررسی کردند. آنان دریافتند، در فرکانس ۱۲ گیگاهرتز با افزایش میزان نیکل-روی-کبالت فریت (NZCFO) میانگین اندازه حفره‌ها از ۱۷۰ تا ۳۰۰ میکرون افزایش و ثابت دی‌الکتریک از ۲/۷۴ تا ۲/۸۳ افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر برای بررسی رفتار اسفنج‌ها، دینگ^۲ و همکاران [۱۶] نمونه‌هایی از الیاف آهن به‌عنوان لیف رسانا دارای قطر ۱/۸ میکرومتر و طول ۷/۲-۰/۹ میلی‌متر در زمینه ی اسفنج پلی‌یورتان را تهیه کردند که از ایزوسیانات و پلی‌اتر پلی‌هیدریک الکل تهیه‌شده است. سپس به مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی ضریب انعکاس نمونه‌ها در برابر فرکانس پرداختند. آن‌ها دریافتند، هنگامی که نسبت منظر افزایش پیدا می‌کند، ضریب انعکاس از همان فرکانس‌های پائین شروع به افزایش می‌کند و هرچه غلظت الیاف رسانا افزایش پیدا کند، ضریب انعکاس کاهش پیدا می‌کند. همچنین توماسین^۳ و همکاران [۱۷] به بررسی اثر متغیرهای شکل شناسی (اندازه قطر حفره‌ها، چگالی حفره‌ها و ضخامت دیواره) اسفنج میکرو حفره‌ها (PMMA/MWNTs) روی رسانایی الکتریکی در مقدار نانوذره ثابت پرداختند و مقادیر رسانایی الکتریکی را با حالت‌های اسفنج نشده مقایسه نمودند. آنان دریافتند، برای دستیابی به اسفنج‌های مشابه با ثابت دی‌الکتریک کم، اندازه حفره‌ها کوچک، چگالی حفره‌ها بالا و ضخامت دیواره نازک مورد نیاز است. در تحقیقی ژونگلیما^۴ و همکاران [۱۸] خواص مکانیکی و دی‌الکتریک فشاری، دینامیکی و دی‌الکتریک اسفنج‌های پلی‌کربنات میکرو حفره‌ها با توزیع‌های اندازه حفره‌ها همگن یا ناهمگن ساخته‌شده با استفاده از دی‌اکسید کربن فوق بحرانی سازگار با محیط را بررسی کردند. آنان دریافتند، خواص دی‌الکتریک اسفنج‌های میکرو حفره‌ها فقط به تخلخل کل بستگی دارد، اما به توزیع اندازه حفره‌ها یا ریزساختار اسفنج‌ها بستگی ندارد و با افزایش تخلخل، ثابت دی‌الکتریک اسفنج‌های میکرو حفره‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۲۰ لینگ وانگ^۵ و همکاران [۱۹] خواص مکانیکی و دی‌الکتریک اسفنج‌های پلی‌آریلن اتر نیتریل (PEN) مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مشخص شد، با افزایش اندازه حفره‌ها از

¹ Wenjing Chen

² Ding

³ Thomasin

⁴ Junglima

⁵ Ling Wang

۳- محاسبات

چگالی اسفنج مطابق استاندارد ASTM D-۳۵۷۵ محاسبه شد. میزان تخلخل V_{ir} با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. ρ_f چگالی اسفنج و ρ_p چگالی پلیمر است.

$$V_{ir} = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad (1)$$

جدول ۱ ویژگی‌های اسفنج‌های پلی‌استایرن

نمونه	چگالی (gr/cm ³)	مورفولوژی	ضخامت (cm)	درصد تخلخل
EPS-B1-300	0.3	همگن	3	70
EPS-B2-300	0.3	ناهمگن	3	70
EPS-B3-300	0.3	همگن	3	70
EPS-B4-200	0.2	همگن	1	80
EPS-B5-300	0.3	همگن	1	70
EPS-B6-400	0.4	همگن	1	60
EPS-B7-300	0.3	ناهمگن	3	70

(۳) هر چه چگالی یک پلیمر کمتر باشد، ثابت دی‌الکتریک آن کمتر است.

(۴) هر یک پلیمر کمتر شبکه‌ای شود، ثابت دی‌الکتریک آن کمتر است.

(۵) فرآیند اسفنج نمودن پلیمرها باعث کاهش ثابت دی‌الکتریک آن‌ها می‌شود.

(۶) در چگالی برابر، اسفنج‌های با حفره‌های درشت‌تر ثابت دی‌الکتریک کمتری دارد [۲۳].

