

## خواص مکانیکی دینامیکی و گرمایی کامپوزیت‌های هیبریدی باگاس/الیاف شیشه/پلی‌پروپیلن

### چکیده

این پژوهش به منظور ارزیابی خواص گرمایی و مکانیکی دینامیکی کامپوزیت‌های هیبریدی باگاس/الیاف شیشه/پلی‌پروپیلن انجام شد. کامپوزیت‌های هیبریدی با روش اختلاط مذاب ساخته شدند و خواص آن‌ها با آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) و آزمون مکانیکی دینامیکی (DMA) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی مشخص کرد که با افزودن باگاس و الیاف شیشه، دمای ذوب و دمای بلورینگی به دماهای بالاتر انتقال یافت و درجه بلورینگی افزایش پیدا کرد. این یافته‌ها آشکار ساخت که باگاس و الیاف شیشه نقش عامل هسته‌زا را در کامپوزیت ایفا می‌کنند. آزمون مکانیکی دینامیکی نشان داد که با وارد کردن باگاس و الیاف شیشه به ماتریس پلی‌پروپیلن، مدول ذخیره ( $E'$ ) و مدول اتلاف ( $E''$ ) افزایش یافته، در حالی که از فاکتور اتلاف ( $\tan\delta$ ) کاسته شد. به منظور ارزیابی اثر تقویت‌کنندگی با افزایش دما، ضریب اثربخشی (C) در دامنه‌های دمایی مختلف محاسبه و مشخص شد که در دماهای بالا بهبود خواص مکانیکی در اثر حضور الیاف، ملموس‌تر است. کیفیت چسبندگی الیاف-ماتریس با محاسبه فاکتور چسبندگی (A) بر حسب فاکتور اتلاف کامپوزیت ( $\tan\delta_c$ )، فاکتور اتلاف پلیمر ( $\tan\delta_p$ ) و جزء حجمی الیاف ( $\Phi_f$ ) تعیین شد. مقادیر محاسبه شده فاکتور چسبندگی (A) نشان داد که با افزودن الیاف شیشه به سیستم باگاس/پلی‌پروپیلن، چسبندگی الیاف-ماتریس بهبود می‌یابد. کامپوزیت هیبریدی متشکل از ۲۵ درصد باگاس و ۱۵ درصد الیاف شیشه، چسبندگی الیاف-ماتریس بهتری را بروز داد.

**واژگان کلیدی:** آنالیز مکانیکی - دینامیکی، الیاف شیشه، باگاس، ضریب اثربخشی، فاکتور چسبندگی، کامپوزیت هیبریدی.

مهدی روحانی<sup>۱</sup>  
بهزاد کرد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار علوم و صنایع چوب و کاغذ، گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار علوم و صنایع چوب و کاغذ، گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

مسئول مکاتبات:

[mroohani@standard.ac.ir](mailto:mroohani@standard.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۱۷

کاربردهای متنوع پدید آورده است که می‌توانند به‌عنوان جایگزین مناسب برای مواد متداول نظیر فلزات و چوب مورد استفاده قرار گیرند [۲]. در این زمینه کامپوزیت‌های حاصل از پلیمرهای گرماترم و الیاف طبیعی به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۳]. الیاف

### مقدمه

طی سال‌های اخیر رشد فزاینده‌ای در زمینه تولید و مصرف کامپوزیت‌های حاصل از پلیمرهای گرماترم به وجود آمده است [۱]. اختلاط پلیمرها با الیاف مختلف، گستره وسیعی از کامپوزیت‌ها با خواص ویژه برای

شرایط کاربرد نهایی در معرض تنش‌های دینامیکی مختلفی قرار می‌گیرند، مطالعه خواص ویسکوالاستیک آن‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در حقیقت خواص دینامیکی کامپوزیت‌های پلیمری اهمیت کاربردی بالایی دارند، به‌ویژه اگر این خواص در گستره وسیعی از فرکانس و دما تعیین شده باشند [۱۵]. آنالیز مکانیکی دینامیکی به‌طور وسیع برای مطالعه ساختار و رفتار ویسکوالاستیک مواد و کامپوزیت‌های پلیمری مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱-۱۵]. این روش استحکام و میرایی کامپوزیت‌ها را برای کاربردهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

این تحقیق با هدف ارزیابی خواص گرمایی و مکانیکی دینامیکی کامپوزیت‌های هیبریدی حاصل از اختلاط باگاس و الیاف شیشه در ماده زمینه پلی‌پروپیلن طراحی شده است. تأثیر درصد ترکیب الیاف باگاس و شیشه بر روی خواص مکانیکی دینامیکی کامپوزیت در گستره دمایی مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین ضریب اثربخشی و فاکتور چسبندگی الیاف از روی مقادیر مدول ذخیره و فاکتور اتلاف محاسبه و مورد مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### مواد

در این تحقیق از پلی‌پروپیلن تولیدشده توسط شرکت پتروشیمی اراک با شاخص جریان مذاب ۱۸ گرم بر ده دقیقه و چگالی ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بانام تجاری V30S به‌عنوان ماده پلیمری و از مالئیک انیدرید پیوند شده با پلی‌پروپیلن (PP-g-MA) از محصولات شرکت بلژیکی Solvay با شاخص جریان مذاب ۶۴ گرم بر ده دقیقه و نام تجاری Priex 20070 به‌عنوان عامل سازگار کننده استفاده شد.

