

مطالعه و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نانو کامپوزیت‌ها بر پایه

پلی بوتیلن ترفتالات / اپوکسی / نانو رس

رحمان جهانبازی^{1*}، حسین ایزدی وصفی²، احسان کیانفر³، کبری اکبری⁴، نسرين افراشته⁵

^{1,2,4} گروه مهندسی شیمی - پلیمر - دانشگاه آزاد اسلامی شهرضا

³ گروه مهندسی شیمی - دانشگاه آزاد اسلامی اراک

⁵ گروه مهندسی نفت - دانشگاه آزاد اسلامی امیدیه

چکیده

پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) یکی از متداول‌ترین پلیمرهای مهندسی نیمه بلورین می‌باشد که بواسطه خواصی چون درجه و سرعت بلورینگی بالا، مقاومت شیمیایی خوب، پایداری حرارتی و خواص جریان‌ی عالی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. علاوه بر خواص مذکور این پلیمر بدلیل استحکام کششی خوب، مدول خمشی بالا، پایداری ابعادی بویژه در برابر آب و مقاومت بالا در برابر هیدروکربن‌ها، کاربرد وسیعی در صنایع اتومبیل، صنایع الکتریکی و سایر کاربردهای مهندسی پیدا کرده است. با وجود مزایای ذکر شده، بدلیل استحکام ضربه‌ای پایین PBT که ناشی از دمای انتقال شیشه‌ای نسبتاً پایین آن است توجه بسیاری از محققین و پژوهشگران برای رفع این نقیصه از طریق افزایش HDT این پلیمر معطوف شده است. عموماً سه طریق برای رفع و اصلاح این نقیصه مطرح می‌باشد که عبارتند از: کopolymer شدن، آلیاژسازی با سایر پلیمرها و استفاده از پرکننده‌های معدنی و افزودنی‌های مناسب. روش آلیاژسازی با رزین‌های ترموست (اپوکسی) روش جدید بوده که تاکنون جزییات زیادی در مورد آن توسط محققین گزارش نگردیده است. از نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان به نتایج آلیاژ PBT/اپوکسی اشاره کرد که دو پیک مجزا خود نشان می‌دهد نشانگر دو فازی بودن این آلیاژ در حالت مذاب می‌باشد. بطور کلی، اپوکسی با جرم مولکولی پایین با بسیاری از گرمانرم‌های قطبی سازگار بوده و رفتار فازی UCST از خود نشان می‌دهد. آزمون کشش نشان داد در آلیاژ PBT/اپوکسی اضافه کردن عامل پخت موجب افزایش مدول کششی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: عامل پخت، نانو کلی، اپوکسی، آلیاژ، پلی بوتیلن ترفتالات