ارتباط ریاضی ثابت دی‌الکتریک و ساختار ماده مطابق معادله زیر است:

$$\epsilon_{r \text{ total}} = (\epsilon_{r \text{ EPS}} \times Fr_{\text{EPS}}) + (\epsilon_{r \text{ Air}} \times Fr_{\text{Air}}) \quad (6)$$

در این معادله $\epsilon_{r \text{ total}}$ ، $\epsilon_{r \text{ EPS}}$ و $\epsilon_{r \text{ Air}}$ به ترتیب ثابت دی‌الکتریک اسفنج، پلی‌استایرن انبساطی و هوا می‌باشند. همچنین Fr_{EPS} و Fr_{Air} به ترتیب درصد فراوانی هوا و پلی‌استایرن انبساطی می‌باشند.

ادوات اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک شامل یک دستگاه تحلیل‌گر شبکه و آنتن شیبوری لنز دار است. مشخصات دی‌الکتریک نمونه‌ها در آزمایشگاه مجتمع الکترومغناطیس دانشگاه صنعتی مالک اشتر اندازه‌گیری شد. از سیستم اندازه‌گیری متشکل از دو آنتن باند X لنز دار روبری هم مطابق شکل ۱ استفاده شد. نمونه مورد اندازه‌گیری در فاصله کانونی دو آنتن که ۶۰ سانتی‌متر است قرار گرفت و سیستم اندازه‌گیری با استفاده از یک کالیبراسیون دوگانه واسنجی می‌شود. در مرحله اول سیستم تا دهانه آنتن به روش SOLT واسنجی شده و سپس با استفاده از دروازه بنی‌سادی زمانی و روش TRL، مرجع فاز اندازه‌گیری به دو سطح نمونه منتقل می‌شود. همچنین متغیرهای پراکندگی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر شبکه اندازه‌گیری شد. مقادیر بخش حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک و ضریب تلفات نمونه‌ها به وسیله تابع طراحی شده در نرم‌افزار متلب در روش فضای آزاد متفاوت با شیوه محاسبه آن در روش موجبری به دست آمده است [۲۴]. با توجه به ساختار غیر مغناطیسی مولکول اسفنج‌های پلی‌استایرن انبساطی، نفوذپذیری مغناطیسی در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین دلیل، اطلاعات S21 به‌عنوان ورودی اولیه به تابع طراحی شده در محیط متلب آورده شده و از S22 استفاده نشده است. تنها با استفاده از دامنه و فاز S21، مشخصات الکتریکی اسفنج‌ها استخراج شده‌اند. برای به دست آوردن بخش حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک حل معادله (۷) به صورت یکتا کافی است.

میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل XL300 ساخت شرکت Philips هلند، به کمک نرم‌افزار Image-z برای پردازش و بررسی ساختار نمونه‌ها به کار گرفته شد. تعداد حفره‌ها در واحد حجم یا چگالی حفره‌ها، اندازه متوسط حفره‌ها، کسر حجمی حفره‌ها و ضخامت دیواره حفره‌ها از رابطه‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) محاسبه شده است [۲۲].

$$N = \frac{6}{\pi d^3} \left(\frac{\rho_{ps}}{\rho_{foam}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$d = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (3)$$

$$V_f = \frac{\rho_{foam}}{\rho_{ps}} \quad (4)$$

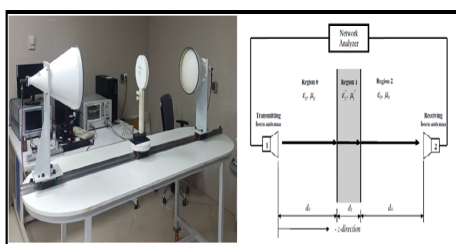
$$\delta = d \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}}} - 1 \right) \quad (5)$$

N ، d و V_f به ترتیب تعداد حفره‌ها در واحد حجم یا چگالی حفره‌ها، اندازه متوسط حفره‌ها و کسر حجمی حفره‌ها است.

نظریه‌های مطرح در مورد ارتباط ثابت دی‌الکتریک با ساختار مولکولی پلیمرها و مشخصه‌های حفره‌ها اسفنج‌های پلیمری موارد ذیل قابل توجه هستند:

(۱) هر چه یک پلیمر دارای گروه‌های عاملی قطبی کمتری باشد، ثابت دی‌الکتریک آن کمتر است.

(۲) هر چه یک پلیمر در دمای پایین‌تری باشد به علت تحرک کمتر گروه‌های عاملی آن ثابت دی‌الکتریک کمتر می‌شود.

