

واژه‌های کلیدی:

شبکه‌های پلیمری درهم
تنیده
میرایی صوتی
دمای انتقال شیشه‌ای

عوامل موثر بر میرایی صوتی شبکه‌های پلیمری درهم تنیده (IPN)

سید محمد صادق جعفری علوی^۱، زهرا مقصود^{*}

^۱ مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده ...

امروزه با گسترش کارخانجات و وسایل نقلیه، کنترل آلودگی صوتی اهمیت زیادی پیدا کرده است. آلودگی صوتی سبب آسیب رساندن به انسان و آرامش او می‌شود. یکی از بهترین روش‌ها برای کنترل صدا، استفاده از پلیمرها است. در سال‌های اخیر استفاده از سامانه‌های پلیمری به ویژه شبکه‌های پلیمری درهم تنیده (Interpenetrating Polymer Network (IPN)) در ساخت مواد جاذب صدا مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این مطالعه بررسی عوامل موثر بر قدرت میرایی صوتی IPN از جمله اجزای تشکیل دهنده IPN، نسبت اجزای تشکیل دهنده IPN، قطبیت، نوع و مقدار آغازگر، محیط سنتز، بافر، نوع و مقدار عامل شبکه‌ای کننده، ترتیب خوراک‌دهی، نوع IPN، عامل انتقال به زنجیر و غیره است.

^{*}پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

maghsoud@um.ac.ir

۱ مقدمه

اتلافی و فاکتور اتلاف به بیشینه مقدار خود می‌رسند. فاکتور اتلاف ($\tan \delta$) معیاری برای کمی کردن خاصیت اتلافی در پلیمرها است. برای میراگرها فاکتور اتلاف بالای 0.3 مناسب است [۲].

انتشار امواج صوتی در پلیمر جامد می‌تواند با دو مولفه سرعت و جذب صوت مشخص شود. سرعت صوت، فاصله‌ای است که موج صوتی در مدت زمان یک ثانیه در محیط می‌پیماید. واحد سرعت صوت، متربرثانیه است و با نماد u نشان داده می‌شود. جذب یا میرایی صوت، معیاری برای اتلاف انرژی موج صوت به صورت انرژی جنبشی یا گرما در هنگام عبور از محیط است. واحد جذب صوت، دسی بل بر متر (dB/m) است و با نماد α نشان داده می‌شود. بدیهی است که انرژی حرارتی تولید شده به دلیل کم بودن توان انرژی صوتی، بسیار اندک است. طبق معادله ۱ فاکتور اتلاف با جذب صوت رابطه مستقیم دارد:

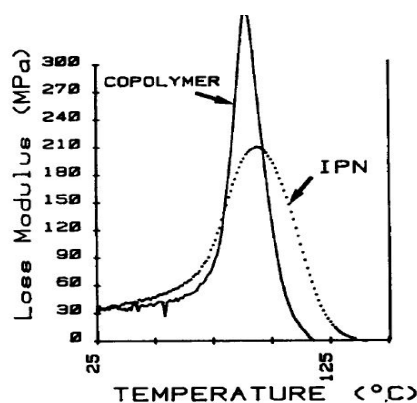
$$\alpha \lambda = 8.686\pi \tan \delta \quad (1)$$

در این معادله λ طول موج صوت است. بنابراین با افزایش فاکتور اتلاف، جذب صوت نیز افزایش می‌یابد [۳].

۲ تعریف شبکه‌های پلیمری درهم تنیده (IPN)

به ترکیب دو یا چند پلیمر در شکل شبکه‌ای که حداقل یکی در حضور دیگری بلافاصله سنتز یا

امروزه با گسترش شهرنشینی و به تبع آن افزایش وسایل نقلیه، آلودگی صوتی به یکی از معضلات جوامع بشری تبدیل شده است. تحقیقات انجام شده در مورد تأثیر آلودگی صوتی بر سلامتی انسان توسط موسسه سوئیسی (TPH (Swiss Tropical and Public Health Institute در سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد به ازای هر ۱۰ دسی بل افزایش در سطح متوسط فشار صدا، احتمال خطر حمله قلبی به میزان ۲ تا ۳/۴ درصد افزایش می‌یابد [۱]. به همین منظور امروزه استفاده از میراگرهای صوتی نسبت به گذشته اهمیت بیشتری پیدا کرده است. به منظور کاهش صدا در مکان‌های مختلف از روش‌ها و مواد متنوعی استفاده می‌شود که در این بین پلیمرها کاربرد گسترده‌تری دارند. پلیمرها به دلیل رفتار گرانبوکشسان به ویژه نزدیک دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) (Glass Transition Temperature) به عنوان جاذب امواج مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دمای انتقال شیشه‌ای برای پلیمر، نقطه شروع حرکت هماهنگ زنجیرها است. ناحیه انتقال شیشه‌ای نقش مهمی در عملکرد پلیمرها به خصوص در زمینه میرایی صوتی و لرزش ایفا می‌کند و پلیمرها در این ناحیه بیشترین میزان میرایی را از خود نشان می‌دهند. یکی از مشکلات مربوط به استفاده از جورپلیمرها در کاربرد میرایی، محدوده دمای انتقال شیشه‌ای نسبتاً باریک آن‌ها (در حدود ۲۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد) است. حال آن‌که پلیمری برای کاربردهای میرایی صوتی مناسب است که بازه دمای میرایی موثر آن حداقل ۶۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد باشد. به منظور افزایش بازه میرایی موثر، از سامانه‌های پلیمری چندجزئی استفاده می‌شود که در این بین شبکه‌های پلیمری درهم تنیده (IPN) بیشترین بازه جذب را نشان می‌دهند. بنابراین ساخت پوشش‌های پلیمری با ساختار IPN می‌تواند در جذب و کاهش صداهای ناخواسته بسیار موثر و مفید باشد. در شکل ۱ با وجود ترکیب شیمیایی یکسان، محدوده انتقال شیشه‌ای برای IPN پهنای بیشتری نسبت به کوپلیمر دارد. مولفه‌های مورد استفاده برای توصیف خواص گرانبوکشسان مواد پلیمری شامل مدول ذخیره (E'') (Loss Modulus)، مدول اتلافی (E') (Storage Modulus) و فاکتور اتلاف ($\tan \delta = E''/E'$) (Loss Factor) است. در ناحیه انتقال شیشه‌ای، مدول ذخیره کاهش ولی مدول



شکل ۱ منحنی مدول اتلافی بر حسب دما برای IPN و کوپلیمر بر پایه استایرن-بوتیل متاکریلات در فرکانس ۱۱۰ هرتز [۲].