الیاف شیشه از نوع E-Glass با طول ۳ میلی‌متر از شرکت دیپا فایبرگلاس تهیه شد. باگاس خریداری شده از کارخانه هفت‌تپه خوزستان به‌عنوان ماده تقویت‌کننده استفاده شد. الیاف باگاس پس از انتقال به آزمایشگاه، توسط دستگاه آسیاب چکشی خرد شد و سپس از الک آزمایشگاهی برای جدا کردن آن‌ها استفاده شد. ذرات بین الک مش ۴۰ و

لیگنوسولوزی به دلیل سبکی، فراوانی، زیست‌سازگاری، دانسیته و قیمت پایین، مقاومت مکانیکی قابل قبول، ساینده‌گی نسبی پایین، بی‌خطری و زیست‌تخریب‌پذیری به‌عنوان عامل تقویت‌کننده مطلوب برای پلاستیک‌ها به‌شمار می‌روند [۴، ۵]. این دسته از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف خودروسازی، ساختمان‌سازی، مبلمان‌سازی، کابینت، نرده و کفپوش، پروفیل درب و پنجره، وسایل حمل‌ونقل و غیره کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. علی‌رغم مزایای فراوان اشاره‌شده برای الیاف طبیعی، خواص مکانیکی نسبتاً پایین، پایداری حرارتی کم، ترشوندگی ضعیف، دشواری پراکنش در ماده زمینه پلیمری و جذب رطوبت زیاد، دامنه کاربرد آن‌ها را با محدودیت مواجه ساخته است. در سال‌های اخیر برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها، رویکردهای جدیدی نظیر فوم‌دار کردن، اصلاح شیمیایی و هیبریداسیون با سایر پرکننده‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. کامپوزیت‌های هیبریدی موادی هستند که در آن از یک نوع تقویت‌کننده برای تقویت مخلوطی از چند ماتریس [۶، ۷] و یا از چند نوع تقویت‌کننده برای تقویت یک ماتریس و یا ترکیبی از هر دو حالت استفاده می‌شود [۸، ۹]. هرچند الیاف متعددی را می‌توان به سیستم هیبریدی اضافه نمود، اما سودمندترین حالت استفاده از ترکیب دو نوع الیاف است. از این رو هیبریداسیون امکان دستیابی به کامپوزیت‌هایی با خواص مورد انتظار را فراهم می‌سازد [۹]. به‌عبارت‌دیگر، با انتخاب دقیق نوع تقویت‌کننده و روش فرآورش، امکان طراحی مهندسی موادی با ویژگی‌های مناسب برای کاربردهای متعدد با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی فراهم می‌شود.

پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه به دلیل برخورداری از استحکام بالا و وزن پایین به‌طور گسترده‌ای در صنایع اتومبیل‌سازی و هوافضا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌منظور بهبود خواص در کامپوزیت‌های هیبریدی، از الیاف شیشه همراه با الیاف طبیعی استفاده شده است [۱۰]. اثر تقویت‌کنندگی الیاف شیشه در استفاده هم‌زمان با الیاف طبیعی نظیر چوب، کنف، کتان، بامبو، سیسال و آناناس گزارش شده است [۱۴-۱۰]. از آنجایی که کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، در

### آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

برای انجام این آزمون نمونه‌هایی با وزن تقریبی ۵ تا ۷ میلی‌گرم از تیمارهای مورد مطالعه تهیه، و سپس در محفظه‌های آلومینیومی کوچک به کمک پرس دستی فشرده و در دستگاه قرار داده شد. گرمادهی به صورت نا هم‌دما و به مقدار ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه به ترتیب زیر انجام شد.

- گرمادهی از ۲۵ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد
  - گرمادهی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه برای از بین بردن سابقه گرمادهی اولیه
  - خنک کردن از دمای ۳۰۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد
  - گرمادهی مجدد از ۲۵ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد.
- برای انجام این آزمون از دستگاه Netzsch مدل F2-Maia ساخت کشور آلمان استفاده شد. داده‌های اولین سرمایش و دومین مرحله گرمادهی برای تحلیل نتایج استفاده شدند. از روی الگوی گرمایی به دست آمده، دمای ذوب ( $T_m$ )، گرمای نهان ذوب ( $\Delta H_m$ ) و دمای بلورینگی ( $T_c$ ) تعیین شدند. میزان بلورینگی ( $X_c$ ) با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد [۵].

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 \times W} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $\Delta H_m$  گرمای نهان ذوب نمونه،  $\Delta H_m^0$  گرمای نهان ذوب PP صد درصد بلور (که ۱۳۸ ژول بر گرم در نظر گرفته شد) و  $W$  درصد وزنی پلیمر در چندسازه است.

مش ۶۰ برای استفاده در مراحل بعدی جدا شد. سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $102 \pm 3$  درجه سانتی‌گراد داخل گرمخانه قرار گرفت تا کاملاً خشک گردد.

### روش‌ها

#### فرآیند اختلاط و ساخت نمونه‌های آزمونی

فرآیند اختلاط مواد مطابق جدول ۱ توسط دستگاه مخلوط‌کن داخلی<sup>۱</sup> (مدل HBI System 90 ساخت شرکت آمریکایی Haake Buchler) در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۶۰ دور در دقیقه انجام شد. پس از اختلاط مواد، چندسازه بی‌شکل تولید شده پس از سرد شدن دوباره آسیاب شده و به دستگاه قالب‌گیری تزریقی<sup>۲</sup> نیمه‌صنعتی مدل EM80 ساخت شرکت اصلانین منتقل شد. در این دستگاه گرانول‌ها ابتدا ذوب شده و بعد با فشار زیاد به داخل قالب شلیک شدند. دمای سیلندر تزریق ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، فشار تزریق ۱۰۰ بار، زمان دوره تزریق ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد، در نهایت نمونه‌های آزمونی از قالب بیرون آورده شدند. برای حصول اطمینان از شرایط یکنواخت دمایی و رطوبتی، تمام نمونه‌های آزمونی استاندارد ساخته شده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰٪ به مدت یک هفته قرار داده شدند تا با رطوبت و دمای محیط به تعادل برسند.

جدول ۱- درصد وزنی اجزای تشکیل‌دهنده ترکیب تیمارهای مختلف

شماره تیمار	پلی پروپیلن (%)	باگاس (%)	الیاف شیشه (%)	سازگار کننده (%)
۱	۱۰۰	-	-	۰
۲	۵۷	۴۰	-	۳
۳	۵۷	۳۵	۵	۳
۴	۵۷	۳۰	۱۰	۳
۵	۵۷	۲۵	۱۵	۳

1- Hakke Internal Mixer

2- Injection Molding

$$\frac{\tan \delta_c}{\tan \delta_p} \cong (1 - \Phi_f) \times (1 + A) \quad (۴)$$

که

$$A = \left[ \frac{\Phi_i}{(1 - \Phi_f)} \right] \times \left( \frac{\tan \delta_i}{\tan \delta_p} \right)$$

