

Polymerization
Quarterly, 2018
Volume 8, Number 1
Pages 90-100
ISSN: 2252-0449

Flexible Acoustic Polyurethane Foam: An Overview of Physical Structure and Chemical Properties

Sahar Abdollahi Baghban and Manouchehr Khorasani*

Polymer Engineering and Color Technology Department,
Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 12 August 2017, Accepted: 14 November 2017

Abstract

Noise is one of the most disturbing environmental problems of today's societies, and this problem becomes more serious with increasing traffic volumes and rapid expansion of industries. One of the ways to solve this problem is to increase the sound absorption coefficient of porous structure materials used as acoustic absorbers. Over the past decade, flexible polyurethane foam has been recognized in the acoustic absorbing industry as efficient materials due to its effective damping power, low density, high formability and easy production. The most important feature of flexible polyurethane foams is the presence of open porosity cavities, which not only control the mechanical properties of foam, but also their sound insulation properties. The purpose of this study is to review the applications, the development of polyurethane foam, the chemical and physical structure and the factors affecting the properties of foams due to their acoustic absorption and mechanical energy loss of sound waves. Considering the role of polyurethane foam as sound insulation, the focus of this study will be on the behavior of polyurethane foam as sound insulation, so some physical concepts related to sound will also be expressed.

Key Words

flexible polyurethane foam,
acoustic absorber,
urea-urethane segmented
copolymer,
microphase separation,
sound absorption coefficient

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: khorasani.m@aut.ac.ir

اسفنج‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر جاذب صوت: مروری بر ساختار فیزیکی و خواص شیمیایی

بسپارش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال هشتم، شماره ۱،

صفحه ۹۰-۱۰۰، ۱۳۹۷

ISSN: 2252-0449

سحر عبداللہی باغبان، منوچهر خراسانی*

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۳۹۶/۵/۲۱، پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۲۳

آلودگی صوتی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی جوامع امروزی است. این مشکل با افزایش حجم تردد وسایل نقلیه و گسترش سریع صنایع، روزبه‌روز جدی‌تر می‌شود. از روش‌های حل این مشکل افزایش ضریب جذب صوت با افزایش ظرفیت اتلاف و بهینه‌سازی ساختارهای متخلخل استفاده شده به‌عنوان جاذب‌های صوت است. طی دهه گذشته، اسفنج‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر به‌دلیل قدرت میرایی موثر، چگالی کم، شکل‌پذیری زیاد و تولید آسان به‌عنوان موادی کارآمد، در صنعت جاذب‌های صوتی شناخته شده‌اند. مهم‌ترین خاصیت اسفنج‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر، داشتن حفره‌هایی با تخلخل باز به‌هم‌پیوسته است که نه‌تنها خواص مکانیکی اسفنج را تحت کنترل دارد، بلکه موجب عایق صوت بودن آن‌ها نیز می‌شود. در این مقاله، کاربردها، روند توسعه اسفنج پلی‌یورتان، ساختار شیمیایی و فیزیکی و عوامل موثر بر ویژگی‌های این اسفنج‌ها برای بررسی خاصیت جذب صوت و اتلاف انرژی مکانیکی امواج صوتی مرور می‌شود. با توجه به نقش موثر اسفنج‌های پلی‌یورتان به‌عنوان عایق‌های صوتی، تمرکز این مقاله بر رفتار این اسفنج به‌عنوان عایق صوتی است، ازاین‌رو برخی مفاهیم فیزیکی در ارتباط با صدا و مروری بر مطالعات انجام‌شده در این حوزه نیز ارائه می‌شود.

چکیده



سحر عبداللہی باغبان



منوچهر خراسانی

واژگان کلیدی

اسفنج پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر،
جاذب صوت،
کوپلیمِر قطعه‌ای اوره-یورتان،
جدایش میکرو فاز،
ضریب جذب صوت

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

khorasani.m@aut.ac.ir

مقدمه

اسفنج‌های پلیمری زیرمجموعه جامدهای سلولی هستند و جزء پرکاربردترین اسفنج‌ها محسوب می‌شوند [۱]. ویژگی‌های منحصر به فرد اسفنج‌های پلی‌یورتان سبب شده‌اند که مقدار تولید و مصرف آن‌ها نسبت به سایر مواد پلیمری بیشتر باشد. برخی مزایای استفاده از اسفنج‌های پلی‌یورتان شامل داشتن قابلیت سبک‌سازی سازه‌ها به علت چگالی بسیار کم، قابلیت ارائه فرمول‌بندی متنوع با توجه به کاربرد مورد نیاز (به دلیل تنوع مواد اولیه)، طول عمر و ماندگاری نسبتاً زیاد، خواص مکانیکی عالی با خاصیت کشسانی نظیر استحکام کششی زیاد، قابلیت اعمال مستقیم روی تمام سطوح از جمله آسفالت، کاشی، بتن، فلز، پلاستیک و چوب، پخت سریع، آسان و کامل در دمای محیط، قابلیت تزریق و قالب‌گیری، برش و شکل‌گیری به انواع و اشکال مختلف و قابلیت بازیافت اسفنج‌های پلی‌یورتان و بازاستفاده آن‌هاست. از این رو، یکی از بهترین مواد در تهیه عایق‌های صوت، گرما و سرما به‌شمار می‌روند [۲، ۳].

ترکیب شیمیایی، واکنش‌های شیمیایی و ساختار فیزیکی اسفنج پلی‌یورتان

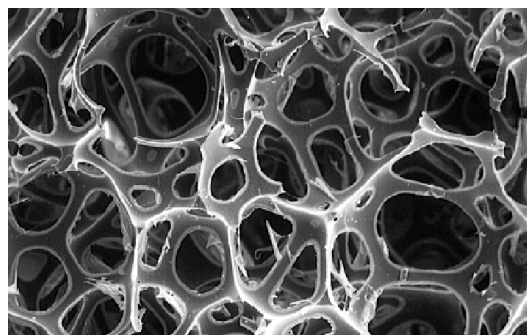
به‌طور کلی، اسفنج‌های پلی‌یورتان از دو جزء رزین و ایزوسیانات تشکیل می‌شوند. بخش رزین حاوی پلی‌ال، رنگ‌دانه، پرکننده و مواد افزودنی مانند کاتالیزگر، عامل‌های پف‌زا، شبکه‌ای‌کننده، فعال سطحی، زنجیرافزا، بازدارنده اشتعال، پایدارکننده فرابنفش شامل رنگ‌دهنده، سلول بازکن (cell opener)، عامل ضدالکتریسته ساکن، ترکیبات ضدباکتری و غیره است [۴-۱]. تشکیل اسفنج پلی‌یورتان از مواد سازنده آن پدیده فیزیکی-شیمیایی است [۵]. به دلیل گرمایی واکنش‌های شیمیایی، دمای مخلوط واکنش حدود 75°C تا 150°C است که طی زمان اندکی چگالی این مواد از 1000 kgm^{-3} تا 30 kgm^{-3} تغییر می‌کند. به عبارتی اسفنج نهایی، حجمی در حدود ۳۳ مرتبه بزرگ‌تر از مواد اولیه دارد.