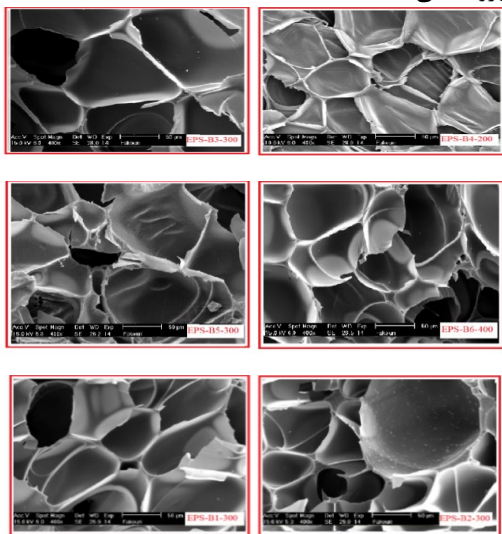


شکل ۱. سیستم اندازه‌گیری مشخصات دی‌الکتریک نمونه‌ها [۲۵]

۴- بحث و نتایج

۴-۱ نتایج میکروسکوپ الکترونی پویشی

در شکل ۲، نتایج آزمون میکروسکوپ پویشی نمونه‌های اسفنج پلی‌استایرن انبساطی نشان داده شده است. برای به دست آوردن تصاویر واضح از حفره‌های اسفنج، ابتدا نمونه‌ها در نیتروژن مایع برای مدت چند ثانیه غوطه‌ور شد و بعد از ترد و شکننده شدن نمونه‌ها توسط انبر شکسته شدند. با انجام این فرآیند همان‌طور که در تصاویر مشخص است حفره‌های اسفنج کاملاً باز و قابل‌رؤیت می‌باشند.



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ پویشی اسفنج‌های پلی‌استایرن با تغییر در فرآیند انتقال حرارت حین تولید، اسفنج‌هایی با ریزساختار متفاوت و چگالی برابر قابل تهیه هستند. برخی اسفنج‌های تولیدی دارای ساختاری همگن بودند و برخی دارای ساختار کنترل‌شده ناهمگن بودند. اسفنج‌های همگن دارای حفره‌ها ریز یا حفره‌ها درشت هستند ولی اسفنج‌های ناهمگن یا دو ساختاری^۱ هم‌زمان دارای حفره‌ها ریز و درشت هستند که ناهمگنی در آن‌ها تدریجی^۲ و هدفمند شکل یافته است. در شکل ۳ تفاوت ساختارها نمایش داده شده است.

استحکام مذاب پلی‌استایرن به دلیل انرژی هم چسبی ماده، زنجیره‌های پلیمر در دانسیته‌های بالاتر تمایل به پیوستگی و ایجاد حباب‌های بزرگ‌تری دارند.

$$|S_{21}^{Theory}(\epsilon, f, d, \dots) - S_{21}^{Measurement}(\epsilon, f, d, \dots)| = 0 \quad (7)$$

برای یک محیط رسانای خطی معادله ماکسول و ارتباط بخش حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک و ضریب تلفات مطابق با روابط ذیل است (رابطه‌های ۸-۱۵).

$$\nabla \times H = \frac{\partial(\epsilon E)}{\partial t} + \sigma E \quad (8)$$

فرم فازی معادله بالا عبارت‌اند از:

$$\nabla \times H = j\omega \epsilon E + \sigma E \quad (9)$$

فرم فازی از جایگزینی دیفرانسیل نسبت به زمان با $j\omega$ به دست می‌آید. همچنین از آنجایی که:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (10)$$

ϵ_r و ϵ_0 به ترتیب گذردهی مطلق و ثابت گذردهی خلأ و گذردهی نسبی یا ثابت دی‌الکتریک هستند.

معادله:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (11)$$

ϵ_r' و ϵ_r'' و ϵ_r به ترتیب جزء حقیقی، جزء موهومی و چگالی جریان الکتریکی هستند. بنابراین:

$$\nabla \times H = j\omega(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')E + \sigma E = \sigma E + \omega \epsilon_r'' E + j\omega \epsilon_r' E \quad (12)$$

در معادله بالا جمله اول و دوم جمله اتلافی و جمله سوم ذخیره‌ای است.

$$\nabla \times H = (\sigma + \omega \epsilon_r'')E + j\omega \epsilon_r' E \quad (13)$$

نسبت جمله اتلاف به ذخیره ضریب تلفات است و به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\tan \delta = \frac{\sigma + \omega \epsilon_r''}{\omega \epsilon_r'} \quad (14)$$

انرژی اتلافی توسط اسفنج جذب می‌شود. بنابراین برای اینکه یک اسفنج امواج را به خوبی عبور دهد و باعث اتلاف آن نشود، باید تا حد امکان $\tan \delta$ آن کوچک باشد. از آنجایی که جمله اتلاف وابسته به فرکانس است، در فرکانس‌های بالا $\omega \epsilon_r'' \gg \sigma$ برقرار است. بنابراین ضریب تلفات مواد دی‌الکتریک با رسانایی پائین برابر است با:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (15)$$