1- مقدمه

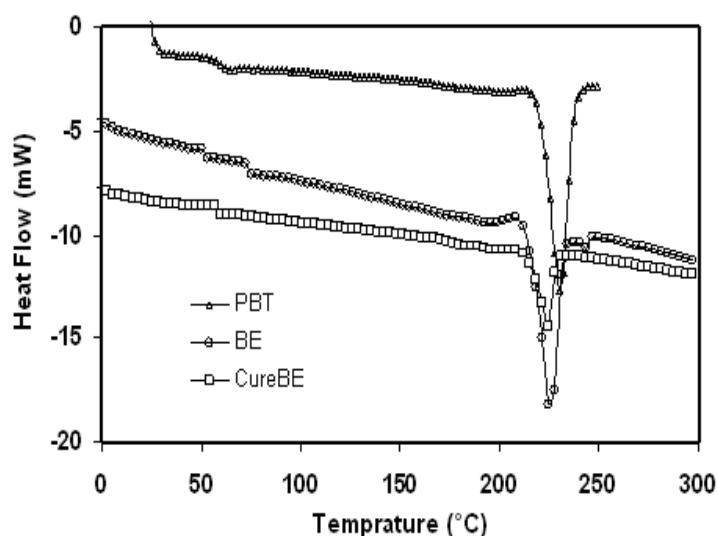
بدنبال پیچیده شدن نوع کاربردهای مواد پلیمری در زمینه‌های مختلف مانند نانوفناوری، بیو تکنولوژی، بسته‌بندی، حمل و نقل، هوافضا و الکترونیک و ...، نیاز به پلیمرهایی با ریزساختار پیچیده به طور روز افزون افزایش می‌یابد [1]. از آنجایی که سنتز و تولید پلیمرهای جدیدی که خواص موردنظر را داشته باشند، فرایندی پیچیده، زمانبر و پرهزینه است؛ لذا تکنیک‌هایی چون اصلاح با مواد تقویت‌کننده (شامل ذرات میکرو یا نانو) و یا آلیاژسازی پلیمرهای موجود به عنوان روش‌هایی به مراتب انعطاف‌پذیرتر و اقتصادی‌تر جهت تولید پلیمرهایی با خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. یکی از مزایای آلیاژسازی اپوکسی با ترموپلاستیک PBT، تشکیل لایه بین سطحی مستحکم بین این دو پلیمر است، که منجر به استفاده زیاد این ترموست به عنوان یک عامل سازگارکننده در آلیاژسازی PBT با سایر پلیمرها و پرکننده‌ها شده است. در این خصوص عمده مطالعات انجام گرفته، در مورد بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ و نقش سازگارکننده اپوکسی در این میان بوده است [2]. اما در مورد سینتیک واکنش بین PBT و اپوکسی بدلیل پیچیدگی واکنش و محدودیت در روش‌های ارزیابی و مشاهده مستقیم واکنش، مطالعات کمی صورت پذیرفته است. فرایند واکنشی بین PBT و اپوکسی را می‌توان به سه مرحله مجزا تقسیم نمود. مرحله I: افزایش سریع میزان ویسکوزیته کمپلکس آلیاژ (η^*) در ابتدای واکنش؛ مرحله II: ثابت ماندن میزان η^* در میانه واکنش؛ مرحله III: افزایش مجدد و نسبتاً کند میزان η^* در مابقی واکنش. Wu و همکاران این آزمایش را با آلیاژ PBT و پارافین نیز انجام دادند و مشاهده کردند که بدلیل اینکه پارافین فاقد گروه‌های فعال جهت واکنش با PBT می‌باشد، میزان η^* با گذشت زمان ثابت بوده و لذا می‌توان افزایش η^* در آلیاژ PBT و اپوکسی را به انجام واکنش بین این دو پلیمر نسبت داد [3].

2- مواد و دستگاه ها :

پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) ساخت شرکت بایر از گونه Pocan® B 1505 با نرخ جریان مذاب در حدود 23.4 g/10min (دمای 260 درجه سانتیگراد و وزنه 2/16 کیلوگرم) و دمای ذوب 225 °C استفاده شد. رزین اپوکسی مورد استفاده از نوع DGEBA ساخت شرکت Nan Ya Plastic Corporation از گونه NPES-629 که مقاومت گرمایی بالایی نیز دارد، می‌باشد. عامل پخت رزین اپوکسی MDEA، این ماده محصول شرکت Aldrich می‌باشد و در دمای بالا فعال بوده و فرایند پخت را انجام می‌دهد. خاکرس اصلاح شده Cloisite 30B تولید شرکت Southern Clay آمریکا می‌باشد که با نمک آمونیوم چهارتایی اصلاح شده است. در تهیه نمونه‌های اولیه از دستگاه مخلوط‌کن داخلی (Brabender W50) با حجم محفظه 60 cc و چرخنده‌هایی از نوع Roller ساخت شرکت Brabender آلمان، میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscopy) مدل Seron AIS-2100 واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه امیرکبیر، میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transition Electron Microscopy) مدل Philips EM 208. واقع در پژوهشکده علوم و فنون سازمان انرژی اتمی، طیف‌سنج پراش اشعه ایکس (XRD) به این منظور از دستگاه دیفراتومتر Philips X'pert واقع در دانشگاه آزاد نجف آباد، رئومتر دینامیکی (RMS) از نوع UDS200 ساخت شرکت Paar Physical موجود در کارگاه پلاستیک دانشکده پلیمر- دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دستگاه DSC مدل DSC-7 PerkinElmer موجود در دانشکده مهندسی پلیمر دانشگاه امیرکبیر، دستگاه تست کشش مدل SMT5 ساخت شرکت SANTAM در دانشگاه اصفهان، دستگاه تست ضربه Gotech، تایوان مدل GT.7045-MD در دانشگاه آزاد شهرضا چکش ضربه نوع Izod انجام شد.