۴ عوامل موثر بر میرایی IPNها

عوامل زیادی بر میرایی IPNها تأثیرگذار است که از جمله می‌توان به اجزای تشکیل دهنده IPN، نسبت اجزای تشکیل دهنده IPN، قطبیت، نوع و مقدار آغازگر، محیط سنتز، بافر، نوع و مقدار عامل شبکه‌ای کننده، ترتیب خوراک‌دهی، نوع ساختار، عامل انتقال به زنجیر، اضافه کردن پرکننده و غیره اشاره کرد. در ادامه هر یک از عوامل یاد شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱ نوع ساختار

IPNها دارای ساختارهای متنوعی مانند ساختارهای متخلخل، گرادپانی، آمیزه و شاخه‌دار هستند. نوع ساختار، بر شدت میرایی اثر دارد.

۴-۱-۱ ساختار متخلخل

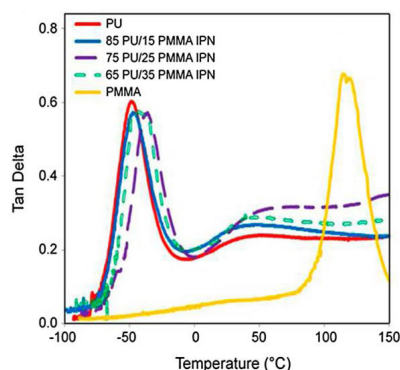
به منظور بهبود جذب امواج صوتی توسط جامدات گرانروکشسان می‌توان از مواد گرانروکشسان با ساختار متخلخل استفاده کرد. مولکول‌های هوای مرتعش شده توسط امواج صوتی با نفوذ در تخلخل‌ها و ایجاد اصطکاک با سطح حفره‌ها، انرژی صوتی را به انرژی حرارتی تبدیل و به صورت گرما اتلاف می‌کنند. مواد متخلخل بسته به نوع کاربرد آن‌ها دارای حفره‌هایی با اندازه و تراکم مختلف هستند. روش اسفنج‌سازی ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای سنتز پلیمرهای متخلخل است [۸ و ۹].

به منظور بررسی اثر ساختار متخلخل بر میرایی IPNها، IPN بر پایه پلی‌یورتان (Polyurethane) - پلی‌متیل-متاکریلات (PU/PMMA) (Poly(Methyl Methacrylate)) سنتز شده‌اند. روش سنتز اسفنج IPN تقریباً مشابه روش سنتز فیلم IPN است و تنها تفاوت آن، اضافه کردن عامل کف‌زای آزودی-کربن‌آمید (Azodicarbonamide(ADCA)) در مرحله پایانی سنتز است. بر روی هر دو ساختار که با نسبت‌های وزنی مختلف تهیه شده، آزمون‌های دینامیکی - مکانیکی (Dynamic Mechanical Analysis(DMA)) (برای تعیین محدوده دمای میرایی $\tan \delta > 0.3$) و لوله‌امپدانس (برای تعیین ضریب جذب صوت در فرکانس‌های مختلف) انجام شده است. وجود ساختار متخلخل باعث افزایش محدوده دمای میرایی می‌شود. در IPNهای با

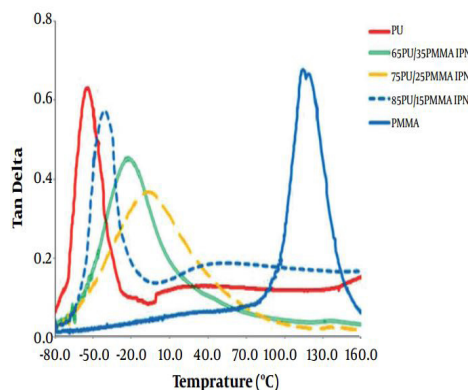
شبکه‌ای (Cross-linked) شود، شبکه‌های پلیمری درهم‌تنیده می‌گویند [۴]. IPNها به شش دسته ترتیبی (Sequential)، هم‌زمان (Simultaneous)، لاتکس (Latex)، گرادپان (Gradient)، گرمانرم (Thermoplastic) و نیمه-گرادپان (Semi-IPN) تقسیم می‌شوند. در IPN ترتیبی ابتدا مونومر لایه اول سنتز و شبکه‌ای می‌شود. سپس مونومر لایه دوم به همراه آغازگر (Initiator) و عامل شبکه‌ای کننده (Crosslinker) به سامانه اضافه و سنتز درجا (In situ) انجام می‌شود. در روش هم‌زمان، محلول مونومر لایه اول و لایه دوم به همراه عامل شبکه‌ای کننده به سامانه اضافه و سنتز هم‌زمان انجام می‌شود [۵]. در سنتز IPNهای لاتکس هر ذره به صورت میکرو IPN عمل می‌کند که اغلب از ساختار هسته-پوسته (Core-Shell) برخوردارند. در IPNهای گرمانرم، پیوندهای عرضی فیزیکی به جای پیوندهای عرضی شیمیایی ایجاد می‌شود. چنین مخلوط‌هایی رفتار دوگانه از خود نشان می‌دهند؛ مثلاً در شرایط محیطی شبیه گرماسخت‌ها (Thermoset) و در دماهای بالا مانند گرمانرم‌ها رفتار می‌کنند. در IPN گرادپان، ترکیب اجزای تشکیل دهنده یا چگالی پیوند عرضی مواد از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر در سطح ماکروسکوپی متفاوت است. این کار با تورم شبکه اول به وسیله مونومر شبکه دوم در زمان معینی انجام می‌شود و سنتز قبل از به تعادل رسیدن مجموعه صورت می‌گیرد. این روش اجازه می‌دهد تا غلظت بالایی از شبکه اول در یک سطح و غلظت بالایی از شبکه دوم در سطح دیگری ایجاد و گرادپان غلظت در سراسر توده تشکیل شود. در نیمه IPN یا شبه IPN یکی از لایه‌ها (پلیمر) شبکه‌ای و دیگری خطی یا شاخه‌دار است [۶].

۳ روش‌های میرایی پلیمرها

برای پلیمرها دو روش میرایی کششی (Extensional Damping) و میرایی لایه محدودشده (Constrained layer Damping) وجود دارد. میرایی کششی، پوششی سطحی از ماده گرانروکشسان بر روی بستر ارتعاشی است. این روش به اندازه روش میرایی لایه محدود موثر نیست، اما اعمال آن ارزان‌تر است. لایه محدود علاوه بر اتلاف انرژی‌های خمشی و کششی، انرژی برشی را نیز اتلاف می‌کند. سامانه‌های کششی در دماهای پایین (بسامدهای بالا) و سامانه‌های لایه میرایی محدود در دماهای بالا (بسامدهای پایین) عملکرد بهتری دارند [۷].