با بازنویسی معادله ۴، فاکتور چسبندگی (A) را می‌توان بر اساس فاکتور اتلاف کامپوزیت ( $\tan \delta_c$ )، فاکتور اتلاف پلیمر ( $\tan \delta_p$ ) و جزء حجمی پرکننده ( $\Phi_f$ ) در دمای معین محاسبه کرد.

$$A = \frac{1}{(1 - \Phi_f)} \frac{\tan \delta_c}{\tan \delta_p} - 1 \quad (۵)$$

### نتایج و بحث

#### گرماسنجی روبشی تفاضلی

خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک، به شدت تحت تأثیر دماها و تنش‌های حرارتی که طی مرحله ساخت به آن اعمال می‌شود، قرار می‌گیرد. از این رو، بررسی پارامترهای ترمودینامیکی کامپوزیت حاصل، از اهمیت به سزایی برخوردار است. آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) برای مطالعه خواص گرمایی کامپوزیت‌های هیبریدی به کار گرفته شد. پارامترهای گرمایی حاصل از ترموگرام‌های DSC شامل دمای ذوب ( $T_m$ )، گرمای نهان ذوب ( $\Delta H_m$ )، دمای بلورینگی ( $T_c$ ) و درجه بلورینگی ( $X_c$ ) در جدول ۲ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود افزودن الیاف باگاس و شیشه، دمای ذوب کامپوزیت‌های هیبریدی را به دماهای بالاتر انتقال داده است. باین وجود، افزایش دمای ذوب چندان چشمگیر نیست. علت افزایش دمای ذوب به رسانایی گرمایی ضعیف الیاف باگاس و شیشه نسبت داده شد. در واقع الیاف باگاس و شیشه در ساختار کامپوزیت به عنوان یک عایق عمل کرده و موجب کندی انتقال حرارت می‌شوند. در نتیجه کامپوزیت حاصل، در دماهای بالاتر شروع به ذوب می‌کند. نتایج مشابه توسط Matuana و Kim (۲۰۰۷) برای کامپوزیت پلی‌وینیل کلراید/آرد چوب [۲۴] و Ndiaye و همکاران (۲۰۱۰) برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن/آرد چوب [۲۵]

#### آزمون مکانیکی دینامیکی (DMA)

آزمون مکانیکی-دینامیکی (DMA) مطابق با استاندارد ASTM E1640 [۲۲] با استفاده از دستگاه Polymer Laboratory مدل PL ساخت کشور انگلستان موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران بر روی نمونه‌ها انجام شد. آزمون در مد خمشی سه نقطه‌ای و دامنه دمایی ۶۰- تا ۱۵۰+ درجه سانتی‌گراد با نرخ حرارت دهی ۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و فرکانس ۱ هرتز انجام شد. مقدار کرنش در تمام محدوده فرکانس اعمالی ۰/۱ درصد در نظر گرفته شد. نمونه‌ها به شکل مستطیلی به ابعاد ۱ × ۱۰ × ۳۰ میلی‌متر توسط گیره از دو انتها بسته شده و در نقطه مرکزی توسط گیره متحرک، تحت ارتعاش سینوسی قرار گرفت. از نیتروزن مایع برای رسیدن به دماهای پایین تر از دمای محیط استفاده شد. ضریب اثر بخشی (C)، نسبت بین مدول ذخیره کامپوزیت ( $E'$ ) در ناحیه شیشه‌ای و لاستیکی به مدول ذخیره پلیمر خالص در ناحیه شیشه‌ای و لاستیکی مطابق معادله ۲ محاسبه شد:

$$C = \frac{E'_g / E'_r \text{ composite}}{E'_g / E'_r \text{ polymer}} \quad (۲)$$

که  $E'_g$  و  $E'_r$  به ترتیب مقادیر مدول ذخیره در ناحیه شیشه‌ای و لاستیکی هستند.

مطابق روش Kubat و همکاران (۱۹۹۰) و Correa و همکاران (۲۰۰۷)، فاکتور اتلاف یا ضریب میرایی ( $\tan \delta$ ) کامپوزیت را می‌توان بر اساس جزء حجمی ( $\Phi$ ) و میرایی مکانیکی اجزای سازنده آن بیان کرد [۲۳، ۱۷]:

$$\tan \delta_c = \Phi_f \tan \delta_f + \Phi_i \tan \delta_i + \Phi_p \tan \delta_p \quad (۳)$$

که زیرنویس‌های c، f، i و p در معادله ۳ به ترتیب بیانگر کامپوزیت، پرکننده، سطح مشترک و ماده زمینه پلیمری است. با فرض ناچیز بودن میرایی پرکننده ( $\tan \delta_p$ ) و کم بودن جزء حجمی سطح مشترک (سطح مشترک صلب) و صرف نظر از آن‌ها در مقایسه با مقادیر پرکننده و ماده زمینه، معادله ۳ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

ترکیب کامپوزیت‌ها، دمای بلورینگی و درجه بلورینگی کامپوزیت‌ها افزایش نشان داد. دلیل افزایش دمای بلورینگی و درجه بلورینگی به اثر هسته‌زایی الیاف باگاس و شیشه نسبت داده شد. الیاف باگاس و شیشه با فراهم کردن بستری برای هسته‌زایی ناهمگن، به‌عنوان یک عامل هسته‌زا عمل کرده و موجب افزایش سرعت و تسهیل تبلور پلی‌پروپیلن می‌شوند. نتایج مشابه توسط Ndiaye و همکاران (۲۰۱۰) برای کامپوزیت پلی‌پروپیلن/آرد چوب گزارش شده است [۲۵].