3-نتایج و بحث:

برای بررسی میزان سازگاری و یا عدم سازگاری PBT با اپوکسی، دمانگاشت DSC پلی بوتیلن ترفتالات، آلیاژ پخت شده و پخت نشده در شکل 1 نشان داده شده است. داده‌های مرتبط با تحلیل حرارتی نیز در جدول 1 ارائه شده است. همان گونه که در شکل نیز مشخص است آلیاژ PBT/اپوکسی دو پیک مجزا در دماهای 54 و 77 °C از خود نشان می‌دهد که مرتبط با دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) هر یک از اجزاء (دمای انتقال شیشه‌ای PBT و اپوکسی بترتیب 56 و 75 درجه سانتیگراد می‌باشد) بوده و نشانگر دو فازی بودن این آلیاژ در حالت مذاب می‌باشد. بطور کلی، اپوکسی با جرم مولکولی پایین با بسیاری از گرمانرم‌های قطبی سازگار بوده و رفتار فازی UCST از خود نشان می‌دهد [4]. با افزایش وزن مولکولی اپوکسی میزان سازگاری، بدلیل کاهش در آنتروپی صورتبندی اختلاط، کم شده و آلیاژهای حاصل معمولاً دو فازی می‌باشند. با توجه به جرم مولکولی بالای رزین اپوکسی استفاده شده در این مقاله (2400-3000 g/eq) و مشاهده دو T_g برای آلیاژ می‌توان نتیجه گرفت که آلیاژ PBT/اپوکسی دو فاز می‌باشد.



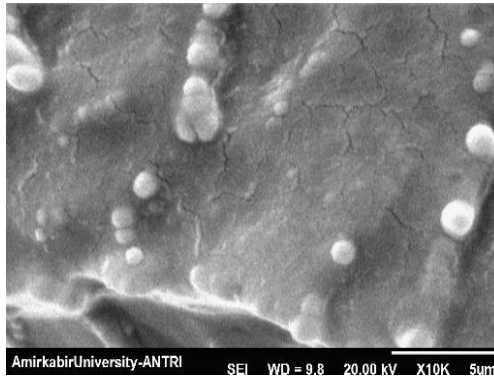
شکل 1: دمانگاشت DSC برای پلی بوتیلن ترفتالات (PBT)، آلیاژ پخت شده (CureBE) و پخت نشده (BE)

جدول 1: نتایج تحلیل حرارتی مواد اولیه و آلیاژهای مربوط

	PBT	Epoxy	BE	CureBE
T_g (°C)	56	75	54/77 two T_g s	57
ΔC_p (J g ⁻¹ K ⁻¹)	0.20	0.31	0.25	0.19
ΔH_f (J g ⁻¹)	42.8	-	42.4	30.1
T_m (°C)	229.95	-	224.80	223.82

نتایج هم‌چنین نشان می‌دهد که با پخت آلیاژ PBT/اپوکسی پیک مشخصه Tg اپوکسی (در دمای 77 °C) ناپدید شده ولی پیک مربوط به PBT هم‌چنان وجود دارد (در دمای 57 °C). این نتیجه نشان می‌دهد که عملیات پخت اپوکسی هیچ تاثیری بر فاز PBT نداشته و بصورت انتخابی تنها در فاز اپوکسی اتفاق می‌افتد و منجر به پخت فاز متفرق (اپوکسی) می‌گردد. اگرچه، میزان بلورینگی PBT در آلیاژ پخت‌نشده (BE) معادل همان میزان در PBT خالص بوده، (علیرغم افت نقطه ذوب که در حدود 5 °C بوده و بیانگر