(ب)



(الف)

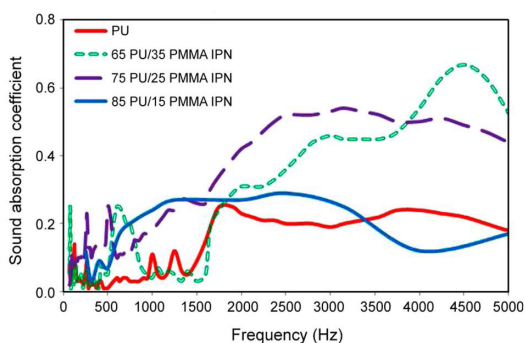
شکل ۲ منحنی $\tan \delta$ برحسب دما برای فیلم های IPN بر پایه پلی یورتان-پلی متیل متاکریلات (الف) و اسفنج های IPN پلی یورتان-پلی-متیل متاکریلات (ب) در نسبت های وزنی مختلف [۸ و ۹]

با همان نسبت وزنی، بیشترین ضریب جذب صوت حدوداً ۰/۲۵ است [۸ و ۹].

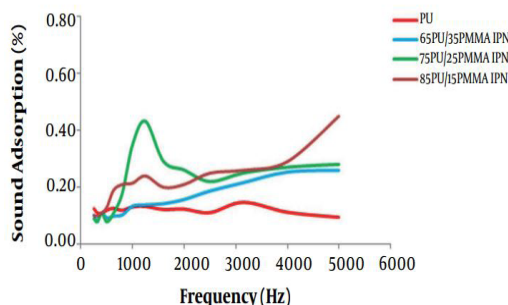
۴-۱-۲ ساختار گرادینانی

پلیمرهای میراگر بر روی بسترهای مختلفی نصب می شوند. با این حال، عدم سازگاری مدول بین پلیمر و بستر ممکن است سبب ایجاد برخی مشکلات مانند تمرکز تنش و شکست اتصال بعد از دوره ارتعاش شود. مواد با ساختار گرادینانی (ترکیب هایی با تغییرات پیوسته خواص از یک سمت به سمت دیگر) و درجه

ساختار متخلخل، اندازه و تعداد تخلخل ها نقش کلیدی را در میرایی ایفا می کنند. به همین دلیل است که در شکل ۲-ب با وجود تغییر در نسبت های وزنی، محدوده میرایی تغییر زیادی نمی کند. شکل ۳ نتایج آزمون لوله امیدانس را نشان می دهد. قابلیت جذب امواج صوتی در محدوده فرکانسی بیشتر و ضریب جذب صوتی بیشتر دو عامل برتری IPN های با ساختار متخلخل نسبت به فیلم های IPN هستند. به طور مثال در نمونه اسفنج IPN با نسبت وزنی ۶۵/۳۵ PU/PMMA بیشترین ضریب جذب صوت حدوداً ۰/۷ است. در حالی که در نمونه فیلم IPN



(ب)



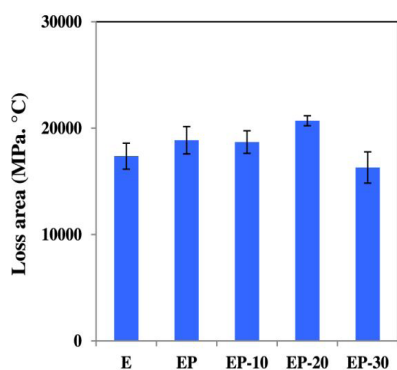
(الف)

شکل ۳ منحنی ضریب جذب صوت برحسب فرکانس برای فیلم های IPN پلی یورتان-پلی متیل متاکریلات (الف) و اسفنج های IPN پلی-یورتان-پلی متیل متاکریلات (ب) در نسبت های وزنی مختلف [۸ و ۹]

دارای تعادل مناسبی بین محدوده دمای میرایی و فاکتور اتلاف است. همچنین دارای استحکام کافی در محدوده دمای کاری است [۱۰].

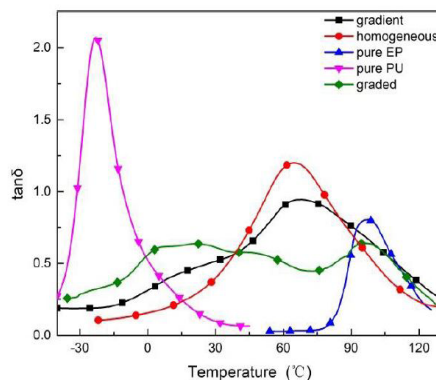
۴-۲ آمیزه‌سازی

به منظور بررسی اثر آمیزه‌سازی بر خاصیت میرایی IPN، رودسری و همکاران [۱۱] اثر افزودن پلی پروپیلن-کربنات (Poly(Propylene Carbonate) (PPC)) در IPN بر پایه اپوکسی/پلی فورفوریل الکل (Poly(Furfuryl Alcohol)) (PFA)) را بررسی کردند. آن‌ها PPC (۱۰، ۲۰ و ۳۰ phr) را به شبکه درهم تنیده اضافه کردند. نتایج آزمون دینامیکی- مکانیکی نشان می‌دهد افزودن PPC به ماتریس اپوکسی/ پلی فورفوریل الکل باعث کاهش دمای T_g و پهن تر شدن قله میرایی می‌شود. کاهش دمای T_g مربوط به کاهش چگالی پیوندهای عرضی و اثر نرم‌کنندگی زنجیرهای PPC است. به منظور بررسی کمی خاصیت میرایی نمونه‌ها، سطح زیر منحنی مدول اتلافی محاسبه شده است. سطح اتلافی می‌تواند به عنوان مشخصه بهتری برای مقایسه خصوصیات میرایی در نظر گرفته شود، زیرا محصولات مهندسی در طیف وسیعی از دماها و نه بازه دمایی خاصی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود خواص میرایی IPN‌ها با افزودن PPC بهبود می‌یابد؛ زیرا حضور زنجیرهای نرم PPC در ماتریس شکننده IPN باعث جذب انرژی می‌شود. لیکن باید به این نکته توجه داشت که استفاده از PPC



شکل ۵ نمودار سطح اتلافی نمونه‌ها (E: اپوکسی، IPN: EP بر پایه اپوکسی / پلی فورفوریل الکل، EP-10: IPN حاوی ۱۰ phr از PPC، EP-20: IPN حاوی ۲۰ phr از PPC، EP-30: IPN حاوی ۳۰ phr از PPC [۱۱].