گزارش شده است. با افزودن الیاف باگاس و شیشه، گرمای نهان ذوب دچار کاهش شد. کاهش گرمای نهان ذوب، ناشی از کاهش مقدار ماده زمینه پلیمری در کامپوزیت‌های حاوی الیاف است. با کمتر شدن مقدار ماده زمینه پلیمری، گرمای کمتری برای ذوب موردنیاز است. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، دمای بلورینگی و درجه بلورینگی کامپوزیت‌ها هم از روند مشابه دمای ذوب پیروی می‌کنند. به‌طوری‌که در اثر حضور الیاف باگاس و شیشه و همچنین افزایش درصد الیاف شیشه در

جدول ۲- خواص گرمایی حاصل از آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی کامپوزیت‌ها

ردیف	فرمولاسیون	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$T_c$ (°C)	$X_c$ (%)
۱	پلی پروپیلن	۱۶۵/۵	۶۴/۳	۱۱۸/۲	۴۶/۶
۲	پلی پروپیلن + ۴۰٪ باگاس	۱۶۷/۳	۳۹/۱	۱۱۹/۵	۴۷/۲
۳	پلی پروپیلن + ۳۵٪ باگاس + ۵٪ الیاف شیشه	۱۶۶/۱	۴۰/۶	۱۱۹/۹	۴۸/۵
۴	پلی پروپیلن + ۳۰٪ باگاس + ۱۰٪ الیاف شیشه	۱۶۸/۹	۴۲/۹	۱۲۱/۶	۵۱/۸
۵	پلی پروپیلن + ۲۵٪ باگاس + ۱۵٪ الیاف شیشه	۱۶۸/۶	۴۳/۵	۱۲۳/۳	۵۲/۵

### مدول ذخیره

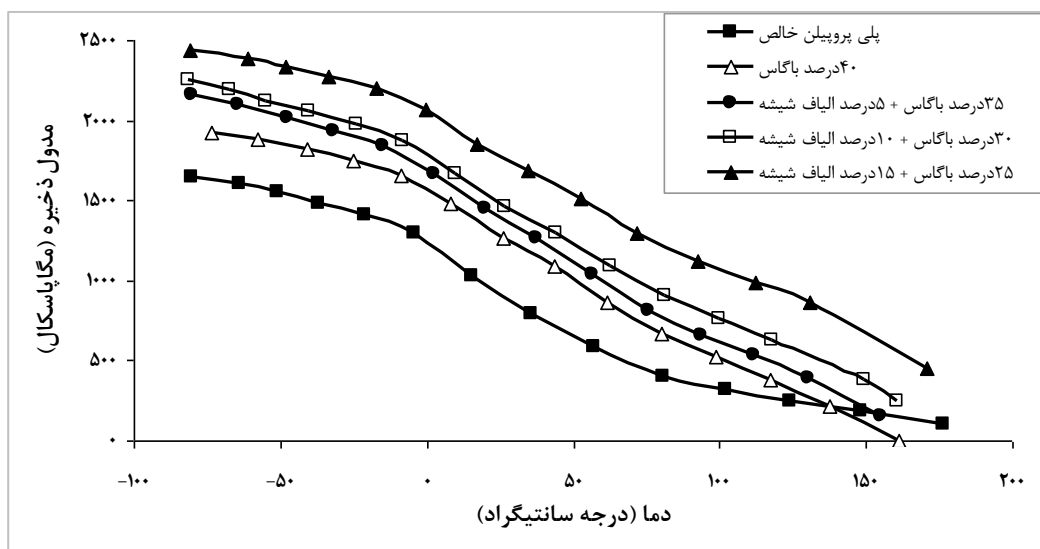
در آزمون مکانیکی دینامیکی، مدول ذخیره مربوط به مؤلفه الاستیک ماده بوده و شاخصی از توانایی آن در حفظ مقدار انرژی ذخیره‌شده است. روند تغییرات مدول ذخیره پلی‌پروپیلن خالص و کامپوزیت‌های حاصل به‌صورت تابعی از زمان در شکل ۱ ارائه شده است. در ناحیه شیشه‌ای که زنجیره‌های پلیمری ماده زمینه با حداقل آزادی حرکت و به‌صورت متراکم کنار هم قرار دارند، مدول ذخیره عمدتاً تحت تأثیر مدول اجزاء تشکیل‌دهنده کامپوزیت است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدول ذخیره کامپوزیت‌ها در اثر حضور الیاف باگاس و شیشه نسبت به پلی‌پروپیلن خالص بهبود نشان می‌دهد. این مسئله را می‌توان به حضور ذرات صلب باگاس و الیاف شیشه در ماده زمینه پلی‌پروپیلن نسبت داد [۲۶]. با افزایش دما کاهش شدید مدول ذخیره در ناحیه گذار شیشه-لاستیک مشاهده می‌شود. به‌طور کلی افت مدول در ناحیه گذار شیشه-لاستیک را می‌توان بر اساس تغییرات تحریک‌پذیری زنجیره‌های پلیمری در محدوده دمای تبدیل شیشه ( $T_g$ ) تشریح کرد. این کاهش مدول در

کامپوزیت‌ها تحت تأثیر اثر تقویت‌کنندگی پرکننده‌ها قرار می‌گیرد (ادیکولا و همکاران ۲۰۰۵). به‌طوری‌که مقدار افت در کامپوزیت‌ها نسبت به پلیمر خالص کمتر است. این تفاوت ناشی از اثرات هیدرودینامیکی الیاف باگاس و شیشه در محیط ویسکوالاستیک و همچنین توانایی آن‌ها در محدود کردن مکانیکی تحرک زنجیره‌های پلیمری است [۱۹].

از آنجایی که در دماهای پایین، ماده زمینه پلیمری در حالت شیشه‌ای و صلب قرار دارد و پس از عبور از ناحیه گذار شیشه-لاستیک، دچار افت مدول می‌شود، اثر تقویت‌کنندگی پرکننده‌ها در ناحیه لاستیکی ملموس‌تر است. تأثیر تقویت‌کنندگی پرکننده‌ها را می‌توان با محاسبه ضریب اثربخشی (C) و بر اساس مقادیر مدول ذخیره ناحیه شیشه‌ای و لاستیکی مورد مطالعه قرار داد. برای ارزیابی اثر تقویت‌کنندگی الیاف در طی افزایش دما، ضریب C در سه دامنه دمایی مختلف محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. برای مثال، دامنه دمایی ۵۰- تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب نشان‌دهنده دمای ناحیه شیشه‌ای و دمای ناحیه لاستیکی است. بیشینه اثربخشی

دامنه دمایی در ناحیه الاستومری قرار دارد و تأییدکننده این موضوع است که اثر تقویت‌کنندگی الیاف در دماهای بالاتر از دمای تبدیل شیشه نسبت به دماهای پایین‌تر از آن ملموس‌تر است. همچنین با افزایش درصد الیاف شیشه مقادیر  $C$  دچار کاهش می‌شود که نشان‌دهنده انتقال تنش بهتر بین الیاف و ماتریس، به‌ویژه در دماهای بالاتر است.