¹ Bimodal

² Gradient

است، ثابت دی الکتریک نمونه‌ها از ۱/۲۱۹ تا ۱/۴۳۰ در تغییر است. با این‌که همه نمونه‌ها از جنس پلی استایرن انبساطی می‌باشند ولی تغییر در تخلخل و توزیع اندازه حفره‌ها و ریزساختار اسفنج‌ها باعث تغییر فراوان در ثابت دی الکتریک آن‌ها شده است. چنانکه انتظار می‌رود، با افزایش چگالی در نمونه‌های EPS-B4-200 و EPS-B5-300 و EPS-B6-400 تخلخل در آن‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش میانگین اندازه قطر حفره‌ها ملاحظه می‌شود که ثابت‌های دی الکتریک و ضرایب تلفات نمونه‌ها افزایش می‌یابد. طبق نتایج به دست آمده با کاهش تخلخل و افزایش چگالی، میانگین اندازه حفره‌ها افزایش می‌یابد. علت بزرگ شدن حفرات در چگالی‌های بالاتر، باینکه هر سه نمونه در دمای برابر پخت شده‌اند بالا رفتن فشار در نمونه‌های با چگالی بیشتر به علت تراکم بیش از حد دانه‌های پلی استایرن انبساطی است و همین امر باعث پارگی دیواره حباب‌ها و رشد آن‌ها شده است [۲۸]. به عبارتی با افزایش اندازه حفره‌ها در اسفنج‌ها ثابت دی الکتریک در فرکانس ۸ گیگاهرتز تا ۱۲ گیگاهرتز در بالغ بر ۷۶۰ فرکانس بررسی شده در آن‌ها افزایش می‌یابد.

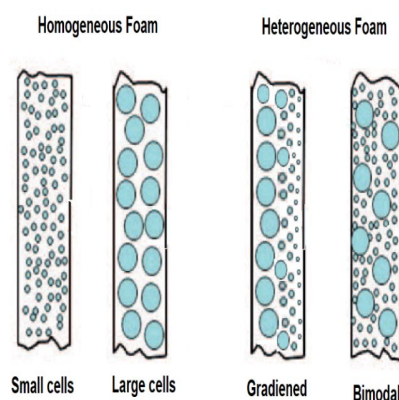
جدول ۳- مشخصات دی الکتریک اسفنج‌های پلی استایرن در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز

نمونه	ضریب اتلاف	ثابت دی الکتریک حقیقی	ثابت دی الکتریک موهومی
EPS-B1-300	0.0184	1.405	0.0258
EPS-B2-300	0.0241	1.430	0.0344
EPS-B3-300	0.0181	1.391	0.0251
EPS-B4-200	0.0020	1.219	0.0024
EPS-B5-300	0.0114	1.327	0.0151
EPS-B6-400	0.0030	1.354	0.0040
EPS-B7-300	0.0067	1.298	0.0087

در شکل ۴ با افزایش میانگین اندازه حفره‌ها از ۶۵ میکرون تا ۸۲ میکرون ثابت دی الکتریک از ۱/۲۱۹ تا ۱/۳۵۴ افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش اندازه حفره‌ها در تخلخل‌های متفاوت ثابت دی الکتریک افزایش می‌یابد و از میزان عبور امواج الکترومغناطیس در اسفنج کاسته می‌شود.

همچنان در شکل ۳ نمایش داده شده است، اسفنج‌های همگن به‌طور هم‌زمان دارای حفره‌ها درشت و حفره‌ها ریز هستند. به عبارت دیگر اسفنج ناهمگن در چگالی برابر با اسفنج همگن دارای دو نوع حفره ریز و درشت است که در عرض نمونه‌های اسفنج ناهمگن اندازه حفره‌ها ریز صورت تدریجی و هدفمند به حفره‌ها درشت‌تر تغییر می‌نماید.

طبق نتایج به دست آمده با کاهش تخلخل و افزایش چگالی، میانگین اندازه قطر حفره‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۳ انواع ساختار اسفنج‌های همگن و ناهمگن [۲۶]

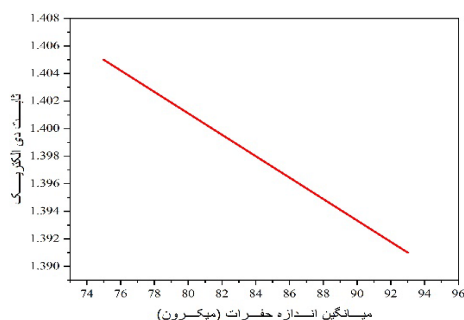
نتایج در جدول ۲ به خوبی نشان می‌دهد، با افزایش تخلخل از ۶۰ به ۸۰ میانگین اندازه قطر حفره‌ها، حدود ۱۷ میکرون حدود ۲۵٪ کاهش می‌یابد.