بندی (Graded Material) (موادی با تغییر تدریجی ترکیب و ساختار که باعث تغییر در خواص ماده می‌شود) می‌تواند برخی از نواقص متداول کامپوزیت‌ها مانند تغییر ناگهانی توزیع تنش در نقاط اتصال و مقاومت کم در برابر شوک‌های دمایی را کاهش دهند. شکل ۴ منحنی فاکتور اتلاف بر حسب دما برای اپوکسی، پلی یورتان و سه نوع IPN با ساختار همگن، گرادیان پیوسته و درجه بندی را نشان می‌دهد. بهترین عملکرد میرایی اپوکسی و پلی یورتان به ترتیب تقریباً در دمای ۱۹/۵- و ۹۷/۶- درجه سانتی‌گراد است که نشان می‌دهد به تنهایی برای استفاده به عنوان میراگر مناسب نیستند. به منظور بهبود محدوده دمای میرایی می‌توان از IPN‌ها استفاده کرد. محدوده دمای میرایی IPN همگن اپوکسی پلی یورتان بین ۲۳/۲- تا ۱۱۶/۷- درجه سانتی‌گراد است که می‌تواند به عنوان پلیمر میراگر مرسوم مورد استفاده قرار گیرد. با این حال در این محدوده دمایی، مدول ذخیره آن برای ایجاد استحکام به اندازه کافی زیاد نیست. برای حل این مشکل می‌توان چندین لایه IPN با دماهای انتقال شیشه‌ای مختلف را به هم متصل کرد که به آن IPN درجه بندی شده می‌گویند. نتایج بررسی‌های دینامیکی- مکانیکی نشان می‌دهد که محدوده دمای میرایی IPN گرادیان نسبت به دو نوع ساخته شده دیگر، پهن تر و از ۲۵/۸- تا ۱۲۰/۷- درجه سانتی‌گراد است. با این حال مقدار $\tan \delta$ آن نسبت به دیگر IPN‌ها کمتر (کمتر از ۰/۶۵) است. IPN گرادیان



شکل ۴ منحنی های $\tan \delta$ بر حسب دما برای اپوکسی، پلی یورتان و سه نوع IPN. آزمون تحت نیروی برشی از ۴۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمایی ۱/۵ °C/min انجام شده است [۱۰].

انتخابی به مقدار امتزاج پذیری و جدایی فازی IPN ها وابسته است. عموماً وجود قله پهن نشان می دهد که فازها کاملاً همگن نیستند. اختلاف دماهای انتقال شیشه ای دو پلیمر بر روی پهنای قله تأثیرگذار است. در سامانه ای با امتزاج پذیری جزئی، اختلاف دمای انتقال شیشه ای حدود ۵۰ درجه سانتی گراد بین دو پلیمر می تواند محدوده دمایی در حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد ایجاد کند. اگر اختلاف T_g ها بیشتر از این مقدار شود، پهنای قله افزایش ولی ارتفاع آن کاهش یافته، بنابراین قدرت میرایی کاهش می یابد.

۴-۵ نسبت وزنی مونومرهای تشکیل دهنده IPN

یکی از عوامل تأثیرگذار بر میرایی IPNها، نسبت وزنی مونومرهای تشکیل دهنده IPNها است. در ادامه به بررسی برخی مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است.

۴-۵-۱ نسبت وزنی مونومرهای تشکیل دهنده

شبکه دوم

IPN برپایه پلی یورتان/ پلی (متیل متاکیلات- بوتیل متاکیلات-۲، هیدروکسی اتیل متاکیلات) Polyurethane/poly(methylacrylate-butylmethacrylate)-2-Hydroxyethylmethacrylate)PU/P(MMA-BMA-HEMA)) به روش سنتز ترتیبی تهیه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش مقدار متیل متاکیلات، فاکتور اتلاف نیز افزایش می یابد. گروه های جانبی متیل متاکیلات به شدت اصطکاک بین مولکول ها را افزایش می دهند. اما گروه های استری در بوتیل متاکیلات موجب افزایش حجم آزاد بین مولکولی می شوند. همچنین گروه

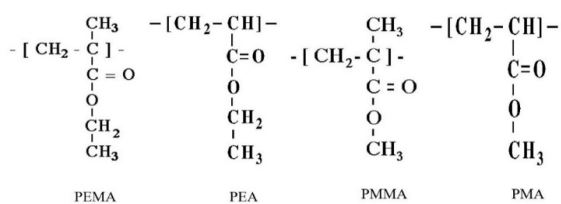
دارای مقدار بهینه است. نمونه EP-20 (IPN حاوی ۲۰ phr از PPC) بیشترین سطح اتلافی را دارد.

۴-۳ شاخه دار شدن

IPN شاخه دار پلی یورتان/ پلی (متیل متاکیلات- بوتیل متاکیلات - استایرن) (Polyurethane (PU)/Poly)) (Methyl Methacrylate-butyl Methacrylate-styrene) (PA با نسبت ۶۰ به ۴۰ توسط فانگ و همکاران [۱۲] ساخته شده است. در پلی یورتان مذکور، روغن کرچک (Castor Oil) به عنوان عامل شاخه دار شدن (Branch Units) پلی یورتان عمل می کند. نتایج نشان می دهد با افزایش مقدار روغن، قله ها به یکدیگر نزدیک تر می شوند. طبق نظریه حجم آزاد در مقادیر پایین روغن، به دلیل حجم آزاد بالا، زنجیرهای پلیمری آزادی عمل بیشتری دارند. با افزایش مقدار روغن، درهم روندگی افزایش یافته، منجر به سازگاری اجباری می شود.

۴-۴ نوع اجزای تشکیل دهنده IPN

چن و همکاران [۱۳] به منظور بررسی اثر نوع اجزای تشکیل دهنده بر میرایی IPNها چهار نمونه با مونومرهای مختلف در شبکه دوم تهیه کردند. در همه نمونه ها شبکه اول شامل پلی یورتان و برای ساخت شبکه دوم از مونومرهای متیل متاکیلات ((Methyl Methacrylate))، اتیل متاکیلات ((Ethyl Methacrylate (EMA))، متیل اکریلات ((Methyl Acrylate (MA)) و اتیل اکریلات ((Ethyl Acrylate (EA)) استفاده شده است. در همه نمونه ها به جز PU/PMA محدوده دمای میرایی بیشتر از ۱۰۰ سانتی گراد است. با توجه به شکل ۶، زنجیر اصلی همه پلیمرهای شبکه دوم یکسان است اما زنجیر جانبی متفاوتی دارند. پلیمرها با زنجیرهای جانبی بلند نسبت به پلیمرها با زنجیرهای جانبی کوتاه انعطاف پذیرتر هستند و به عنوان رقیق کننده عمل کرده، حرکت زنجیر اصلی را آسان تر می کنند. در نتیجه موجب کاهش دمای انتقال شیشه ای می شوند. مقادیر فاکتور اتلاف PU/PMA و PU/PEA بیشتر از PU/PMMA است. زیرا عدم اتصال گروه اتیل در نمونه های PEA و PEMA به زنجیر اصلی موجب آزادی عمل بیشتر این گروه و حرکت بهتر زنجیر اصلی می شود. ارتفاع و پهنای قله ناحیه انتقال شیشه ای علاوه بر نوع مواد



شکل ۶ ساختار اجزای شبکه دوم IPN بر پایه PU/PA [۱۳].