هنگامی پیش می‌آید که بیشترین مقدار انتقال تنش بین الیاف و ماده زمینه حادث شود و مقادیر کمتر  $C$  نشان‌دهنده اثربخشی بهتر است [۱۶]. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، کمترین مقدار  $C$  به کامپوزیت حاصل از پلی پروپیلن، ۲۵٪ باگاس و ۱۵٪ الیاف شیشه در دامنه دمایی ۵۰- تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تعلق دارد. این



شکل ۱- مدول ذخیره کامپوزیت‌های هیبریدی باگاس / الیاف شیشه / پلی پروپیلن به صورت تابعی از دما

جدول ۳- ضریب اثربخشی کامپوزیت‌ها در دامنه‌های دمایی مختلف

تیمار	$C(-50 \text{ --- } +150^\circ\text{C})$	$C(-50 \text{ --- } +100^\circ\text{C})$	$C(-50 \text{ --- } +50^\circ\text{C})$
پلی پروپیلن + ۴۰٪ باگاس	۰/۶۷	۰/۷۴	۰/۷۸
پلی پروپیلن + ۳۵٪ باگاس + ۵٪ الیاف شیشه	۰/۵۸	۰/۶۱	۰/۸۳
پلی پروپیلن + ۳۰٪ باگاس + ۱۰٪ الیاف شیشه	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۷۲
پلی پروپیلن + ۲۵٪ باگاس + ۱۵٪ الیاف شیشه	۰/۳۶	۰/۴۶	۰/۶۵

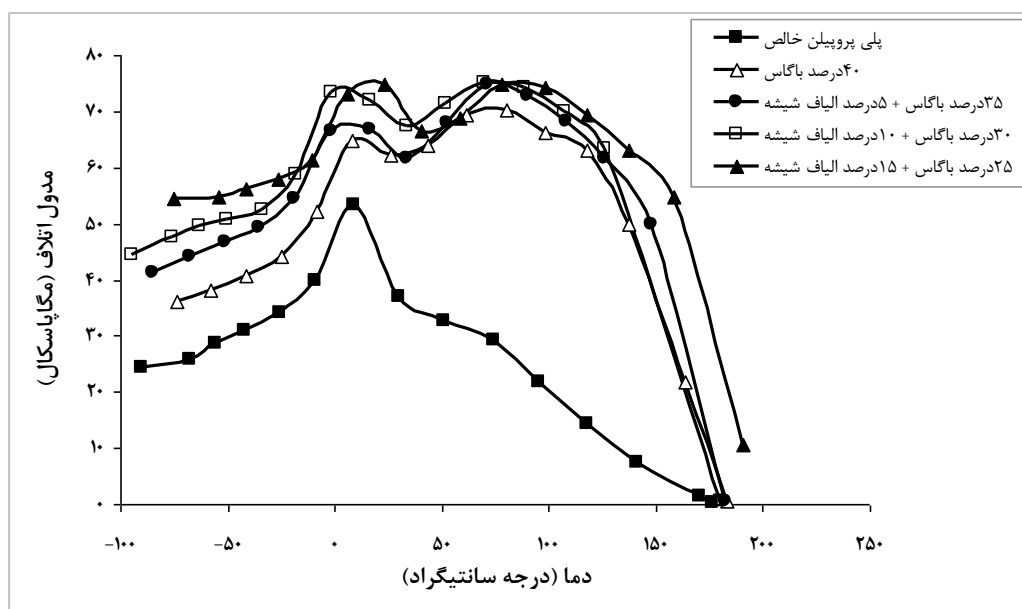
### مدول اتلاف

مدول اتلاف  $E''$  مربوط به مؤلفه ویسکوز بوده و بیانگر مقدار انرژی اتلاف شده توسط سیستم است. شکل ۲ مدول اتلاف کامپوزیت‌ها را در گستره دمایی مورد مطالعه نشان می‌دهد. در آزمون مکانیکی دینامیکی، پلی پروپیلن و کامپوزیت‌های حاصل از آن سه مرحله انتقال  $(\alpha, \beta, \gamma)$  را در دماهای مختلف بروز می‌دهند. با افزایش دما مدول اتلاف افزایش یافته و پس از به‌جا گذاشتن دو پیک کاهش

می‌یابد. افزایش شدید مدول اتلاف نشان‌دهنده افزایش تحرک پذیری ساختار پلیمر در اثر انتقال شیشه لاستیک است که در دماهای پایین‌تر از  $T_g$  امکان‌پذیر نیست [۱۹]. در دامنه دمایی مورد مطالعه، دو مرحله انتقال به‌خوبی دیده می‌شود. اولین پیک در محدوده دمایی صفر درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود که مربوط به انتقال  $\beta$  بوده و به دمای تبدیل شیشه مربوط می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حضور الیاف تغییر چندانی در موقعیت

زنجیره‌های پلیمری است. ارتفاع پیک منحنی مدول اتلاف نشان‌دهنده حداکثر انرژی مکانیکی است. با وارد کردن الیاف باگاس و شیشه به داخل ماده زمینه پلی‌پروپیلن ارتفاع پیک منحنی مدول اتلاف افزایش یافته و به مدول‌های بالاتر جابجا می‌شود که نشان‌دهنده افزایش اتلاف انرژی مکانیکی سیستم است. افزایش مدول اتلاف کامپوزیت‌ها در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص ناشی از افزایش اصطکاک درونی است که موجب اتلاف انرژی مکانیکی بیشتری می‌شود [۱۶].