به‌طور کلی، اسفنج‌های پلی‌یورتان براساس نوع مواد شرکت‌کننده در محیط و جهت‌گیری واکنش‌ها به سمت واکنش ژل شدن (واکنش شیمیایی برای ایجاد دیواره سلول) یا انبساط (واکنش فیزیکی برای ایجاد دیواره سلول)، به دو شکل انعطاف‌پذیر و سخت تهیه می‌شوند. در کل، اسفنج پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر ساختار سلول‌باز و اسفنج سخت، ساختار سلول‌بسته دارد. در اسفنج سلول‌بسته، سلول‌ها کاملاً از یکدیگر جدا بوده و نفوذپذیری کمتری دارند. از این رو، عایق گرمایی مناسب‌تری هستند. درحالی‌که در اسفنج‌های سلول‌باز، سلول‌ها به یکدیگر متصل‌اند (شکل ۱) [۵]. براساس

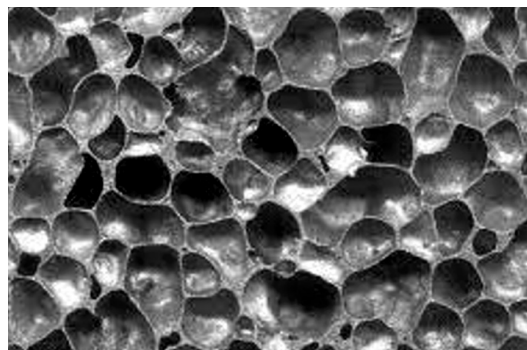
مطالعات، سلول‌ها به‌طور کلی به‌شکل دوازده‌وجهی‌های پنج‌ضلعی هستند. همچنین، تعدادی وجوه چهارضلعی و شش‌ضلعی نیز دیده می‌شود. شکل و اندازه سلول‌ها در اسفنج‌های پلی‌یورتانی که با افشانه اعمال می‌شوند، در جهت رشد و عمود بر آن، متفاوت است. به دلیل فشار زیاد درون سلول‌ها، زه‌کشی سلولی رخ می‌دهد و دیواره سلول به‌مراتب نازک‌تر می‌شود [۶].

بررسی شکل‌شناسی اسفنج پلی‌یورتان

خواص فیزیکی اسفنج، هم به ساختار سلولی و هم به شکل‌شناسی و ساختار شیمیایی آن وابسته است. دما و کاتالیزگر به‌شدت بر سرعت واکنش موثرند. سرعت و جهت‌دهی کاتالیزگرها به سمت نوع واکنش‌های مختلف بر شکل‌شناسی سلول‌ها بسیار اثرگذار است. با پیشرفت واکنش‌ها، طول زنجیر (درجه پلیمرشدن) افزایش می‌یابد و از واکنش دی‌ایزوسیانات‌ها با زنجیرافزاهای دی‌الی، دی‌آمین و همچنین آمین‌های حاصل از واکنش انبساط، عموماً گروه‌های یورتان، اوره و یورتان-اوره و در نهایت کوپلیمر دسته‌ای قطعه‌ای شده (یورتان-گروه عاملی اوره) از نوع $(\text{H}_m\text{S})_n$ - تشکیل می‌شود [۷]. مطابق با شکل ۲ در دمای محیط، قطعه‌های نرم به‌عنوان فنرهای الاستومری و قطعه‌های سخت به‌عنوان

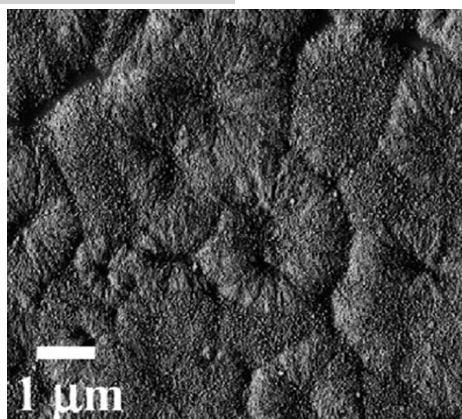


(الف)

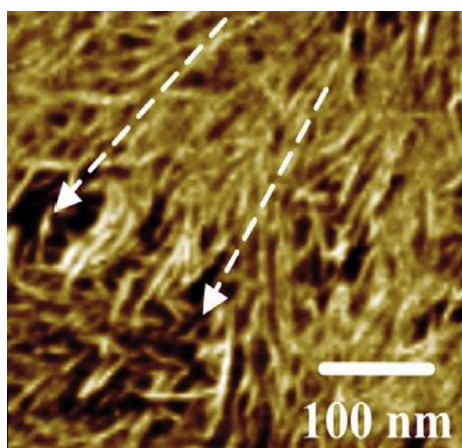


(ب)

شکل ۱- تصویر SEM از ساختار اسفنج پلی‌یورتان: (الف) سلول‌بسته و (ب) سلول‌باز [۵].



(الف)



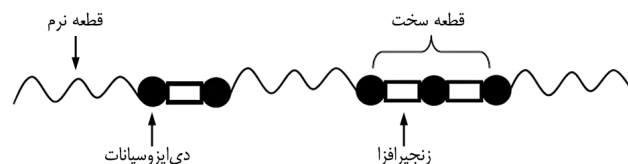
(ب)

شکل ۳- تصویر AFM: (الف) ابرساختارهای کروی گروه عاملی اوره و (ب) جهت‌گیری نواحی سخت غوطه‌ور در قطعه‌های نرم [۱۶].

مماس بر کره دارند. این ساختارهای کروی به انبوه‌های اوره یا گویچه‌های اوره نیز معروف‌اند که قطری معادل $5000\text{--}2000\text{ \AA}$ دارند. فاصله بین محدوده‌های سخت در حدود $120\text{--}80\text{ \AA}$ و در برخی مراجع $125\text{--}65\text{ \AA}$ است [۱۵]. طول محدوده‌های سخت معادل $60\text{--}30\text{ \AA}$ و در برخی مراجع $50\text{--}20\text{ \AA}$ گزارش شده است و این قطعه‌های سخت معمولاً ۴-۶ واحد تکرارشونده دارند [۱۶]. به دلیل تمایل این ترکیبات به کمینه‌کردن حجم قطعه سخت، این ابرساختارهای گویچه‌ای خاصیت تغییر شکل بازگشت‌پذیر نشان می‌دهند.

آشنایی با مفاهیم فیزیکی صوت

صدا نوعی انرژی مکانیکی (انرژی آکوستیک) است و هنگامی به وجود می‌آید که ذرات حول مرکز تعادل خود نوسان کنند. امواج صوتی به شکل جبهه‌های موج در محیط منتشر می‌شوند. جبهه



شکل ۲- نمایی از کوپلیمر پلی‌یورتان-گروه عاملی اوره قطعه‌ای شده [۸].