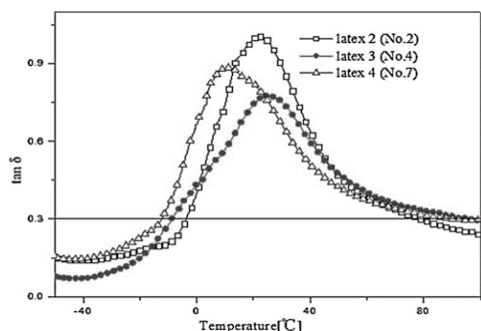
فاکتور اتلاف بیشینه ($\tan \delta \max$) کاهش و محدوده دمایی میرایی موثر پهن تر می‌شود.

۴-۶ اثر عامل شبکه‌ای کننده

اثر عامل شبکه‌ای کننده بر میرایی را می‌توان از سه جهت از جمله استفاده یا عدم استفاده، نوع و مقدار آن مورد بررسی قرار داد.

۴-۶-۱ اثر حضور عامل شبکه‌ای کننده

به منظور بررسی اثر عامل شبکه‌ای کننده بر خواص میرایی LIPN بر پایه استایرن-بوتیل اکریلات از سه نمونه بدون عامل شبکه‌ای کننده و سه نمونه با عامل شبکه‌ای کننده دی‌وینیل بنزن (Divinylbenzene (DVB)) با تعداد لایه‌های مختلف (از دو لایه تا چهار لایه) استفاده شده است. شکل ۷-الف منحنی فاکتور اتلاف بر حسب دما برای لاتکس‌های IPN بر پایه استایرن-بوتیل اکریلات بدون عامل شبکه‌ای کننده است. قله‌های مجزا نشان‌دهنده جدایی فازی بین لایه‌ها است. با افزایش تعداد لایه‌ها (از لاتکس ۲' به لاتکس ۴') قله T_g به دماهای پایین‌تر انتقال پیدا می‌کند. شکل ۷-ب منحنی فاکتور اتلاف لاتکس‌های IPN با عامل شبکه‌ای کننده را نشان می‌دهد. با اضافه کردن عامل شبکه‌ای کننده به دلیل افزایش امتزاج پذیری لایه‌ها تنها یک قله T_g مشاهده می‌شود [۱۶].



(ب)

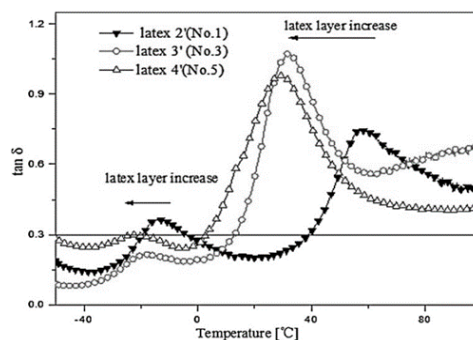
بلند استری در هیدروکسی اتیل متاکریلات اثر هم‌افزایی مثبتی دارد. در نتیجه با افزایش مقدار متیل-متاکریلات در شبکه دوم، میرایی افزایش می‌یابد [۱۴].

۴-۵-۲ نسبت وزنی شبکه اول به شبکه دوم

لی و همکاران [۱۵] به منظور کنترل ارتعاشات و صداها ناشی از ماشین آلات، نیمه IPN بر پایه پلی‌آمید/اپوکسی را تهیه کرده‌اند. با افزایش مقدار پلی‌آمید، دمای انتقال شیشه‌ای افزایش ولی مقدار قله فاکتور اتلاف کاهش می‌یابد. همچنین محدوده دمایی میرایی موثر نیز پهن تر می‌شود. این نتیجه احتمالاً به دلیل افزایش گره‌خوردگی فیزیکی (Physical Entanglement) و برهم‌کنش پیوند هیدروژنی زنجیره‌های انعطاف پذیر پلی‌آمید و شبکه اپوکسی با افزایش مقدار است.

۴-۵-۳ دمای انتقال شیشه‌ای لایه‌ها

چن و همکاران [۱۶] با سنتز LIPN چهار لایه از مونومرهای استایرن و بوتیل اکریلات با ترکیب درصد مختلف مونومرها در هر لایه و یکسان نگه داشتن نسبت وزنی بین لایه‌ها، نمونه‌هایی با دماهای انتقال شیشه‌ای مختلف تهیه کرده‌اند. با افزایش دمای انتقال شیشه‌ای هسته (لایه اول، دوم و سوم) و ساختار گردانی آن، سازگاری لایه‌ها کاهش می‌یابد. در نتیجه مقدار



(الف)

شکل ۷ منحنی فاکتور اتلاف بر حسب دما برای نمونه‌های LIPN بر پایه استایرن-بوتیل اکریلات با تعداد لایه‌های مختلف (از دو لایه تا چهار لایه) بدون عامل شبکه‌ای کننده (الف) عامل شبکه‌ای کننده (ب) [۱۶].

جدول ۱ اثر نوع عامل شبکه‌ای‌کننده بر خواص میرایی LIPN بر پایه پلی‌استایرن-اکریلونیتریل/پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات ((P(St-AN)/P(nBA-EA)) [۱۷]

نوع عامل شبکه‌ای‌کننده	Tan δ_{\max}	محدوده دمای میرایی (°C)
TMTPA	۰/۵۶۲	۳۳/۷
DVB	۰/۵۸۱	۸۳/۱
DEGDA	۰/۵۴۷	۵۹/۲

۴-۶-۲ اثر نوع عامل شبکه‌ای‌کننده

میرایی LIPN بر پایه پلی‌متیل متاکریلات-اکریلونیتریل / پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات P(MMA-AN)/P(EA-nBA) با نسبت وزنی ۴۰/۶۰ را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده از ۰/۲ به ۰/۸ درصد وزنی، قله T_p به دماهای بالاتر انتقال پیدا می‌کند. با افزایش مقدار TMTPA، اختلاط مولکولی بهبود و اندازه دامنه فازها کاهش می‌یابد. با این حال افزایش بیش از حد مقدار TMTPA منجر به محدود شدن نفوذ و درهم‌روندگی شبکه‌ها در یکدیگر می‌شود. در نتیجه محدوده دمای میرایی کاهش می‌یابد [۱۸].