پیک منحنی ایجاد نمی‌کند و تنها  $T_g$  را به مقدار اندک افزایش می‌دهد. جابجایی دمای انتقال به دماهای بالاتر را می‌توان به حضور الیاف باگاس و شیشه در ماده زمینه پلیمری نسبت داد که باعث کاهش قابلیت تحرک زنجیره‌های پلیمری و تأخیر فرایند انتقال شده است. در دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد پیک دوم مشاهده می‌شود که مربوط به انتقال  $\alpha$  است. این انتقال به استهلاک انرژی زنجیره‌های آمورف پلیمر ارتباط دارد. در اثر حضور الیاف باگاس و شیشه دامنه دمایی ناحیه انتقال گسترده‌تر شده است که ناشی از کاهش تحرک پذیری



شکل ۲-مدول اتلاف کامپوزیت‌های هیبریدی باگاس / الیاف شیشه / پلی‌پروپیلن به صورت تابعی از دما

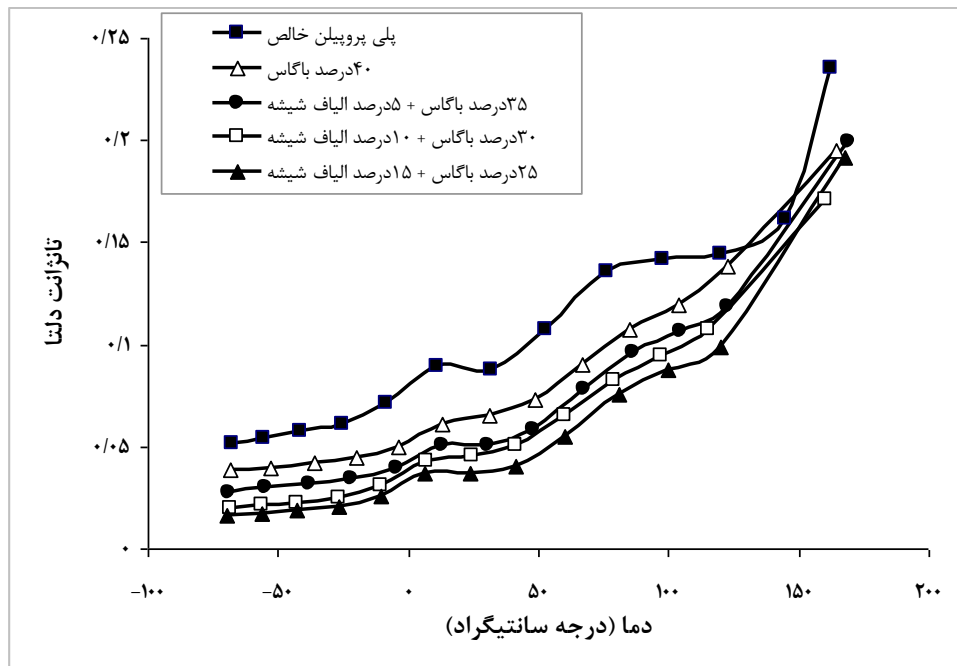
می‌توان به محدود کردن دامنه حرکتی مولکول‌های پلیمر در اثر حضور الیاف صلب نسبت داد [۲۶]. همچنین دلیل دیگر این پدیده، کاهش مقدار ماتریس در کامپوزیت‌های حاوی تقویت‌کننده است. با افزایش مقدار پرکننده به همان اندازه نسبت ماتریس در کامپوزیت حاصل کاهش می‌یابد. با کم شدن مقدار ماتریس، تعداد واحدهای متحرک پدیدآورنده‌ی فرآیند آسایش کاهش یافته به تبع آن با کاسته شدن تعداد واحدهای متحرک شرکت‌کننده در فرآیند آسایش، اندازه سطح زیر پیک منحنی کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با

### فاکتور اتلاف

فاکتور اتلاف یا تانژانت دلتا به توازن بین فاز الاستیک و فاز ویسکوز ماده نسبت داده می‌شود و به تحرک پذیری ساختار پلیمر بستگی دارد [۱۹]. شکل ۳ نمودار فاکتور اتلاف پلی‌پروپیلن و کامپوزیت‌های حاصل را به صورت تابعی از دما نشان می‌دهد. در کامپوزیت‌های پلیمری فاکتور اتلاف تحت تأثیر فاز تقویت‌کننده قرار می‌گیرد. به طوری که با افزودن تقویت‌کننده فاکتور اتلاف کامپوزیت‌ها در مقایسه با پلیمر خالص کاهش می‌یابد. این کاهش به وضوح در شکل ۳ مشاهده می‌شود. این مسئله را

دینامیکی اتلاف انرژی مکانیکی در ناحیه سطح مشترک الیاف/ماتریس اتفاق می‌افتد، انتظار می‌رود که برهمکنش قوی در سطح مشترک الیاف/ماتریس مقدار اتلاف انرژی را کاهش دهد. از این رو، مقادیر کمتر پیک فاکتور اتلاف نشان‌دهنده کیفیت بهتر سطح مشترک است [۱۹].

افزایش درصد الیاف شیشه در فرمولاسیون کامپوزیت هیبریدی حاصل، فاکتور اتلاف دچار افت شده، ارتفاع و سطح زیر پیک منحنی کاهش می‌یابد. نتایج مشابه توسط Ornaghi و همکاران (۲۰۱۱) و Devi و همکاران (۲۰۱۰) گزارش شده است [۲۰، ۲۱]. از آنجایی که در آزمون مکانیکی

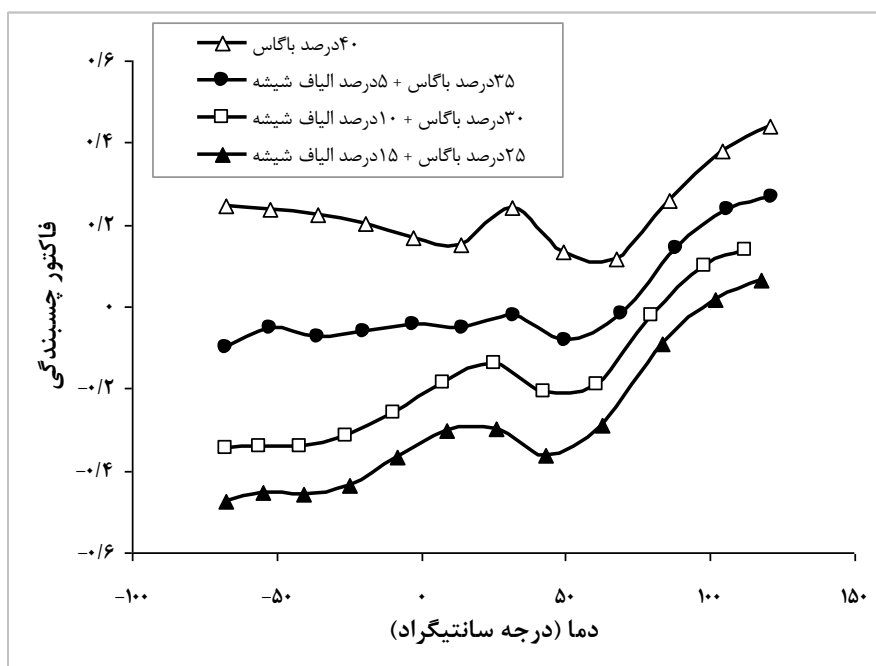


شکل ۳- فاکتور اتلاف کامپوزیت‌های هیبریدی باگاس / الیاف شیشه / پلی پروپیلن به صورت تابعی از دما