واحدهای سخت کوتاه شناخته می‌شوند [۸]. در کوپلیمر دسته‌ای یا قطعه‌ای، به دلیل امتزاج‌ناپذیری ذاتی، دسته‌ها و قطعه‌های مختلف به تفکیک فازها تمایل دارند [۹]. در چنین مواردی که ناسازگاری از نظر ترمودینامیکی زیاد است و پیوند کووالانسی بین دسته‌های کوپلیمر وجود دارد، از جدایش ماکروفازی جلوگیری می‌شود. ولی در کوپلیمرهای دسته‌ای یا قطعه‌ای شده شکل‌شناسی جدایش میکروفاز به وجود می‌آید.

Rossmly پیشنهاد کرد، وجود فازهای غنی از گروه عاملی اوره به بازشدن سلول در اسفنج انعطاف‌پذیر کمک می‌کند [۱۰]. خواص سطحی و توده اسفنج پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر به طور مستقیم به شکل‌شناسی فاز میکرو و به تعبیر جدیدتر شکل‌شناسی نانوفازها یا نانوساختار وابسته است [۱۱]. این شکل‌شناسی خود به عواملی نظیر فرایند پلیمرشدن (تک‌مرحله‌ای، پیش‌پلیمرشدن و دومرحله‌ای) و شرایط واکنش، ساختار شیمیایی مواد استفاده‌شده، تقارن ساختاری، وزن مولکولی، متوسط طول زنجیر و توزیع طول قطعه سخت درون کوپلیمر [۱۲]، پارامتر انحلال‌پذیری، تقارن ایزوسیانات مصرفی، مقدار و ماهیت برهم‌کنش‌های رقابتی بین مولکولی مثل پیوند هیدروژنی میان قطعه‌های سخت-سخت و سخت-نرم موثر بر بلورینگی [۱۳]، نوع و ساختار زنجیرافزاها و غیره وابسته است [۱۴]. اگر قطعه سخت تقارن مناسب را داشته باشد، به طوری که امکان بلورینگی در آن وجود داشته باشد، مقدار بیشتری از ابرساختارهایی چون بافت گویچه‌ای (spherulitic texture) ایجاد می‌شود [۱۵]. بدین معنا که هسته‌گذاری اولیه تعداد کمی از قطعه‌های سخت، می‌تواند موجب ایجاد نواحی بلوری موضعی شود که بعدها به بلورینگی ثانویه باقی‌مانده قطعه‌های سخت منجر شود. این پدیده موجب ناهمسانگردی ساختاری متمایز (distinct structural anisotropy) می‌شود [۱۶].

تصاویر AFM موجود در شکل ۳-الف وجود این ساختار کروی را تایید می‌کنند. شکل ۳-ب نشان می‌دهد، قطعه‌های سخت در میان قطعه‌های نرم غوطه‌ور و منظم شده‌اند. بررسی‌های نظم قطعه‌های سخت نشان می‌دهد، بلورهای قطعه سخت ترجیحاً جهت

نسبت به صداهای با شدت و بسامد مختلف، نشان می‌دهد.

روش‌های انتقال صوت

معمولا دو نوع سازوکار انتقال صوت وجود دارد:

۱- هوابرد و

۲- ضربه‌ای.

در سازوکار هوابرد، صوت به‌طور مستقیم از راه هوا از منبع صوت، منتقل می‌شود. در سازوکار ضربه‌ای، صوت از درون اجزای سازه منتقل می‌شود. برای انجام عایق‌کاری صوتی، تمام سازوکارهای انتقال صوت باید مد نظر قرار گیرند [۱۹].

رفتار مواد جاذب در برخورد با امواج صوتی

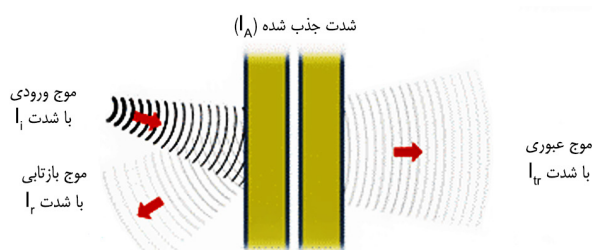
مطابق شکل ۴، وقتی صدا به مانعی برخورد می‌کند، قسمتی از آن بازتاب یافته و قسمت دیگر به درون مانع هدایت می‌شود. بخشی از موج ورودی به درون مانع، جذب می‌شود که به خاصیت میرایی ماده بستگی دارد. قسمت دیگر از مانع عبور می‌کند و دوباره در فضای سمت دیگر منتشر می‌شود. ترکیب آثار شکست و جذب، پدیده میراشدن موج را به‌وجود می‌آورد، معادله (۲).

$$I_t = I_R + I_A + I_{tr} \quad (2)$$

I_t شدت صوت اولیه موج برخوردی به ماده، I_R شدت صوت موج بازتابی، I_A شدت صوت موج میرا و I_{tr} شدت صوت عبوری از مانع است. ضریب جذب صوت، خاصیتی از ماده بوده که نشانگر قابلیت ماده در جذب موج منتشر شده است. بنابراین، در عایق‌کاری آکوستیک، دو ضریب مختلف وجود دارد که با معادله‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند [۱۹]:

$$\alpha = I_A / I_t = \text{انرژی جذب شده} / \text{انرژی اولیه برخوردی} \quad (3)$$

α ضریب جذب صوت بوده و همواره عددی بین ۰ و ۱ است،



شکل ۴- پدیده جذب، انتشار، بازتاب و انتقال موج صوتی از ماده در معرض آن [۱۹].

موج مکان هندسی نقاطی از محیط است که در آن نقاط تابع موج دارای فاز یکسان است. از این‌رو، اختلاف فاز نقاط واقع در یک جبهه، همواره برابر صفر است. انتشار موج صوتی در محیط به‌شکل کره‌هایی است که مرکز آن‌ها همان چشمه موج است و شعاع کره‌ها با انتشار موج افزایش پیدا می‌کند. هرگاه تغییرشکل (یا آشفته‌گی) در جزئی از محیط کشسانی در حال تعادل ایجاد شود، در اثر وجود نیروی کشسانی بین اجزای محیط، در محیط جزء به جزء منتقل می‌شود و پیش می‌رود. تغییرشکل ایجادشده در محیط تپ و انتقال تپ در محیط انتشار، موج نامیده می‌شود. انتقال صوت نیز در واقع مشابه ایجاد تپ و انتقال همان تپ در محیط کشسان است. صدا با پارامترهای طول موج (λ) بر حسب m، بسامد (f) بر حسب Hz، دامنه نوسان (d) بر حسب m و سرعت موج (c) بر حسب m/s تعریف می‌شود. امواج از نظر نحوه انتشار دو گونه‌اند: امواج عرضی و امواج طولی. در جامدات سرعت انتشار امواج طولی بیش از امواج عرضی است [۱۷].