جدول ۲. نتایج آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اسفنج‌های پلی استایرن

نمونه	میانگین اندازه حفره‌ها (μm)	تراکم حفره‌ها (Cell/cm ³)	درصد تخلخل	ضخامت دیواره سلولی (μm)
EPS-B1-300	75	1.69×10^{12}	70	14.64
EPS-B2-300	77	1.52×10^{12}	70	15.03
EPS-B3-300	93	8.76×10^7	70	18.15
EPS-B4-200	65	2.91×10^{10}	80	07.67
EPS-B5-300	76	1.57×10^{12}	70	14.96
EPS-B6-400	82	1.08×10^{12}	60	23.86
EPS-B7-300	91	6.59×10^7	70	35.62

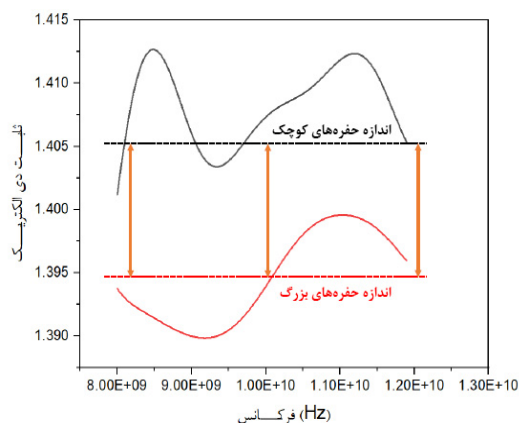
۴-۲- خواص دی الکتریک

در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون اندازه‌گیری مشخصات دی الکتریک نمونه‌های اسفنج پلی استایرن انبساطی در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده



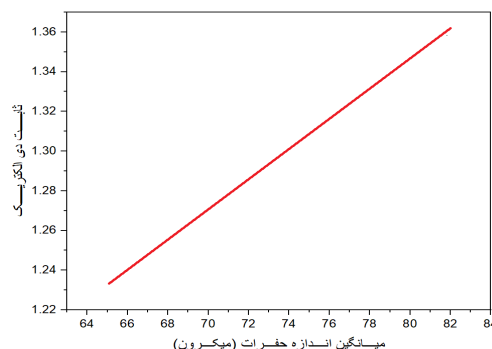
شکل ۶. ارتباط ثابت دی الکتریک میانگین اندازه حفره‌های حفره‌ها در چگالی‌های برابر

در این آزمایش مطابق شکل ۷ مشخص شد که برعکس نمونه‌های با چگالی متفاوت در نمونه‌های با چگالی برابر با درشت‌تر شدن اندازه حفره‌های اسفنج ثابت دی الکتریک کاهش می‌یابد.



شکل ۷. ارتباط ثابت دی الکتریک با میانگین اندازه حفره‌های در اسفنج‌های پلی استایرن با چگالی برابر

در بررسی نمونه EPS-B1-300 و EPS-B3-300 که ساختار همگن و تخلخل یکسانی دارند، ثابت دی الکتریک از ۱/۴۰۵ به ۱/۳۹۱ کاهش و ضریب اتلاف از ۰/۰۱۸۴ به ۰/۰۱۸۱ کاهش می‌یابد. این روند کاهشی به خوبی نشان می‌دهد در تخلخل برابر و همگنی ساختار حفره‌ها با افزایش میانگین قطر حفره‌ها، ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف کاهش می‌یابد. با توجه به این نکته مشخص است، میانگین قطر حفره‌ها در تخلخل کل برابر تأثیری ۱ درصدی بر ثابت دی الکتریک و تأثیر ۱/۶ درصدی بر ضریب اتلاف دارد. این روند تأثیر میزان درصد هوا در اسفنج را با بزرگ-تر شدن اندازه حفره‌ها همراه با کاهش ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف را نشان می‌دهد. در شکل ۸ به صورت شماتیک علت افزایش ثابت دی الکتریک به کاهش اندازه حفره‌ها بیان شده است. در این تئوری با کاهش اندازه حفره‌ها، امواج الکترومغناطیس باید از تعداد بیشتری حفره عبور نماید. اگر حفره‌ها در قالب منظم‌تری به تصویر کشیده شود امواج برای عبور باید از تعداد بیشتری لایه دی الکتریک عبور نماید.

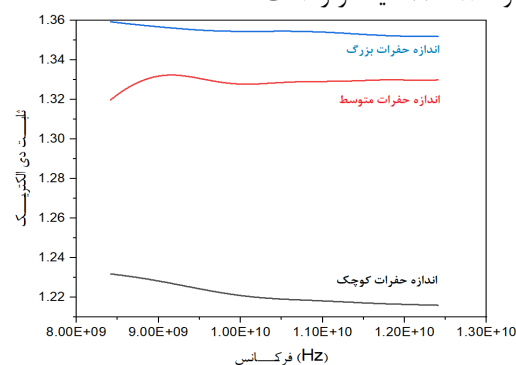


شکل ۴. ارتباط ثابت دی الکتریک میانگین اندازه حفره‌های حفره‌ها در چگالی‌های متفاوت

با مقایسه ثابت‌های دی الکتریک نمونه‌های EPS-B4-200، EPS-B5-300 و EPS-B6-400 که تخلخل آن‌ها به ترتیب کاهش یافته و چگالی آن‌ها افزایش می‌یابد.