کاهش یافت که نشان‌دهنده چسبندگی بهتر سطح مشترک الیاف/ماده زمینه است (مقادیر کمتر فاکتور چسبندگی (A)، دلالت بر بهبود برهمکنش‌ها در سطح مشترک الیاف/ماده زمینه دارد). همچنین فاکتور چسبندگی حساسیت بالایی را نسبت به دمای تبدیل شیشه بروز می‌دهد. بطوریکه در محدوده این دما (پیرامون صفر درجه سانتی‌گراد)، نمودار فاکتور چسبندگی به پیک خود می‌رسد که دلالت بر کاهش کیفیت چسبندگی سطح مشترک در این محدوده دمایی دارد. علت این پدیده به افزایش تحرک زنجیره‌های پلیمری ماده زمینه در این محدوده دمایی نسبت داده می‌شود.

برای مطالعه تأثیر حضور الیاف شیشه بر روی کیفیت چسبندگی سطح مشترک الیاف/ماتریس در کامپوزیت‌های هیبریدی، فاکتور چسبندگی (A) با استفاده از معادله ۵، بر اساس فاکتور اتلاف کامپوزیت ( $\tan \delta_c$ )، فاکتور اتلاف پلیمر ( $\tan \delta_p$ ) و جزء حجمی پرکننده ( $\Phi_f$ ) در دامنه دمایی مورد مطالعه، محاسبه گردید. نمودار فاکتور چسبندگی (A) در برابر دما ترسیم و در شکل ۴ ارائه شده است. این فاکتور اندازه‌گیری کمیتهی ماکروسکوپی چسبندگی سطح مشترک در طی آزمون مکانیکی دینامیکی را ارائه می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با وارد کردن الیاف شیشه به داخل ساختار کامپوزیت باگاس/پلی پروپیلن و افزایش درصد آن، فاکتور چسبندگی





شکل ۴- فاکتور چسبندگی کامپوزیت‌های هیبریدی باگاس / الیاف شیشه / پلی پروپیلن به صورت تابعی از دما

## نتیجه‌گیری

در پژوهش اخیر خواص گرمایی و مکانیکی - دینامیکی کامپوزیت‌های هیبریدی حاصل از الیاف باگاس / الیاف شیشه و پلی پروپیلن مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، کامپوزیت‌های هیبریدی با فرایند اختلاط مذاب ساخته شد و آزمون مکانیکی دینامیکی و گرماسنجی روبشی تفاضلی بر روی آن‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که دمای ذوب، دمای بلورینگی و درجه بلورینگی کامپوزیت‌ها با افزودن الیاف باگاس و شیشه افزایش یافت. نتیجه‌گیری شد که انتقال دمای ذوب به دماهای بالاتر با رسانایی گرمایی ضعیف الیاف باگاس و شیشه و افزایش دمای بلورینگی و درجه بلورینگی با اثر هسته‌زایی آن‌ها و تسریع تبلور ماده زمینه ارتباط دارد. مطالعه رفتار مکانیکی دینامیکی کامپوزیت‌ها حاکی از بهبود مدول ذخیره در مقایسه با پلی پروپیلن خالص بود. محاسبه ضریب اثر بخشی نشان داد که حضور الیاف شیشه موجب بهبود تقویت‌کنندگی شده و اثر تقویت‌کنندگی الیاف در دماهای

بالاتر از دمای تبدیل شیشه نسبت به دماهای پایین‌تر از آن ملموس‌تر است. افزایش مدول اتلاف کامپوزیت‌ها در مقایسه با پلی پروپیلن خالص به افزایش اصطکاک درونی که موجب اتلاف انرژی مکانیکی بیشتری می‌شود نسبت داده شد. محدود کردن دامنه حرکتی مولکول‌های پلیمر در اثر حضور الیاف صلب موجب کاهش فاکتور اتلاف کامپوزیت‌ها در مقایسه با پلیمر خالص گردید. محاسبه و مقایسه فاکتور چسبندگی نشان‌دهنده بهبود کیفیت چسبندگی سطح مشترک در اثر افزودن الیاف شیشه به سیستم باگاس/پلی پروپیلن بود. جمع‌بندی نتایج آشکار ساخت که وارد کردن الیاف شیشه به مخلوط باگاس/پلی پروپیلن به منظور ساخت کامپوزیت هیبریدی، موجب بهبود خواص حرارتی و مکانیکی دینامیکی می‌شود. بطوریکه کامپوزیت هیبریدی حاصل از ۶۰٪ پلی پروپیلن، ۲۵٪ باگاس و ۱۵٪ الیاف شیشه تقریباً مطلوب‌ترین خواص را دارا بود.