محدوده شنوایی انسان بین بسامد ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰۰ Hz است. در نتیجه، گوش انسان بسامدهای کمتر و بیشتر از این محدوده را تشخیص نمی‌دهد. از این‌رو، اهمیت جذب جاذب‌های صوت در این محدوده بسامد است و تحلیل صدا معمولا در این دامنه بسامد انجام می‌شود. حساسیت به بسامدهای مختلف تحت تاثیر عواملی نظیر سن افراد و شرایط فیزیکی محیط است، اما مهم‌ترین محدوده بسامد برای مکالمات روزمره ۵۰۰ Hz تا ۲۰۴۸ Hz است. معمولا یک صدا، از چند بسامد مختلف تشکیل شده است [۱۸]. برای بررسی مسائل فنی عایق‌های صوتی و پدیده‌های مربوط به صوت، نه تنها توزیع بسامدی صوت، بلکه سطح شدت آن نیز مهم است. در علم صدا، مقدار فشار صوت (p) بر حسب Pa، توان صوت (P) بر حسب W و شدت صوت (I) بر حسب W/m^2 هر سه با واحد dB تعریف می‌کنند. dB واحد لگاریتمی (با پایه ۱۰) نسبت به یک مقدار مرجع است. شدت صوت به‌شکل مقدار متوسط انرژی تعریف می‌شود که صوت در واحد سطح (W/m^2) در راستای مشخصی منتقل می‌کند، معادله (۱).

$$LI = 10 \log(I / I_0) \quad (1)$$

$$I_0 = 10^{-12} W / m^2 \quad (\text{مقدار مرجع})$$

در طراحی آکوستیک، مقدار حساسیت شنوایی انسان‌ها باید مدنظر قرار گیرد. بدین ترتیب، دیگر مقدار بلندی صدا را بر اساس اعداد کاملا مطلق و دقیق نمی‌توان بیان کرد، چراکه حساسیت شنوایی در انسان‌ها متفاوت است. همچنین، گوش انسان واکنش‌های متفاوتی

صدا دارند که به ساختار فیزیکی مواد وابسته است. معمولاً اجسام کشسان خاصیت جذب بسامدهای زیاد و مواد متخلخل خاصیت جذب در محدوده بسامدهای کمتر را دارند [۲۱]. از این رو، با داشتن مواد متخلخل گرانبه‌تر می‌توان به جذب صدا در گستره وسیع‌تر از محدوده بسامد دست یافت. موادی مانند اسفنج پلی‌یورتان سلول‌باز، سبب جذب زیاد صوت می‌شوند [۲۲]. در خاصیت جذب صوت اسفنج پلی‌یورتان سلول‌باز، پارامترهای مختلف مانند لرزش و اتلاف از دیواره‌های سلول، هوای داخل حفره‌ها و سختی دیواره بر کارایی اسفنج پلی‌یورتان موثر است [۲۲]. انرژی صوتی هوا با تغییرات متناوب فشار هوا، درون محیط جابه‌جا می‌شود که این امواج فشاری به وسیله بسامد آن‌ها مشخص می‌شوند.

انرژی صوتی با روش‌های مختلف مانند تنش‌های گرانبه‌تر که در اثر برش سیال به وجود می‌آیند، می‌تواند به انرژی گرمایی تبدیل شود. اصطکاک سیال روی سطح جامد نیز می‌تواند گرمایی ایجاد کند که از درون جامد عبور کند. به طور کلی، هر قدر مقدار انعطاف‌پذیری بخش جامد بیشتر باشد، اتلاف انرژی افزایش می‌یابد. اگر سطح جامد نامتخلخل باشد، بخش زیادی از انرژی تابشی به سمت محیط بازتاب می‌شود. در حالی که در سطوح متخلخل بخش اعظم امواج فشاری به درون ماده نفوذ می‌کند. تعداد بیشتر بازتاب‌های داخلی به جذب بیشتر انرژی از راه ساختار جامد منجر می‌شود. برای افزایش بهره‌مندی از امواج فشاری باید به عمق ماده نفوذ کند و به سرعت از سطح آن بازتاب نشود [۲۲]. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، زمانی که اندازه سلول‌های روی سطح از حدی کوچک‌تر شود، جذب و به دام افتادن امواج درون حفره‌ها کاهش می‌یابد. در این حالت، اکثر امواج به سمت بیرون بازتاب یافته و

به طوری که عدد ۱ بیانگر جذب ۱۰۰٪ و عدد ۰ جذب ۰٪ را نشان می‌دهد و τ ضریب انتشار صوت است.

$$(4) \quad I_{tr}/I_i = \text{انرژی اولیه برخوردی/انرژی منتشر شده} = \tau$$

همچنین:

$$(5) \quad I_R / I_i = [(\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2) / (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)]^2$$

ρ چگالی محیط و c سرعت صوت در آن محیط است. ρc به عنوان خاصیتی از مقاومت ماده با واحد Pa.s/m است. هر قدر اختلاف بین این دو مقدار بیشتر شود، بازتاب صوت از سطح ماده افزایش پیدا می‌کند. این مقدار برای هوا $444/2 \text{ Pa.s/m}$ است. با توجه به زیاد بودن مقدار چگالی مواد جامد، اختلاف این مقدار برای جامد و هوا بسیار زیاد است. از این رو، همواره شاهد بازتاب صوت از سطح جامدات (R) هستیم [۲۰].

$$(6) \quad R = 10 \log(I_i / I_r) [\text{dB}]$$

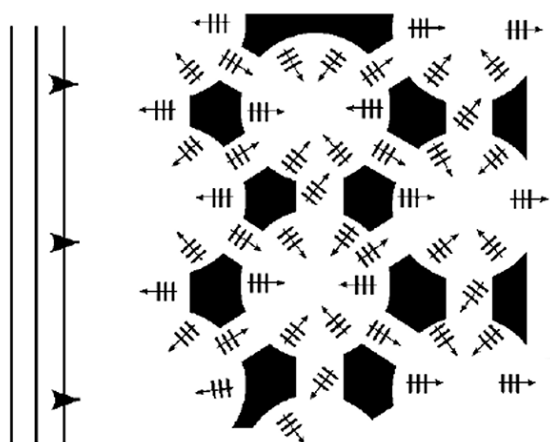
امواج صوتی که درون ماده منتشر می‌شوند، تحت بسامدها و سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند. همچنین، صوت تحت زوایای مختلف به صفحات برخورد می‌کند. همواره زاویه‌ای وجود دارد که تحت آن، طول موج امواج برخوردی به ماده با طول موجی از امواج منتشر شده درون ماده برابر می‌شود. به این پدیده انطباق (coincidence) می‌گویند [۲۰]. اگر پدیده انطباق صورت گیرد، صدا بسیار راحت درون ماده حرکت می‌کند، که به ویژه در بسامد بحرانی، ضریب جذب صوت به شدت کاهش می‌یابد [۲۱].