در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز و بررسی حدود ۷۶۰ فرکانس در این ناحیه مشخص شد؛ که با افزایش اندازه حفره‌ها در تمام فرکانس‌های بررسی شده ثابت دی الکتریک افزایش می‌یابد. نمونه مورد اندازه‌گیری به روش فضای آزاد مورد آزمایش قرار گرفتند و متغیرهای پراکندگی نمونه با استفاده از دستگاه تحلیل گر شبکه‌ای اندازه‌گیری شدند.

مقادیر بخش حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات نمونه‌ها به وسیله تابع طراحی شده در نرم افزار متلب برای تعیین مقادیر مذکور از متغیرهای پراکندگی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه تحلیل گر شبکه‌ای به دست آمدند. نمودار شکل ۵ حاصل پردازش ثوابت دی الکتریک اسفنج‌های پلی استایرن در محدوده ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز است.



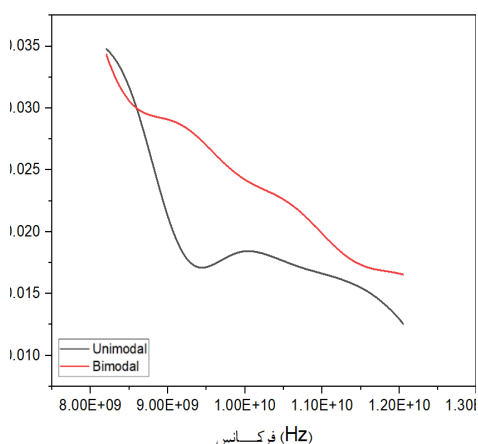
شکل ۵. ارتباط ثابت دی الکتریک با فرکانس برای سه نمونه با اندازه حفره‌های متفاوت

در آزمایشی دیگر که بین دو نمونه اسفنج EPS-B1-300 و EPS-B3-300 که دارای تخلخل برابر ولی اندازه میانگین اندازه حفره‌ها آن‌ها متفاوت است انجام شد، مشخص شد که درحالی که نمونه‌ها دارای چگالی برابر هستند ولی میانگین قطر حفره‌ها، اندازه حفره‌های نمونه EPS-B3-300 بیشتر از نمونه EPS-B1-300 است.

با افزایش ضخامت دیواره سلولی قطبش بین سطحی مکانیسم غالب است و در بازتاب‌های چندگانه کمتر می‌شود.

300 مشخص شده است که در بررسی فرکانس ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز ضریب تلفات نمونه همگن در اکثر محدوده فرکانسی کمتر از نمونه ناهمگن است. نمودار ۱۱ ارتباط ضریب تلفات با فرکانس را در نمونه های همگن و ناهمگن نشان می دهد.

در برخورد با ماده همگن موج مسیر مستقیم تر و کوتاه تری را طی کرده و کمتر دچار بازتاب چندگانه می شود ولی در ماده ناهمگن به دلیل نوسانات اندازه قطر حفره ها موج مسیر طولانی تر و شکسته تری را طی نموده و دچار بازتاب و اتلاف بیشتری می شود. رفتار اتلاfi اسفنج ناهمگن در شکل ۱۱ به خوبی نمایش داده شده است.

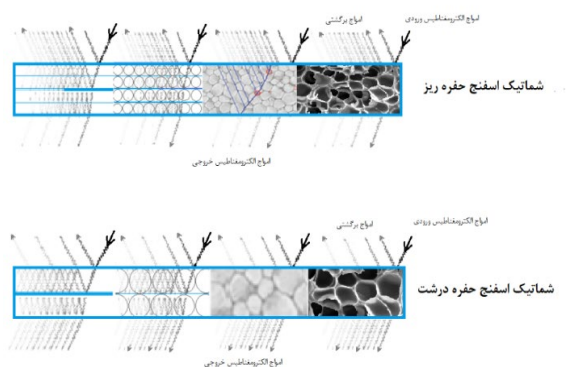


شکل ۱۱. ارتباط ضریب تلفات با فرکانس در نمونه های همگن و ناهمگن

همان طور که مشخص است، ثابت دی الکتریک و ضریب تلفات نمونه همگن از نمونه ناهمگن کمتر است.