- [1] Amash, A. and Zugenmaier, P., 2000. Morphology and properties of isotropic and oriented samples of cellulose fibre–polypropylene composites. *Polymer*, 41 (4):1589-1596.
- [2] Joseph, P. V., Mathew, G., Joseph, K., Groeninckx, G. and Thomas, S., 2003. Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(3):275-290.
- [3] Ornaghi, H. L., Bolner, A. S., Fiorio, R., Zattera, A. j. and Amico S. C., 2010. Mechanical and dynamic mechanical analysis of hybrid composites molded by resin transfer molding. *Journal of Applied Polymer Science*, 118 (2):887-896.
- [4] Oksman, K. and Sain, M., 2008. *Wood-Polymer Composites*, Woodhead Publishing Ltd, Great Abington, Cambridge, UK, 366p.
- [5] Rowell, R.M., 2005. *Hanbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. CRC Press; 2nd edition, 703p.
- [6] Fu, S. Y., Xu, G. and Mai, Y. W., 2002. On the elastic modulus of hybrid particle/shortfiber/polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 33(4): 291–299.
- [7] Karger-Kocsis, J., 2000. Reinforced polymer blends. In D. R. Paul, & C. B. Bucknall (Eds.), *Polymer blends* (p. 395). New York: John Wiley & Sons.
- [8] Thwe, M. M. and Liao, K., 2003. Environmental effects on bamboo–glass/polypropylene hybrid composites. *Journal of Materials Science*, 38(2): 363–376.
- [9] Thwe, M. M. and Liao, K., 2003. Durability of bamboo–glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 63(3–4): 375–387.
- [10] Jawaid, M. and Abdul Khalil, H.P.S., 2011. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: a review. *Carbohydr Polym*, 86(1): 1–18.
- [11] Panthapulakkal, S. and Sain, M., 2007. Studies on the water absorption properties of short hemp-glass fiber hybrid polypropylene composites. *J. Comp. Mater*, 41(15):1871-1883.
- [12] John, K. and Naidu, S. V., 2007. Chemical Resistance of Sisal/Glass Reinforced Unsaturated Polyester Hybrid Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(4): 373-376.
- [13] Aquino, E. M. F., Sarmiento, L. P. S., Oliveira, W. and Silva, R.V., 2007. Dynamic mechanical analysis of pineapple leaf/glass hybrid fiber reinforced polyester composites. *Polymer Composites*, 31(6):956-965.
- [14] Ahmed, K. S. and Vijayarangan, S., 2006. Elastic property evaluation of jute-glass fibre hybrid composite using experimental and CLT approach. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 13(5): 435-442.
- [15] Schledjewski, R. and Karger-Kocsis, J., 1994. Dynamic mechanical analysis of glass mat-reinforced polypropylene (gmt-pp). *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 7:270-277.
- [16] Idicula, M., Malhotra, S. K., Joseph, K. and Thomas, S., 2005. Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, 65(7–8):1077–1087.
- [17] Correa, C. A., Razzino, C. A. and Hage, Jr., 2007. Role of Maleated Coupling Agents on the Interface Adhesion of Polypropylene–Wood Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20:323-329.

- [18] Swaminathan, G. and Shivakumar, K., 2009. A re-examination of DMA testing of polymer matrix composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(8): 979–994.
- [19] Pothan, L. A., George, C. N., John, M. J. and Thomas, S., 2010. Dynamic mechanical and dielectric behavior of banana–glass hybrid fiber reinforced polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(8):1131–1145.
- [20] Devi, L. U., Bhagawan, S. S. and Thomas, S., 2010. Dynamic mechanical analysis of pineapple leaf/glass hybrid fiber reinforced polyester composites. *Polymer Composite*, 31: 956–965.
- [21] Ornaghi, HL., da Silva H. S. P. and Zattera, A. J., 2011. Hybridization effect on the mechanical and dynamic mechanical properties of curaua composites. *Material Science Engineering*, 528: 7285–7289.
- [22] ASTM D E1640., 2013. Standard test method for assignment of the glass transition temperature by dynamic mechanical analysis, American Society of Testing and Materials.
- [23] Kubat, J., Rigdhal, M. and Welander, M., 1990. Characterization of interfacial interaction in high density polyethylene filled with glass spheres using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 39: 1527–1539.
- [24] Matuana, L. M. and Kim, J. W., 2007. Fusion characteristics of rigid PVC/wood-flour composites by torque rheometry. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 13(1): 7–13.
- [25] Ndiaye, D., Matuana, L. M., Morlat-Therias, S., Vidal, L., Tidjani, A. and Gardette, J. L., 2010. Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene/ Wood-Flour Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 119: 3321–3328.
- [26] Nayak, S. K., Mohanty, S. and Samal, S. K., 2009. Influence of short bamboo/glass fiber on the thermal, dynamic mechanical and rheological properties of polypropylene hybrid composites. *Materials Science & Engineering A*, 523(1-2): 32-38.

## Dynamic mechanical and thermal properties of bagasse/glass fiber/polypropylene hybrid composites

### Abstract

This work aims to evaluate the thermal and dynamic mechanical properties of bagasse/glass fiber/polypropylene hybrid composites. Composites were prepared by the melt compounding method and their properties were characterized by differential scanning calorimetry (DSC) and dynamic mechanical analysis (DMA). DSC results found that with incorporation of bagasse and glass fiber, the melting temperature ( $T_m$ ) and the crystallisation temperature ( $T_c$ ) shift to higher temperatures and the degree of crystallinity ( $X_c$ ) increases. These findings suggest that the fibers played the role of a nucleating agent in composites. Dynamic mechanical analysis indicated that by the incorporation of bagasse and glass fiber into polypropylene, the storage modulus ( $E'$ ) and the loss modulus ( $E''$ ) increase whereas the mechanical loss factor ( $\tan\delta$ ) decreases. To assess the effect of reinforcement with increasing temperature, the effectiveness coefficient  $C$  was calculated at different temperature ranges and the results revealed that, at the elevated temperatures, improvement of mechanical properties was more noticeable due to the presence of fibers. The fiber-matrix adhesion efficiency determined by calculating the adhesion factor  $A$  in terms of the relative damping of the composite ( $\tan \delta_c$ ) and the polymer ( $\tan \delta_p$ ) and volume fraction of the fibers ( $\Phi_f$ ). Calculated adhesion factor  $A$  values indicated that by adding glass fiber to bagasse/polypropylene system, the fiber-matrix adhesion improves. Hybrid composite containing 25% bagasse and 15% glass fiber showed a better fiber-matrix adhesion.

**Keywords:** adhesion factor, bagasse, dynamic mechanical analysis, effectiveness coefficient, glass fiber, hybrid composite.

**M. Roohani**<sup>1\*</sup>  
**B. Kord**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Paper and Packaging, Faculty of Chemistry and Petrochemical Engineering, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Paper and Packaging, Faculty of Chemistry and Petrochemical Engineering, Standard Research Institute (SRI), Karaj, Iran.

Corresponding author:  
[mroohani@standard.ac.ir](mailto:mroohani@standard.ac.ir)

Received: 2015.06.13  
Accepted: 2015.09.08