انواع مختلف عایق‌های صوتی بر اساس نوع سازه

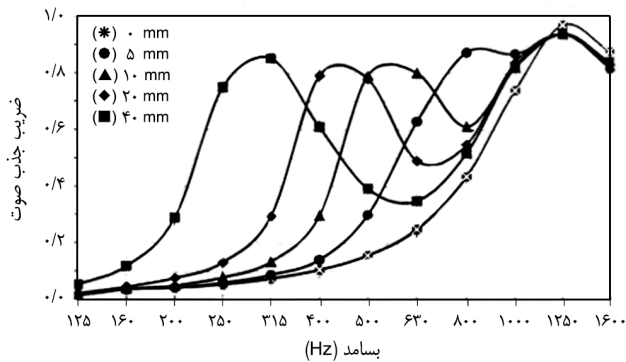
عایق‌های صوتی از نظر سازه به دو دسته عایق تک‌لایه و دولایه تقسیم می‌شوند. زمانی که از عایق تک‌لایه استفاده می‌شود، عواملی مانند جرم لایه، مقاومت خمشی، خاصیت کشسانی، چگونگی نصب لایه، زاویه صدا و وجود شکاف و سوراخ در آن لایه به شدت بر مقدار جذب صوت موثر است. در عایق‌های صوتی دولایه از دو پوسته خارجی (اغلب فلزی، کامپوزیتی یا پلاستیکی) و محفظه‌ای (خلأ یا ماده عایق) بین این دو پوسته استفاده می‌شود. از نظر تحلیلی، می‌توان چنین سازه‌هایی را سامانه جرم-فنر-جرم در نظر گرفت [۲۱].

بررسی رفتار خاصیت عایق صوتی در مواد متخلخل

با توجه به مطالب پیش‌گفته، تمام مواد مقداری خاصیت جذب



شکل ۵- کاهش انرژی انتقالی در اثر کاهش اندازه سلول از چپ به راست [۲۳].



شکل ۶- ضریب جذب صوت به عنوان تابعی از بسامد برای نمونه‌های با ضخامت ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ mm [۲۶].

اثر غلظت آب و عامل انبساط فیزیکی بر ضریب جذب

در سال ۲۰۱۵، Chen و همکاران [۲۴] ارتباط بین مقادیر مختلف مواد افزودنی و ضریب جذب صوت اسفنج پلی‌یورتان حاصل را بررسی کردند. مشاهده شد، زمانی که از آب به عنوان ماده انبساط استفاده می‌شود، با افزایش محتوای آن تا ۴/۹ واحد وزنی نسبت به وزن پلی‌ال، ضریب جذب صوت به مقدار بیشینه خود یعنی ۰/۹۳۵ می‌رسد. با افزایش بیشتر مقدار آب، ضریب جذب کاهش پیدا می‌کند، اما بر کاهش شدت صدا در بسامدهای مختلف تقریباً بی‌اثر است. Chen نشان داد، مقدار بیشتر آب تخلخل اسفنج را افزایش می‌دهد و سبب کاهش چگالی و ضریب جذب صوت آن می‌شود. در مرحله بعد، به اسفنج‌های مجموعه قبل با محتوای آب متفاوت شامل (گروه ۱: ۳/۸)، (گروه ۲: ۴/۳)، (گروه ۳: ۴/۹) و (گروه ۴: ۵/۳) واحد وزنی در برابر ۱۰۰ واحد پلی‌ال، مقداری ثابت از عامل پف‌زای فیزیکی افزوده شد. همان‌طور که در تصاویر مشهود است، افزودن عامل انبساط به همراه آب با همان درصدهای وزنی در فرمول‌بندی به دلیل افزایش حفره‌های به هم پیوسته، سبب بهبود عملکرد جذب صوت می‌شود (شکل ۷).

اثر کاتالیزگر بر ضریب جذب

در سال ۲۰۱۶، Gyoung و همکاران [۲۷] مطالعاتی در باره یافتن مقادیر بهینه کاتالیزگرهای مرسوم در تهیه اسفنج انعطاف‌پذیر پلی‌یورتان و بهبود قابلیت جذب صوت آن‌ها داشتند. این پژوهشگران اثر دو کاتالیزگر DABCO و DBTDL را با فعالیت‌های متفاوت در تشکیل گروه‌های یورتان و گروه عاملی اوره بررسی کردند. آن‌ها متوجه شدند، ضخامت متوسط ستون‌های سلول‌ها، مرتبط با چگالی سلول اسفنج‌هاست. همان‌طور که در شکل‌های ۸-الف و ب نشان داده شده است، اسفنج دارای

در نهایت کارایی آن کاهش می‌یابد [۲۳]. همچنین گزارش شده است، عملکرد جاذب صوتی وابسته به چگالی، سرعت حرکت صوت در ماده و تخلخل آن است. سرعت صوت در ماتریس ماده نیز به کشسانی و شکل‌شناسی کلی ماده وابسته است [۲۴].

جریان‌پذیری در جامدات متخلخل

الگوی جریان درون جامد متخلخل، به‌طور مستقیم به اندازه سلول‌های آن وابسته است. با استفاده از عدد Knudsen، معادله (۷) می‌توان نوع جریان در فضای متخلخل را مشخص کرد:

$$K_n = I_{mfp} / I_{char} \quad (7)$$

در این معادله K_n عدد بی‌بعد Knudsen، I_{mfp} میانگین مسیر آزاد مولکول‌های هوا و I_{char} خاصیت طولی ماده است. خاصیت طولی، میانگین فاصله بین دیواره‌های متخلخل است که برای اسفنج‌ها این مقدار برابر با میانگین قطر سلول‌هاست. زمانی که این عدد خیلی کوچک‌تر از یک است، مولکول‌های هوا در فضای آزاد در حال حرکت‌اند. تخلخل از معادله (۸) محاسبه می‌شود:

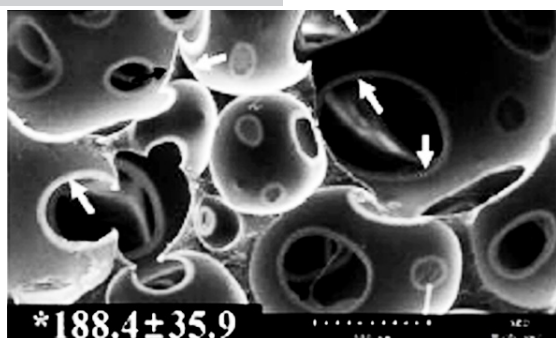
$$\varepsilon = V_{pore} / V_{total} = 1 - (\rho_a / \rho_m) \quad (8)$$

ρ_m چگالی بخش جامد ماده برحسب kg/m^3 ، ρ_a چگالی ماده متخلخل بر حسب kg/m^3 ، V_{total} حجم کلی و V_{pore} حجم بخش متخلخل نمونه بر حسب m^3 است [۲۵]. در ادامه پژوهش‌های مرتبط بررسی می‌شوند.