برهمکنش قوی بین فاز متفرق اپوکسی و بستر PBT می‌باشد)؛ لیکن در آلیاژ پخت شده (CureBE)، میزان بلورینگی PBT دچار افت 25 درصدی شده که این می‌تواند بدلیل ممانعت‌های ایجادشده، توسط ذرات پخت‌شده اپوکسی، برای حرکت زنجیره‌های PBT و کندی حرکت به سمت لایه‌های بلور باشد [5]. در شکل 2 ریزنگار (SEM) این آلیاژ را نشان می‌دهد. این آلیاژ ریزساختار بستر - متفرق را نشان می‌دهد که متوسط اندازه ذرات فاز متفرق در آن حدود 2 μm بوده و به خوبی در بستر پخش شده است.

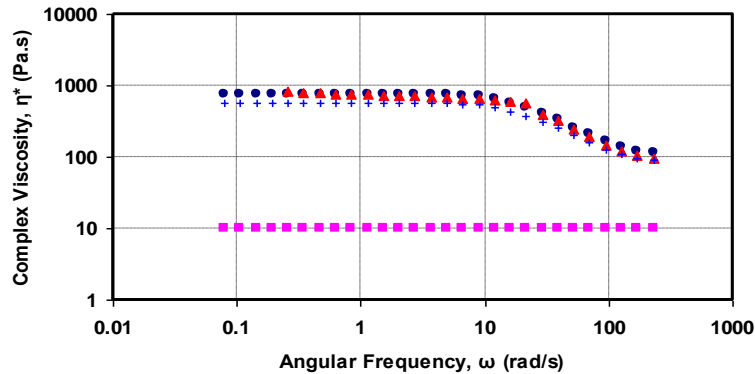


شکل 2: ریزنگار (SEM) برای آلیاژ PBT/اپوکسی

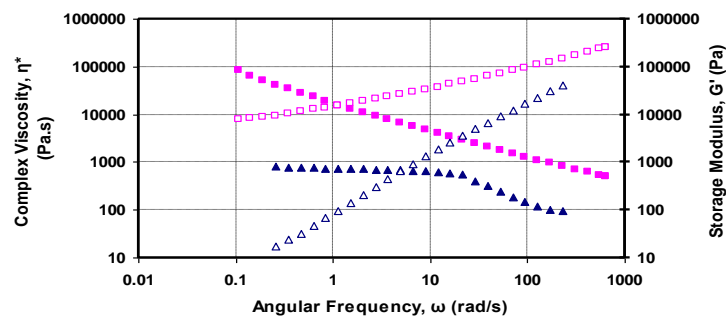
3-1- خواص ریولوژیکی آلیاژ پلی بوتیلن ترفتالات/اپوکسی

شکل 3 منحنی تغییرات ویسکوزیته مختلط (η^*) برحسب بسامد زاویه‌ای را برای PBT، اپوکسی، و آلیاژ پخت نشده (BE) نشان می‌دهد. درحالی‌که اپوکسی رفتاری نیوتنی در تمام بسامد ها دارد، PBT رفتاری شبه پلاستیک از خود نشان می‌دهد. ویسکوزیته مختلط آلیاژ BE از قانون مخلوطها دارای انحراف مثبت می‌باشد که بیانگر برهمکنش قوی بین بستر PBT و فاز متفرق اپوکسی می‌باشد. این برهمکنش قوی بین PBT و اپوکسی بدلیل انجام واکنش‌های جانبی بین گروه‌های کربوکسیل PBT و گروه‌های اپوکسی رزین اپوکسی و تشکیل کوپلیمری در فصل مشترک که به عنوان یک سازگارکننده و یا عامل بین سطحی عمل می‌کند و منجر به تقویت فصل مشترک و افزایش ویسکوزیته می‌شود، می‌باشد [6]. منحنی‌های خواص ویسکوالاستیک خطی برای آلیاژهای PBT/اپوکسی پخت‌شده (CureBE) و نشده (BE) در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، رفتار آلیاژ پخت‌شده (CureBE) مشابه رفتار کامپوزیت‌های پرشده غلیظ، [7]، و گرمانرم - الاستومرهای پخت‌شده دینامیکی، [8-9]، بوده و در بسامدهای زاویه‌ای پایین مقدار ویسکوزیته مختلط (η^*) و مدول

ذخیره (G') افزایش شدیدی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود رفتار آلیاژ پخت‌شده مشابه رفتار سامانه‌های سوسپانسیونی می‌باشد.