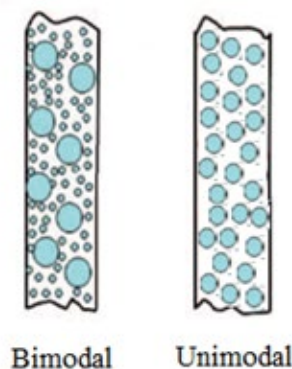
۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، نقش اندازه حفره ها و توزیع اندازه آن ها بر خواص دی الکتریک اسفنج های پلی استایرن انبساطی ارزیابی شده است. بدین منظور نمونه های اسفنج پلی استایرن انبساطی با میزان تخلخل، ضخامت، میانگین اندازه حفره های متفاوت، همگنی و ناهمگنی با استفاده از کوره برنامه پذیر تهیه و ساختار حفره ها، مشخصات الکترومغناطیسی اسفنج ها به ترتیب با میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون مشخصات دی الکتریک بررسی شدند. نتایج نشان می دهد، در اسفنج های پلی استایرن انبساطی با افزایش اندازه حفره های اسفنج لزوماً ثابت دی الکتریک کاهش نمی یابد، بلکه برخی اوقات ثابت دی الکتریک افزایش می یابد، بدین صورت که، با افزایش چگالی، میانگین اندازه حفره های اسفنج افزایش می یابد و ثابت دی الکتریک و ضریب



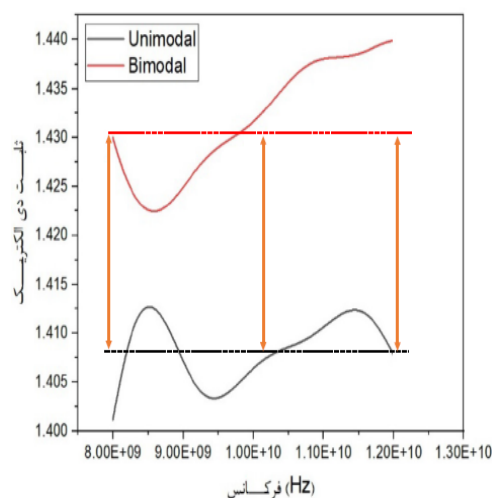
شکل ۸. اثر اندازه حفره ها بر عبور امواج الکترومغناطیسی [۲۷]

با مقایسه نمونه EPS-B1-300 با ساختار همگن و EPS-B2-300 با ساختار ناهمگن (مشابه شکل ۹) مشخص شده است که در محدوده فرکانسی ۸ تا ۱۲ گیگاهرتز، ثابت دی الکتریک نمونه همگن در تمام محدوده فرکانسی کمتر از نمونه ناهمگن است.



شکل ۹. انواع ساختار اسفنج های همگن و ناهمگن [۲۶]

شکل ۱۰ ارتباط ثابت دی الکتریک با فرکانس را در نمونه های همگن و ناهمگن نشان می دهد.



شکل ۱۰. ارتباط ثابت دی الکتریک با فرکانس در اسفنج های همگن و ناهمگن

همچنین در آزمایش مقایسه نمونه EPS-B1-300 و EPS-B2-

4875-4878, 2013.

[12] Wang, Lingling, et al. "Low dielectric constant polymers for high speed communication network," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 34,138-148, 2020.

[13] Mateusz Barczewski, Czesław Kozakiewicz, Izabella Krucińska. "The effect of foam morphology on dielectric properties of closed-cell foams based on high-density polyethylene," *Polymer Testing*, 89,231-245, 2020.

[14] Yuqi Zhang, Yaoyao Yang, Yongji Xu, Kejian Chen "Low-Dielectric Constant Foam Materials through Polymer Blends," *Journal of Applied Polymer Science*, 49,321-420, 2020.

[15] Chen, Wenjing, et al. "Electromagnetic and microwave absorption performance of Ni 0.4 Zn 0.4 Co 0.2 Fe 2 O 4/polymethacrylimide foam synthesized via polymerization," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30,16991-17002., 2019.

[16] J. Ding, R. Gong, L. Liu, L. Chang, X. Guo, and R. Yang. "The electromagnetic properties of conducting fiber-foam composite," in *World Automation Congress*, 78, 1-5, 2008.

[17] T. Kuang, L. Chang, F. Chen, Y. Sheng, D. Fu, and X. Peng. "Facile preparation of lightweight high-strength biodegradable polymer/multi-walled carbon nanotubes nanocomposite foams for electromagnetic interference shielding," *Carbon*, 105, 305-313, 2016.

[18] Ma, Zhonglei, et al. "Mechanical and dielectric properties of microcellular polycarbonate foams with unimodal or bimodal cell-size distributions," *Journal of Cellular Plastics*, 51, 307-327, 2015.

[19] Wang, Lingling, et al. "Ultralow dielectric constant polyarylene ether nitrile foam with excellent mechanical properties," *Chemical Engineering Journal*, 384, 123-231, 2020.

[20] Azdast, T., and R. Hasanzadeh. "A review on principles and fundamentals of fabrication of polymeric foams in regards to increasing cell density/reducing cell size," *Modares Mechanical Engineering*, 19, 211-222, 2019.

[21] Xiao, Wei, et al. "Strategy to enhance conductivity of polystyrene/graphene composite foams via supercritical carbon dioxide foaming process," *The Journal of Supercritical Fluids*, 142, 52-63, 2018.