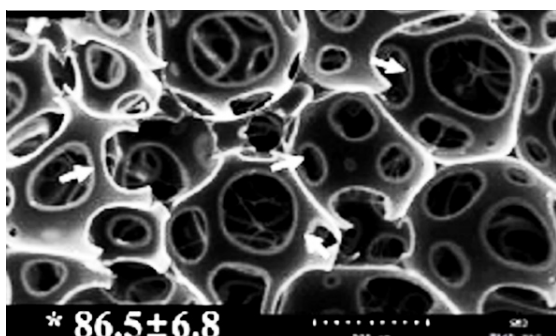
مروری بر پژوهش‌ها

اثر ضخامت جاذب اسفنج پلی‌یورتان بر ضریب جذب

در سال ۲۰۰۳ Ibrahim و Melik [۲۶] بهینه‌سازی ضریب جذب اسفنج‌های پلی‌یورتان را مطالعه کردند. هدف از این مطالعه، بررسی اثر ضخامت اسفنج پلی‌یورتان سخت بر ضریب جذب بود. این دو از صفحات اسفنج پلی‌یورتان با چگالی 40 kg/m^3 استفاده و ضریب‌های جذب صوتی صفحات را در ضخامت‌های متفاوت ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ mm اندازه‌گیری کردند. ضخامت ۴۰ mm مقدار بهینه گزارش شد. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در تمام این ضخامت‌ها ضریب جذب در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۷۰۰ یکسان بوده و تفاوت این جاذب‌ها تنها در ضریب جذب آن‌ها در بسامدهای کم است.



(الف)



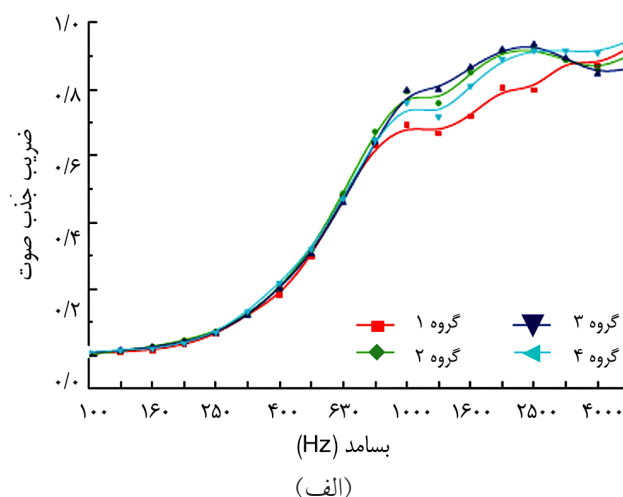
(ب)

شکل ۸- تصویر SEM درون سلول‌های پلی‌یورتان با استفاده از دو نوع کاتالیزگر: (الف) انبساط DABCO و (ب) ژل شدن DBTDL [۲۷].

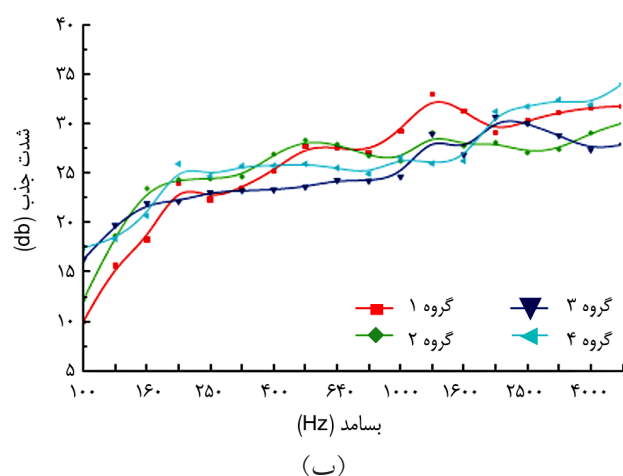
آن‌ها رخ می‌دهد. حفره‌های به‌هم‌پیوسته به‌وسیله حفره‌های متصل به هم ایجاد می‌شوند و تعداد این سلول‌ها و تخلخل‌ها، تعیین‌کننده ساختار شبکه‌ای این حفره‌هاست. به‌طور کلی، تعداد حفره‌ها با افزایش مقدار کاتالیزگر افزایش می‌یابد، اما DBTDL سبب افزایش بیشتری در تعداد حفره‌ها شده است. افزایش تعداد حفره‌ها در مقدار زیاد کاتالیزگر، ضخامت ستون‌ها و چگالی را کاهش می‌دهد. مقدار کاهش در اسفنج دارای کاتالیزگر DBTDL به‌دلیل کمتر بودن ضخامت ستون‌ها از اسفنج دارای DABCO کمتر است.

همان‌طور که در شکل‌های ۹-الف و ب مشخص است، با افزایش مقدار کاتالیزگر، ضریب جذب کاهش یافته است. Gyoung این پدیده را این‌گونه تحلیل کرد، امواج صوتی در کل سبب لرزش دیواره‌های سلولی و هوای داخل سلول می‌شوند و انرژی با میرایی دیواره‌های حفره‌ها و هوا تلف می‌شود، از این‌رو با افزایش سختی دیواره سلول، قدرت جذب صوت افزایش می‌یابد. همچنین، ستون‌های نازک سبب کاهش خاصیت میرایی و عملکرد جذب صوت می‌شوند. بنابراین، با افزایش مقدار کاتالیزگر به‌دلیل کاهش چگالی، مقدار ضریب جذب کاهش پیدا می‌کند.

همان‌طور که گفته شد، مواد مصرفی همچون پلی‌ال‌ها،



(الف)

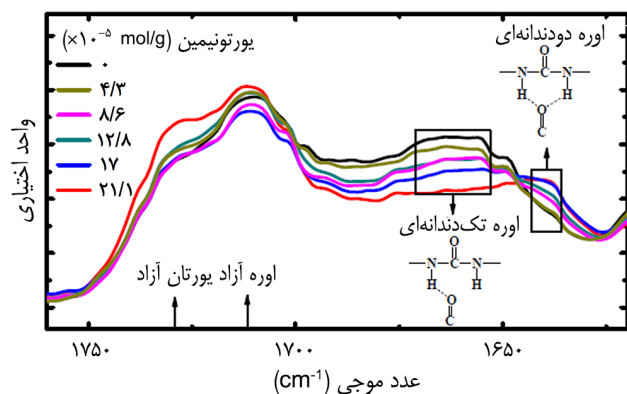


(ب)

شکل ۷- نمودار: (الف) ضریب جذب صوت و (ب) اتلاف عبور از اسفنج پلی‌یورتان در برابر بسامد با محتوای آب متفاوت (گروه ۱: ۳/۸ واحد، گروه ۲: ۴/۳ واحد، گروه ۳: ۴/۹ واحد و گروه ۴: ۵/۳ واحد وزنی در برابر ۱۰۰ واحد پلی‌ال) [۲۴].

کاتالیزگر DBTDL در مقایسه با اسفنج با کاتالیزگر DABCO، حفره‌های ریزتر با ستون‌های نازک‌تر دارد. همچنین با افزایش مقدار کاتالیزگر، ضخامت ستون‌ها کمتر و اندازه حفره‌ها ریزتر شده‌اند (ضخامت متوسط ستون‌ها زیر هر عکس نشان داده شده‌اند).