۴-۶-۴ اثر مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده در هر شبکه

اثر مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده TMPTA بر میرایی LIPN بر پایه پلی‌استایرن/پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات PS/P(EA-nBA) در هر شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸-الف مقدار TMPTA در شبکه پلی-استایرن متغیر و در شبکه پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات ثابت است. تغییر مقدار TMPTA در شبکه اول بر خواص میرایی لانتکس تأثیر چندانی ندارد. اما همان‌طور که

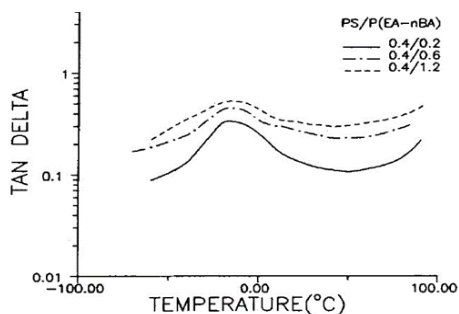
جدول ۱ نتایج آزمون دینامیکی-مکانیکی سه نمونه از LIPN بر پایه پلی‌استایرن-اکریلونیتریل/پلی بوتیل اکریلات اتیل اکریلات ((P(St-AN)/P(nBA-EA)) را نشان می‌دهد. تفاوت نمونه‌ها در نوع عامل شبکه‌ای‌کننده به کار رفته شامل دی‌وینیل بنزن (DVB)، تری‌متیل پروپان تری اکریلات (Trimethylpropane Triacrylate (TMTPA))، دی‌اتیل گلیکول دی‌اکریلات ((Diethylene Glycol (DEGDA) Diacrylate)) با نسبت‌های وزنی یکسان است. نتایج نشان می‌دهد به دلیل اثرات فضایی حلقه فنیل در ساختار دی‌وینیل بنزن و ایجاد سختی و همچنین وجود تعداد مولکول‌های بیشتر نسبت به دو عامل شبکه‌ای‌کننده دیگر (به دلیل تفاوت در وزن مولکولی عامل‌های شبکه‌ای‌کننده (TMPTA=296، DEGDA=236، DVB=130g/mol)) خاصیت میرایی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۷].

۴-۶-۳ اثر مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده

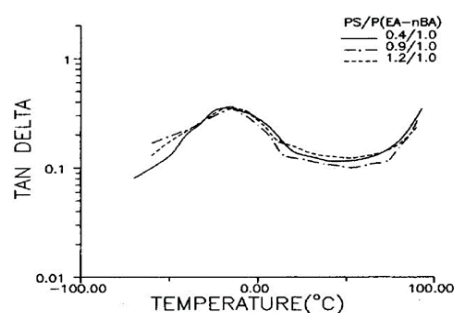
جدول ۲ اثر مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده تری‌متیل پروپان تری اکریلات (TMTPA) بر خواص

جدول ۲ اثر مقادیر مختلف عامل شبکه‌ای‌کننده TMPTA بر خواص میرایی LIPN پلی‌متیل متاکریلات-اکریلونیتریل / پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات P(MMA-AN)/P(EA-nBA) [۱۸]

مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده TMPTA	Tan δ_{\max}	محدوده دمای میرایی (°C)
۰/۲	۰/۴۴۱	۸۲/۲
۰/۴	۰/۴۷۷	۸۲/۷
۰/۸	۰/۴۹۷	۵۶



(ب)



(الف)

شکل ۸ اثر مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده بر میرایی LIPN بر پایه پلی استایرن/پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات PS/P(EA-nBA) در شبکه اول (الف) شبکه دوم (ب) [۱۹]

قابل توجهی نداشته اما مقدار فاکتور اتلاف را به شدت افزایش می‌دهد. با ایجاد حرارت، آغازگر آمونیوم-پرسولفات به SO_4^- با بار منفی تجزیه می‌شود. بافر دارای بار منفی با ایجاد نیروی دافعه، نفوذ دیگر رادیکال‌ها به ذرات در حال رشد برای اختتام سنتز را سخت تر می‌کند. اما در غیاب بافر یون‌های منفی سطح ذرات لاتکس توسط H^+ (زیرا مقدار pH کمتر از ۷ است) خنثی می‌شوند و ورود رادیکال‌های آزاد به ذرات لاتکس برای اختتام سنتز آسان تر می‌شود. در حضور بافر زمان سنتز افزایش یافته، در نتیجه زنجیرهای پلیمری طویل تری تشکیل شده، درجه گره خوردگی بیشتر می‌شود. بنابراین افزایش اصطکاک داخلی مولکول‌ها موجب افزایش مقدار میرایی می‌شود [۱۷].

۴-۸ ترکیب خوراک دهی مونومر

LIPN بر پایه پلی استایرن و پلی اکریلات با تغییر ترتیب خوراک دهی مونومرها به دو صورت PS/PA و PA/PS سنتز شده‌اند. سازگاری لاتکس PS/PA نسبت به دیگری بهتر است. زیرا پلی اکریلات آب دوست در سطح بیرونی ذرات لاتکس و در محیط آبی قرار گرفته است و باعث ایجاد زمینه پیوسته در فیلم می‌شود [۲۰].

۴-۹ اثر عامل انتقال به زنجیر

به منظور بررسی اثر عامل انتقال به زنجیر بر خواص میرایی از ۲ درصد وزنی لوریل مرکاپتان (Lauryl Mercaptan) به عنوان عامل انتقال به زنجیر در سامانه

در شکل ۸-ب دیده می‌شود، با افزایش مقدار TMPTA در شبکه دوم T_g به دماهای بالاتر انتقال پیدا می‌کند. همچنین پهنا و ارتفاع محدوده انتقال شیشه‌ای افزایش می‌یابد که باعث بهبود خواص میرایی لاتکس می‌شود. به طور کلی به نظر می‌رسد در IPN‌های ترتیبی، شبکه اول بر شبکه دوم برتری دارد و تغییرات مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده در شبکه اول تأثیرات بیشتری بر خواص میرایی IPN دارد. اگرچه LIPN را می‌توان جزء IPN‌های ترتیبی قلمداد کرد، اما به دلیل ساختار ویژه هسته-پوسته لاتکس‌ها، تأثیر مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده بر خواص دینامیکی-مکانیکی مشابه با IPN‌های ترتیبی نیست. در طول سنتز لاتکس، شبکه دوم بعد از شبکه اول سنتز می‌شود، بنابراین شبکه دوم بیشتر در پوسته و شبکه اول بیشتر در هسته است. بعد از خشک کردن لاتکس و تشکیل فیلم، شبکه دوم بیشتر به شکل فاز پیوسته است. بنابراین تغییر مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده در شبکه دوم نسبت به شبکه اول بر خواص میرایی تأثیرگذارتر است [۱۹].