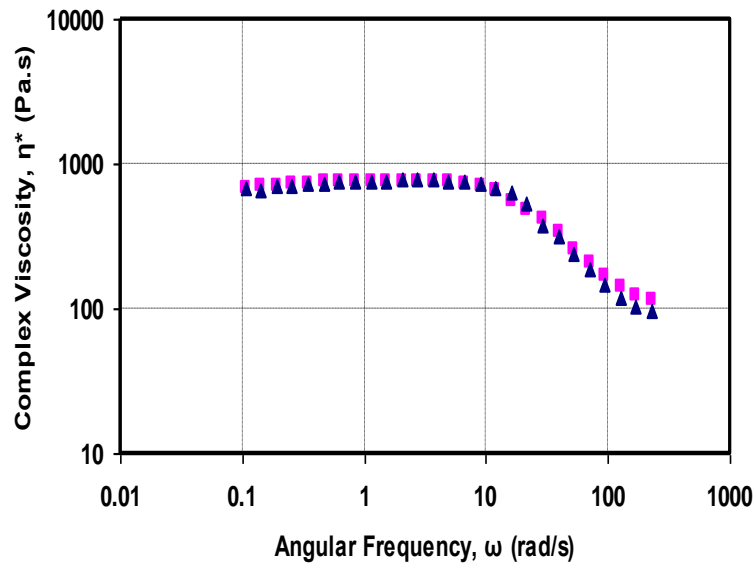
شکل 3: مقادیر ویسکوزیته مختلط (η^*) برحسب بسامد زاویه‌ای برای نمونه‌های PBT (●)، اپوکسی (■)، آلیاژ پخت‌نشده (BE) (▲) و قانون مخلوطها (+)



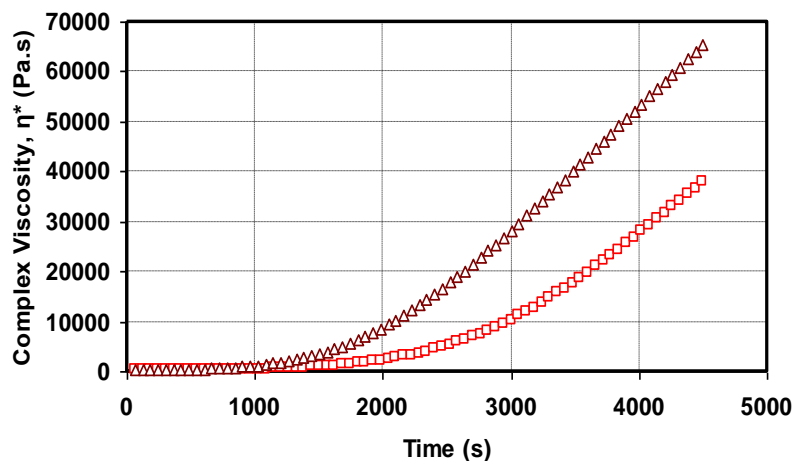
شکل 4: مقادیر ویسکوزیته مختلط (η^*) و مدول ذخیره (G') برحسب بسامد زاویه‌ای برای آلیاژ پخت‌نشده (BE) (▲، Δ)، و پخت‌شده (CureBE) (□، ■). نمادهای توخالی مربوط به مدول ذخیره و نمادهای توپر مربوط به ویسکوزیته مختلط می‌باشد.