عملکرد عایق صوتی اسفنج‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر، وابسته به خواص سلولی آن‌ها مانند متوسط اندازه سلولی و توزیع اندازه آن‌هاست. براساس نتایج به‌دست آمده، با استفاده از کاتالیزگر DBTDL توزیع اندازه حفره‌ها یکنواخت‌تر شده است. در مقابل، کاتالیزگر DABCO سبب انعقاد نامنظم سلول‌ها شده و سلول‌های کوچک تا بزرگ را ایجاد کرده است. آن‌ها گزارش کردند، به‌هم‌پیوستگی سلولی همانند اندازه سلول‌ها خاصیت بسیار مهمی در جذب صوت محسوب می‌شود، چرا که نفوذ امواج صوتی درون تخلخل‌ها کنترل می‌شود و اتلاف انرژی صوتی در

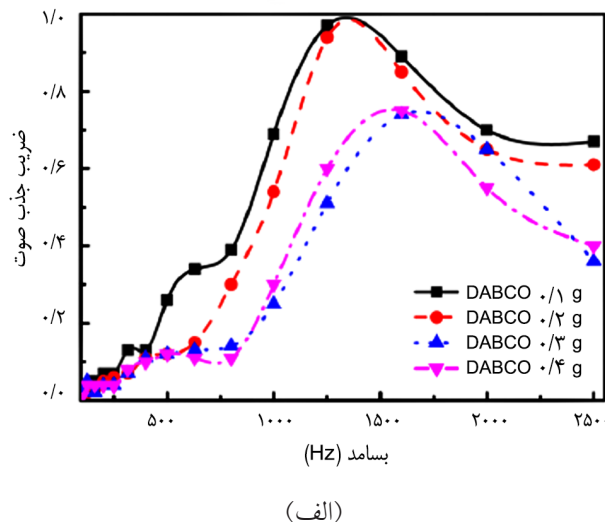


شکل ۱۰- طیف FTIR اسفنج‌های پلی‌یورتان با محتوای متفاوت یورتونیمین [۲۹].

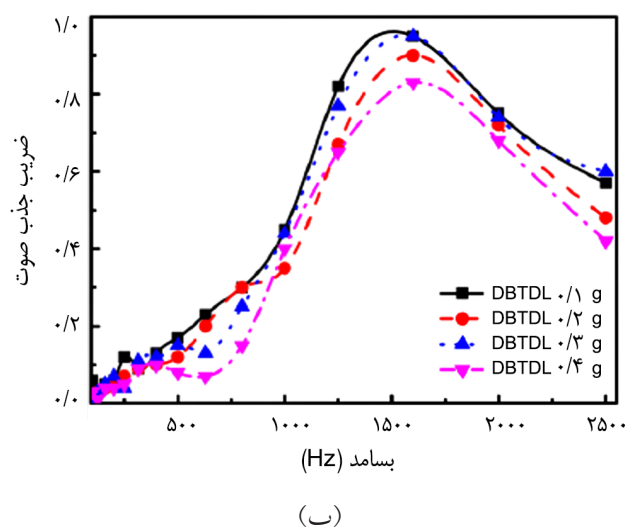
عدد موجی 1660 cm^{-1} و 1640 cm^{-1} دیده می‌شود که به ترتیب مربوط به پیوند هیدروژنی گروه عاملی اوره تک‌دندانه (monodentate) و دودندانه (bidentate) است. شدت پیک کربونیل گروه عاملی اوره تک‌دندانه با افزایش محتوای یورتونیمین در حال کاهش بوده، درحالی که شدت پیک گروه عاملی اوره دودندانه در حال افزایش است. این افزایش گروه عاملی اوره دودندانه سبب افزایش تجمع قطعه‌های سخت در پلی‌یورتان می‌شود. این تجمع به جدایش میکروفازی کمک می‌کنند. Sung و همکاران نتیجه گرفتند، فازهای سخت جداشده در اسفنج پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر موجب به‌وجود آمدن مجموعه‌ای از نقاط تمرکز تنش بر دیواره سلولی شده که سبب پاره‌شدن و در نهایت بازشدن سلول می‌شوند. به عبارتی با افزایش محتوای یورتونیمین، تجمع انبوهی از قطعه‌های سخت به‌وجود می‌آید که امکان تشکیل سلول باز را افزایش می‌دهد. با تغییر محتوای این ماده در اسفنج‌ها، متوسط اندازه سلول‌ها که در حدود $520 \mu\text{m}$ بوده، تغییر زیادی نداشته است. Sung به‌طور کلی نتیجه‌گیری کرد، با افزایش محتوای یورتونیمین، جدایش میکروفاز افزایش می‌یابد. افزایش جدایی میکروفاز به افزایش محتوای سلول‌های باز و نیم‌باز منجر می‌شود. در نهایت ازدیاد سلول‌های باز، ضریب جذب صوت را به دلیل افزایش مسیر حرکت مولکول‌های هوا افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین خاصیت اسفنج پلی‌یورتان که سبب رشد روزافزون آن در تمام جهان شده است، کاربرد این اسفنج به عنوان عایق گرمایی و صوتی است. هدف از این مطالعه، بررسی رفتار اسفنج انعطاف‌پذیر



(الف)



(ب)

شکل ۹- ضریب جذب صوت اسفنج‌ها در برابر بسامدهای مختلف به عنوان تابعی از محتوای مختلف کاتالیزگر: (الف) انبساط DABCO و (ب) ژل شدن DBTDL [۲۷].

ایزوسیانات‌ها، زنجیرافزاها، آب، مواد فعال سطحی و عوامل انبساط و کاتالیزگرهای مختلف به‌طور مستقیم روی ساختار سلولی اسفنج پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر اثرگذار است [۲۸]. از این رو، برخی از مطالعات به سمت بهبود خواص اسفنج‌های پلی‌یورتان با استفاده از مواد افزودنی مختلف پیش‌رفته‌اند. در ادامه یکی از مطالعات انجام‌شده در این حوزه بررسی می‌شود.

اثر غلظت یورتونیمین بر ضریب جذب

در مطالعه‌ای که Sung و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۶ انجام دادند، اثر وجود یورتونیمین بر رفتار جذب صوت اسفنج بررسی شد. طیف FTIR نمونه‌های اسفنج که حاوی مقادیر متفاوت یورتونیمین هستند، در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. اختلاف پیک جذب در دو

به مقدار بیشینه خود می‌رسد. با افزایش بیشتر مقدار آب، ضریب جذب کاهش پیدا می‌کند، اما بر کاهش شدت صدا در بسامدهای مختلف تقریباً بی‌اثر است. در کل، افزودن تری‌اتیل‌آمین و ماده انبساط فیزیکی، به دلیل افزایش تخلخل به هم پیوسته، خواص جذب صوتی را افزایش می‌دهد. افزون بر نکات یادشده افزایش محتوای ترکیباتی که سبب ازدیاد جدایش میکروفاز می‌شوند، مانند یورتونیمین، سبب افزایش محتوای سلول باز و نیمه‌باز و ضریب جذب صدا می‌شوند.