۴-۷ اثر بافر

تغییرات pH بر پایداری ذرات و خواص میرایی LIPN تأثیرگذار است. استفاده از آغازگر آمونیوم پرسولفات (Ammonium Persulfate (APS)) موجب کاهش مقدار pH محیط سنتز می‌شود. بنابراین از سدیم بی کربنات به عنوان بافر برای کمک به پایداری سامانه استفاده می‌شود. حضور بافر بر روی دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) تأثیر

۴-۱۱ قطبیت

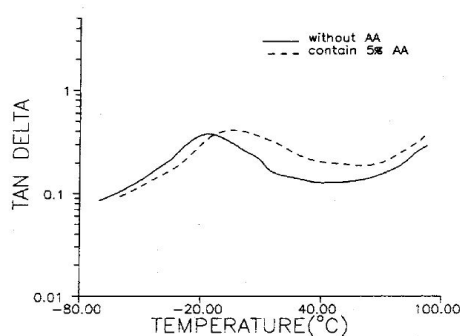
شکل ۱۰ اثر افزودن ۵ درصد وزنی مونومر قطبی اکریلیک اسید (Acrylic Acid) بر خواص میرایی LIPN بر پایه پلی استایرن/ پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات (PS/P(EA-nBA)) نسبت وزنی ۴۰/۶۰ را نشان می دهد. با افزودن مونومر قطبی اکریلیک اسید، قله T_g به دماهای بالاتر انتقال پیدا می کند. همچنین محدوده دمایی میرایی و فاکتور اتلاف افزایش می یابد. قطبیت موجب افزایش نفوذ مولکولی و گره خوردگی متقابل بین شبکه ها می شود. در نتیجه اصطکاک بین زنجیرهای پلیمری افزایش و خواص میرایی سامانه بهبود می یابد [۱۹].

۴-۱۲ اثر نوع IPN

جیمز و همکاران [۲۲] به منظور ساخت میراگر ارتعاشات، شبکه پلیمری درهم تنیده بر پایه استایرن بوتادین رابر (Styrene Butadiene Rubber) / پلی متیل متاکریلات سنتز کرده اند. در IPN، SBR و PMMA هر دو شبکه ای شده اند؛ ولی در نیمه IPN فقط SBR شبکه ای شده است. اختلاط بهتر فاز پلی متیل متاکریلات خطی در SBR شبکه ای شده باعث انعطاف پذیری بیشتر سامانه، در نتیجه افزایش خاصیت میرایی می شود.

۴-۱۳ درصد تبدیل

شکل ۱۱ منحنی فاکتور اتلاف بر حسب دمای شبکه پلیمری درهم تنیده دی اتیلن گلیکول - بیس - آلایل کربنات

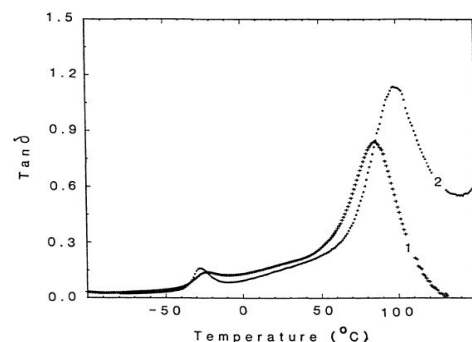


شکل ۱۰ اثر افزودن ۵ درصد وزنی مونومر قطبی اکریلیک اسید بر خواص میرایی LIPN بر پایه پلی استایرن/ پلی بوتیل اکریلات-اتیل اکریلات (PS/P(EA-nBA)) (خط تیره، لانتکس بدون اکریلیک اسید- نقطه چین، لانتکس با ۵ درصد وزنی اکریلیک اسید) [۱۹].

LIPN بر پایه P(MMA-AN)/P(EA-nBA) استفاده شده است. استفاده از عامل انتقال به زنجیر باعث انتقال قله دمای انتقال شیشه ای به دماهای کمتر، افزایش مقدار فاکتور اتلاف ($\tan \delta$) و همچنین کاهش وزن مولکولی پلیمر می شود. با توجه به این که عامل انتقال به زنجیر قبل از سنتز به سامانه اضافه شده است، تأثیر بیشتری بر کاهش وزن مولکولی شبکه اول نسبت به شبکه دوم داشته و به دلیل تضعیف نیروی برهم کنش بین زنجیرها موجب کاهش T_g و محدوده دمای میرایی می شود. بدین ترتیب در هنگام سنتز شبکه دوم، مونومر دوم به دلیل وزن مولکولی کم شبکه اول راحت تر به شبکه اول نفوذ می کند و باعث افزایش میرایی شبکه دوم می شود [۱۸].

۴-۱۰ نوع آغازگر

شکل ۹ منحنی فاکتور اتلاف بر حسب دما برای نیمه IPN بر پایه پلی اتیل متاکریلات/ پلی بوتیل اکریلات (PEMA/PnBA) سنتز شده توسط آغازگر حرارتی (Thermal Initiator) آمونیوم پرسولفات در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و آغازگر اکسایش-کاهش (Redox Initiator) آمونیوم پرسولفات-سدیم متابیسولفات (Sodium Metabisulfite) در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهد. استفاده از آغازگر اکسایش-کاهش موجب افزایش محدوده دمای میرایی و مقدار فاکتور اتلاف می شود [۲۱].

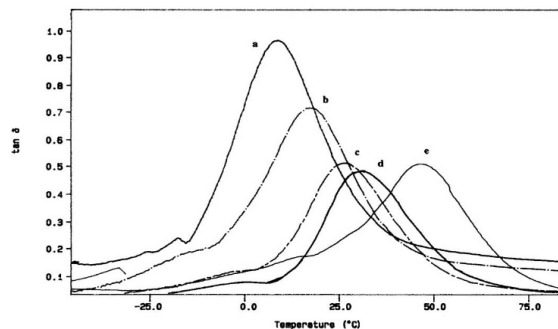


شکل ۹ منحنی فاکتور اتلاف بر حسب دما نیمه IPN بر پایه پلی اتیل متاکریلات/ پلی بوتیل اکریلات (PEMA/PnBA) تهیه شده با (۱) آغازگر حرارتی (۲) آغازگر اکسایش در فرکانس ۱۰ هرتز [۲۱].

دمای انتقال شیشه‌ای نیز افزایش می‌یابد [۲۳].

۵ نتیجه‌گیری

صدا و ارتعاش یکی از رایج‌ترین و شایع‌ترین عوامل زیان‌آور محیطی در جهان امروز محسوب می‌شود. مواجهه شغلی با صدا، سلامت بسیاری از کارکنان را تهدید می‌کند. یکی از روش‌های کاهش صوت و ارتعاش، استفاده از مواد میراگر است. پوشش‌های از نوع شبکه‌های پلیمری درهم‌تنیده (IPN) می‌توانند راه‌حل مناسبی برای کاهش صداهای مزاحم باشند. میرایی این پوشش‌ها تحت تأثیر عواملی همچون نوع IPN، نوع و مقدار مونومر، ترتیب خوراک‌دهی، نوع و مقدار عامل شبکه‌ای‌کننده، قطبیت، نوع و مقدار آغازگر، محیط سنتز، بافر، عامل انتقال به زنجیر و غیره است. بنابراین توجه به موارد یاد شده از اهمیت زیادی برخوردار و در کنترل خواص نهایی IPN موثر است.