شکل 5 مقادیر ویسکوزیته مختلط برحسب بسامد زاویه‌ای را برای پلی بوتیلن ترفتالات (PBT) و PBT حاوی ماده پخت CurePBT) که عملیات پخت تکمیلی نیز بر روی آن انجام شده است نشان می‌دهد. این آزمون جهت بررسی تاثیر ماده پخت بر زنجیره‌های PBT انجام شده است و نتایج نشان می‌دهد که ماده پخت هیچگونه تاثیر بر زنجیره‌های PBT ندارد و در آلیاژ این ماده بصورت اختصاصی و انتخابی تنها به فاز اپوکسی رفته و باعث پخت رزین اپوکسی می‌شود. منحنی تغییرات ویسکوزیته مختلط برحسب زمان آلیاژ PBT/اپوکسی (BE) و آلیاژ BE حاوی ماده پخت (به نسبت استوکیومتری) در دمای 260°C در شکل نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل 6 مشخص است ویسکوزیته مختلط با گذشت زمان ثابت بوده و در یک زمان مشخص (نقطه ژل شدن) شروع به افزایش می‌کند. نقطه ژل شدن در آلیاژ حاوی ماده پخت بسیار سریعتر اتفاق می‌افتد (در حدود 1200 ثانیه در مقایسه با 2000 ثانیه برای آلیاژ بدون ماده پخت). نرخ افزایش ویسکوزیته نیز در آلیاژ حاوی ماده پخت بیشتر از این نرخ در آلیاژ BE می‌باشد که نشان‌دهنده افزایش سرعت فرایند پخت در حضور ماده پخت می‌باشد. نکته جالب در این خصوص افزایش ویسکوزیته با زمان در آلیاژ ساده BE است که بیانگر وقوع تغییرات ساختاری (از نوع افزایش

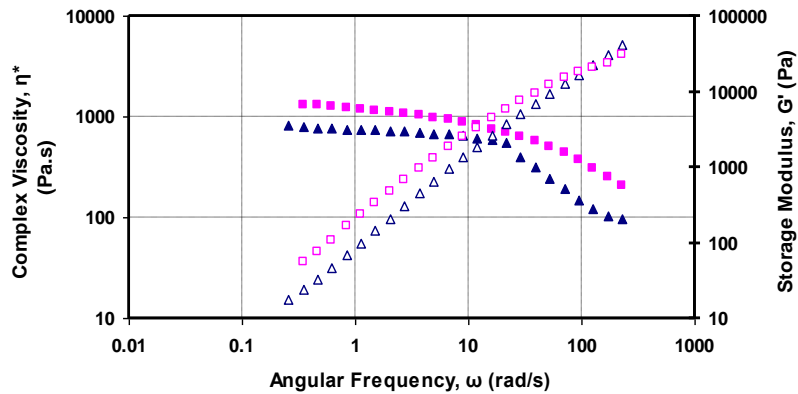
ویسکوزیته) در آلیاژ می‌باشد. این افزایش می‌تواند بدلیل انجام واکنش‌های جانبی بین گروه‌های کربوکسیل PBT و گروه‌های اپوکسی رزین اپوکسی و تشکیل کوپلیمری در فصل مشترک و تقویت آن باشد. دلیل دیگر افزایش ویسکوزیته در این سامانه احتمالاً بدلیل پخت جزئی رزین و طبیعت خودپخت‌کنندگی آن می‌باشد. این افزایش نسبی خواص ویسکوالاستیک خطی در اثر فرایند پخت تکمیلی در آلیاژ BE بدون ماده پخت نسبت به آلیاژ ساده BE در شکل 7 نشان داده شده است. از جمع‌بندی نتایج بدست آمده در این قسمت می‌توان گفت که رفتار ویسکوالاستیک خطی آلیاژ CureBE شدیداً توسط پخت فاز متفرق اپوکسی و تشکیل یک لایه فصل مشترک قوی بین دو فاز کنترل می‌شود.