[22] Okolieocha, Chimezie, Daniel Raps, Kalaivani Subramaniam, and Volker Altstädt. "Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004–2015) and future directions—A review," *European Polymer Journal*, 73,500-519, 2015.

[23] Ahmad, Zulkifli. "Polymer dielectric materials," *In Dielectric material*. IntechOpen, 12,60-85, 2012.

[24] Trabelsi, S., Kraszewski, A. W., & Nelson, S. O. "Phase-shift ambiguity in microwave dielectric properties measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*," 49(1), 56-60, 2000.

[25] Büyüköztürk, O., Yu, T. Y., & Ortega, J. A. "A methodology for determining complex permittivity of construction materials based on transmission-only coherent, wide-bandwidth free-space measurements," *Cement and Concrete Composites*, 28(4), 349-359, 2006.

اتلاف روند افزایشی دارد، اما در تخلخل و چگالی برابر افزایش میانگین اندازه حفره‌های اسفنج باعث کاهش ثابت دی‌الکتریک و ضریب تلفات می‌شود. همچنین مشخص شده است، ثابت دی‌الکتریک و ضریب تلفات نمونه همگن از نمونه ناهمگن کمتر است. این تحقیق به طراحی و ساخت مواد با ثابت‌های دی‌الکتریک تعیین شده و دلخواه کمک می‌کند و فناوری تهیه مواد کامپوزیتی با پایه پلی‌استایرن انبساطی با ثابت‌های دی‌الکتریک دلخواه، و کنترل عوامل مؤثر بر ثابت دی‌الکتریک، طراحی و ساخت تجهیزات مخابراتی از جمله بردهای راجرز، آنتن‌ها، رفلکتورها، عدسی‌های فرنل، لوئبرگ و غیره کاربرد دارد.

۶- مراجع

[1] Schellenberg, Jürgen, and Mario Wallis. "Dependence of thermal properties of expandable polystyrene particle foam on cell size and density," *Journal of Cellular Plastics*, 46, 209-222, 2012.

[2] Beverte, Ilze. "Deformation of polypropylene foam Neopolen P in compression," *Journal of cellular plastics*, 40, 191-204, 2004.

[3] Rodriguez-Sanchez, Alejandro E., et al. "Numerical analysis of energy absorption in expanded polystyrene foams," *Journal of Cellular Plastics*, 56, 411-431, 2020.

[4] Wang, Gehuan, et al. "Integrated multifunctional macrostructures for electromagnetic wave absorption and shielding," *Journal of Materials Chemistry A*, 46, 24368-24387, 2020.

[5] Raps, Daniel, et al. "Past and present developments in polymer bead foams and bead foaming technology," *Polymer*, 56, 5-19, 2015.

[6] Turner, Andrew. "Foamed polystyrene in the marine environment: sources, additives, transport, behavior, and impacts," *Environmental Science & Technology*, 54, 10411-10420, 2020.

[7] Block, C., B. Brands, and T. Gude. "Packaging Materials 2. Polystyrene for Food Packaging Applications—Updated Version," *International Life Sciences Institute*, 13,321-336, 2017.

[8] Ramli Sulong, Nor Hafizah, Siti Aisyah Syaerah Mustapa, and Muhammad Khairi Abdul Rashid, "Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review," *Journal of Applied Polymer Science*, 136, 475-495, 2017.

[9] Bezborodov, V. I., et al. "Differential phase sections based on form birefringence in the terahertz frequency range," *Telecommunications and Radio Engineering*, 74,43-59, 2015.

[10] X. Lei, L. Tong, H. Pan, G. Yang, X. Liu. "Preparation of polyarylene ether nitriles/fullerene composites with low dielectric constant by cosolvent evaporation," *J. Mater. Sci. Mater. Electron*, 30, 18297-18305, 2019.

[11] C. Yuan, K. Jin, K. Li, S. Diao, J. Tong, Q. Fang. "Non-porous low-k dielectric films based on a new structural amorphous fluoropolymer," *Adv. Mater*, 25,

Clinical and Experimental Dentistry, 10(8), e794, 2018.

[28] Moeini, M.H, Navid Famili, M.H, Kayvan Forooraghi, K., Soltani Alkough, M., & Mokhtari Motameni Shirvan, M. " Production of Polystyrene Open-celled Microcellular Foam in Batch Process by Super Critical CO₂," V23, 3(3), Pages 223-234, 2010.

[26] Bao, J. B., Weng, G. S., Zhao, L., Liu, Z. F., & Chen, Z. R."Tensile and impact behavior of polystyrene microcellular foams with bi-modal cell morphology," Journal of Cellular Plastics, 50(4), 381-393, 2014.

[27] Juntavee, N., & Attashu, S. "Effect of sintering process on color parameters of nano-sized yttria partially stabilized tetragonal monolithic zirconia," Journal of