شکل ۱۱ منحنی فاکتور اتلاف بر حسب دمای شبکه پلیمری درهم‌تنیده دی‌اتیلن گلیکول-بیس-آلیل کربنات/متیل متاکریلات (۵۰/۵۰) در درصد تبدیل‌های ۴۴ (a)، ۵۷ (b)، ۷۲ (c)، ۷۵ (d) و ۸۰ (e) [۲۳]

(Di ethylene Glycol-bis-allyl Carbonate) /متیل متاکریلات در درصد تبدیل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد تبدیل به علت مصرف مونومرها و افزایش چگالی پیوندهای عرضی،

مراجع

- Héritier H., Vienneau D., Foraster M., Eze I.C., Schaffner E., de Hoogh K., Thiesse L., Rudzik F., Habermacher M., Köpfl M. and Pieren R., "A Systematic Analysis of Mutual Effects of Transportation Noise and Air Pollution Exposure on Myocardial Infarction Mortality: A Nationwide Cohort Study in Switzerland," *European Heart Journal*, 40, 598–603, **2019**.
- Sperling L.H., Fay J.J., "Factors Which Effect the Glass tranSition and Damping Capability of Polymers," *Polymers for Advanced Technologies*, 2, 49–56, **1991**.
- Van Krevelen D.W., Te Nijenhuis K., "Properties of Polymers," Elsevier Science, Netherlands, **2009**.
- Sperling L.H., Hu R., "Interpenetrating Polymer Networks and Related Materials", Springer Science & Business Media, Germany, **2012**.
- Deepalakshmi P., Visakh P.M., Mathew A.P., Chandra A.K., Thomas S., "Advances in Elastomers I", Springer, Germany, **2013**.
- Sperling L.H., Mishra V.B.A.T., "The Current Status of Interpenetrating Polymer Networks," *Polymers for Advanced Technologies*, 7, 197–208, **1996**.
- Klempner D., Sperling L.H., Utracki, L.A., "Interpenetrating Polymer Networks", ACS Publications, USA, **1994**.
- Moradi G., Nassiri P., Ershad-Langroudi A., Monazzam M.R., "Acoustical, Damping and Thermal Properties of Polyurethane/poly(Methyl Methacrylate)-based Semi-Interpenetrating Polymer Network Foams", *Plastics, Rubber and Composites*, 47, 221–231, **2018**.
- Moradi G., Nassiri P., Ershad-Langroudi A., Monazzam M.R., "Preparation of Sound Absorption Material Based on Interpenetrating Polymer Network (PU/PMMA IPN)," *Health Scope*, 7, 1-7, **2019**.
- Lv X., Huang Z., Shi M., Fan Y., Gao G., "Composition Distribution, Damping and Thermal Properties of the Thickness-continuous Gradient Epoxy/Polyurethane Interpenetrating Polymer Networks," *Applied Sciences*, 7, 135-148, **2017**.
- Roudsari G.M., Mohanty A.K., Misra M., "Exploring the Effect of Poly(propylene carbonate) Polyol in a Biobased Epoxy Interpenetrating Network," *ACS Omega*, 2, 611–617, **2017**.
- Fang Z., Dong Q.Z., "Preparation, Damping and Thermal Properties of Caſtor Oil-Based Polyurethane/Poly(Methyl Methacrylate-Butyl Methacrylate-Styrene) Grafted Interpenetrating Polymer Networks," *Advanced Materials Research*, 1096, 455–464, **2015**.
- Chen Q., Ge H., Chen D., He X., Yu X., "Investigation on Damping Behavior and Morphology of Polyurethane/poly-methacrylates and Polyacrylates Interpenetrating Polymer Networks," *Journal of Applied Polymer Science*, 54, 1191–1197, **1994**.
- Song G.J., Liu M.J., Yi J., Xu Y.G., "Damping Property of Polyurethane/poly(methylmethacrylate-butylmethacrylate-2-Hydroxyethyl methacrylate) Interpenetrating Polymer Networks," *Advanced Materials Research*, 430, 297–300, **2012**.
- Qu C., Li X., Yang Z., Zhang X., Wang T., Wang Q., Chen S., "Damping, Thermal, and Mechanical Performances of a Novel Semi-interpenetrating Polymer Networks Based on Polyimide/epoxy," *Journal of Applied Polymer Science*, 136, 32-41, **2019**.
- Xu C., Qiu T., Deng J., Meng Y., He L., Li X., "Dynamic Mechanical Study on Multilayer Core-shell Latex for Damping Applications," *Progress in Organic Coatings*, 74, 233–239, **2012**.
- Li S., Zeng W., "Effect of Crosslinker, Buffer, and Blending on Damping Properties of Poly(styrene-acrylonitrile)/Poly(ethyl Acrylate- n-butyl Acrylate) Latex Interpenetrating Polymer Networks," *Journal of Applied Polymer Science*, 84, 2347–2351, **2002**.
- Li S., Qiu Q., Järvelä P., "Studies on Damping Properties of P(MMA-AN)/P(EA-nBA) LIPNs," *Journal of Applied Polymer Science*, 76, 722–727, 2000.
- Weijiang P., Shucai L., "Studies on Damping Behavior of PS/P(EA□nBA) LIPNs," *Journal of Applied Polymer Science*, 58, 967–971, **1995**.
- Li Y., Liu R., Wang J., Tang X., "The Use of Polystyrene/ Polyacrylate Latex Interpenetrating Networks in Coatings for Damping Noise and Vibrations," *Progress in Organic Coatings*, 21, 101–107, **1992**.
- Corsaro R.D., Sperling L.H., "Sound and Vibration Damping with Polymers", ACS Publications, USA, **1990**.
- James J., Thomas G.V., Pramoda K.P., Kalarikkal N., Thomas S., "Thermoplastic-Elastomer Composition Based on an Interpenetrating Polymeric Network of styrene Butadiene Rubber-poly(methyl methacrylate) as an Efficient Vibrational Damper," *New Journal of Chemistry*, 42, 1939–1951, **2018**.
- Hill D.J.T., Perera M.C.S., Pomery P.J. "Dynamic Mechanical Properties of Homopolymers and Interpenetrating Networks Based on Diethylene Glycol-bis-allyl Carbonate," *Polymer*, 39, 5075–5083, **1998**.