مراجع

1. Ugarte L., Saralegi A., Fernández R., Martín L., Corcuera M., and Eceiza A., Flexible Polyurethane Foams Based on 100% Renewably Sourced Polyols, *Ind. Crops. Prod.*, **62**, 545-551, 2014.
2. Cinelli P., Anguillesi I., and Lazzeri A., Green Synthesis of Flexible Polyurethane Foams from Liquefied Lignin, *Eur. Polym. J.*, **49**, 1174-1184, 2013.
3. Yang X.H., Ren S.W., Wang W.B., Liu X., Xin F.X., and Lu T.J., A Simplistic Unit Cell Model for Sound Absorption of Cellular Foams with Fully/Semi-Open Cells, *Compos. Sci. Technol.*, **118**, 276-283, 2015.
4. Lana Z., Dagaa A.R., White House R., and Mc Carthy S., Structure-Properties Relations in Flexible Polyurethane Foams Containing a Novel Bio-Based Crosslinker, *Polymer*, **55**, 2635-2644, 2014.
5. Chang L., Xue Y., and Hsieh F., Comparative Study of Physical Properties of Water-Blown Rigid Polyurethane Foams Extended with Commercial Soy Flours, *Appl. Polym. Sci.*, **80**, 10-19, 2001.
6. Mondal P. and Khakhar D.V., Regulation of Cell Structure in Water Blown Rigid Polyurethane Foam, *Macromolecules*, **216**, 241-254, 2004.
7. Krol P., Synthesis Methods, Chemical Structures and Phase Structures of Linear Polyurethanes. Properties and Applications of Linear Polyurethanes in Polyurethane Elastomers, Copolymers and Ionomers, *Prog. Mater. Sci.*, **52**, 915-1015, 2007.
8. Simón D., de Lucas A., Rodríguez J.F., and Borreguero A.M., Glycolysis of High Resilience Flexible Polyurethane Foams Containing Polyurethane Dispersion Polyol, *Polym. Degrad. Stabil.*, **133**, 119-130, 2016.
9. Javni I., Song K., Lin J., and Petrovic Z.S., Structure and Properties of Flexible Polyurethane Foams with Nano-and Micro-Fillers, *Cell. Plast.*, **47**, 357-372, 2011.
10. Rossmly G.R., Kollmeier H.J., Lidy W., Schator H., and Wiemann M., Cell-Opening in One-Shot Flexible Polyether Based Polyurethane Foams. The Role of Silicone Surfactant and its Foundation in the Chemistry of Foam Formation, *Cell. Plast.*, **13**, 26-35, 1977.
11. Versteegen R.M., Sijbesma R.P., and Meijer E.W., Synthesis and Characterization of Segmented Copoly(ether urea)s with Uniform Hard Segments, *Macromolecules*, **38**, 3176-3184, 2005.
12. Tiuca A.E., Vermeşana H., Gabora T., and Vasileb O., Improved Sound Absorption Properties of Polyurethane Foam mixed with Textile Waste, *Energy Procedia*, **85**, 559-565, 2016.
13. Auten K.L. and Petrovic Z.S., Synthesis, Structural Characterization, and Properties of Polyurethane Elastomers Containing Various Degrees of Unsaturation in the Chain Extenders, *Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **40**, 1316-1333, 2002.
14. Xu Y.J., Petrovic Z., Das S., and Wilkes G.L., Morphology and Properties of Thermoplastic Polyurethanes with Dangling Chains in Ricinoleate-Based Soft Segments, *Polymer*, **49**, 4248-4258, 2008.
15. Korley L.T.J., Pate B.D., Thomas E.L., and Hammond P.T., Effect of the Degree of Soft and Hard Segment Ordering on the Morphology and Mechanical Behavior of Semicrystalline

- Segmented Polyurethanes, *Polymer*, **47**, 73-82, 2006.
16. Xia H., Song M., Zhang Z., and Richardson M., Microphase Separation, Stress Relaxation, and Creep Behavior of Polyurethane Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **103**, 2992-3002, 2007.
 17. Arenas J.P. and Ugarte F., A Note on a Circular Panel Sound Absorber with an Elastic Boundary Condition, *Appl. Acoust.*, **114**, 10-17, 2016.
 18. Waletzko R.S., Korley L.T.J., Pate B.D., Thomas E.L., and Hammond P.T., Role of Increased Crystallinity in Deformation-induced Structure of Segmented Thermoplastic Polyurethane Elastomers with PEO and PEO-PPO-PEO Soft Segments and HDI Hard Segments, *Macromolecules*, **42**, 2041-2053, 2009.
 19. Takahashi D. and Tanaka M., Flexural Vibration of Perforated Plates and Porous Elastic Materials Under Acoustic Loading, *J. Acoust. Soc. Am.*, **112**, 10-11, 2009.
 20. Nieuwkoop P., Aluminum Foam: Production, Properties, and Processing, *Constructeur*, **44**, 26-30, 2005.
 21. Sung G., Kimb J.W., and Kim J.H., Fabrication of Polyurethane Composite Foams with Magnesium Hydroxide Filler for Improved Sound Absorption, *J. Ind. Eng. Chem.*, **44**, 99-104, 2016.
 22. Wang Y., Zhang C., Ren L., Ichchou M., Galland M.-A., and Bareille O., Influences of Rice Hull in Polyurethane Foam on its Sound Absorption Characteristics, *Polym. Compos.*, **34**, 1847-1855, 2013.
 23. Gwon J.G., Sung G., and Kim J.H., Modulation of Cavities and Interconnecting Pores in Manufacturing Water Blown Flexible Poly(urethane urea) Foams, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **16**, 2299-2307, 2015.
 24. Chen S., Jiang Y., Chen J., and Wang D., The Effects of Various Additive Components on the Sound Absorption Performances of Polyurethane Foams, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2015**, 1-9, 2015.
 25. Hasani Baferani A., Katbab A.A., and Ohadi A.R., The Role of Sonication Time upon Acoustic Wave Absorption Efficiency, Microstructure, and Viscoelastic Behavior of Flexible Polyurethane/CNT Nanocomposite Foam, *Eur. Polym. J.*, **90**, 383-391, 2017.
 26. Ibrahim M.A. and Melik R.W., Optimized Sound Absorption of A Rigid Polyurethane Foam, *Arch. Acoust.*, **28**, 305-312, 2013.
 27. Gwon J.G., Kim S.K., and Kim J.H., Sound Absorption Behavior of Flexible Polyurethane Foams with Distinct Cellular Structures, *Mater. Design*, **89**, 448-454, 2016.
 28. Verdejo R., Stämpfli R., Alvarez-Lainez M., Mourad S., Rodriguez-Perez M.A., Brühwiler P.A., and Shaffer M., Enhanced Acoustic Damping in Flexible Polyurethane Foams Filled with Carbon Nanotubes, *Compos. Sci. Technol.*, **69**, 1564-1569, 2009.
 29. Sung Seok G., Kim K., Kim J.W., and Kim J.H., Effect of Isocyanate Molecular Structures in Fabricating Flexible Polyurethane Foams on Sound Absorption Behavior, *Polym. Test.*, **53**, 156-164, 2016.