شکل 5: مقادیر ویسکوزیته مختلط (η^*) برحسب بسامد زاویه‌ای برای PBT (■) و PBT حاوی ماده پخت (▲) (CurePBT)



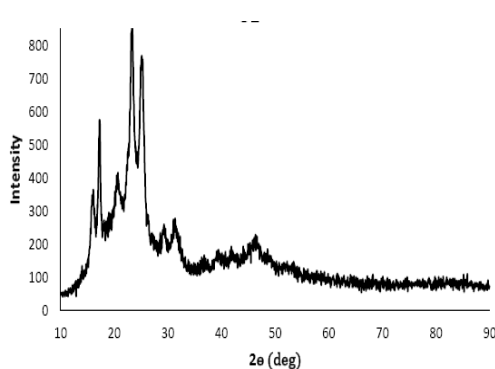
شکل 6: تغییرات ویسکوزیته مختلط (η^*) بر حسب زمان آلیاژ BE (□) و آلیاژ BE حاوی ماده پخت (Δ) در دمای 260°C



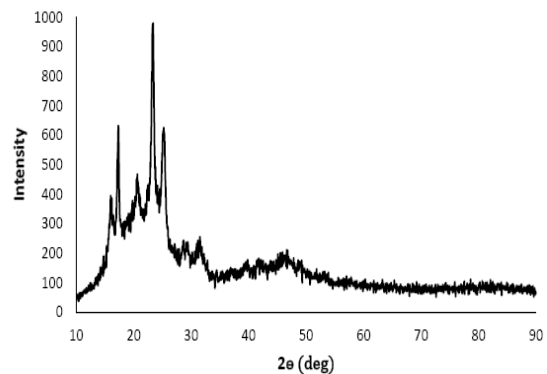
شکل 7: مقادیر ویسکوزیته مختلط (η^*) و مدول ذخیره (G') بر حسب بسامد زاویه‌ای برای آلیاژ پخت نشده (BE) و آلیاژ BE پخت تکمیلی شده (□, ▲). نمادهای توخالی مربوط به مدول ذخیره و نمادهای توپر مربوط به ویسکوزیته مختلط می‌باشد

3-2- نتایج منحنی XRD آلیاژ PBT / اپوکسی:

برای بررسی بلورینگی آلیاژ PBT/اپوکسی رنج $2\theta=10-40$ در نظر می‌گیریم. همان‌طور که از منحنی‌های XRD نمونه PBT و نمونه آلیاژ پلی بوتیلن ترفتالات/ اپوکسی مشخص است مشاهده می‌شود که میزان بلورینگی در هر دو نمونه یکسان بوده و هر دو نمودار شبیه به هم می‌باشند، که این نتیجه مطابق با آزمون آنالیز حرارتی DSC و نتایج جدول 1 می‌باشد. مطابقت خوبی میان نتایج حاصل از آزمون XRD آزمون DSC بدست آمده است.



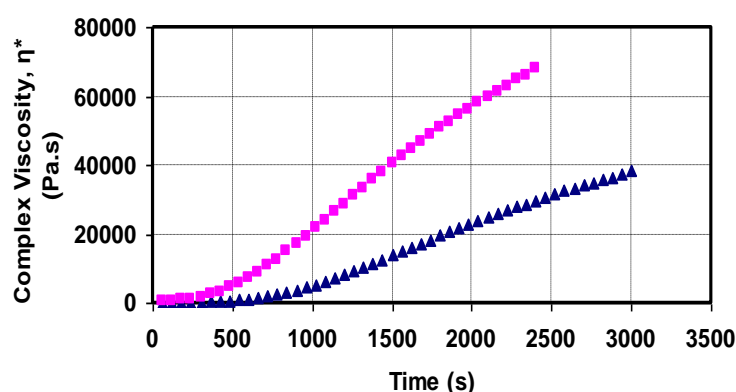
شکل 9: منحنی XRD نمونه BE



شکل 8- منحنی XRD نمونه PBT

3-3-تاثیر نانورس بر فرایند پخت اپوکسی:

منحنی تغییرات ویسکوزیته مختلط برحسب زمان برای اپوکسی حاوی ماده پخت و اپوکسی/ نانورس (EN) حاوی ماده پخت (به نسبت استوکيومتری) در دمای 240 °C در شکل 10 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است نانورس هم زمان شروع واکنش پخت و هم سرعت واکنش پخت را در اپوکسی افزایش می دهد. Dean و همکاران [10]، نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده اند و دلیل آنرا نقش کاتالیزوری لایه های سیلیکاتی نانورس در واکنش پخت اپوکسی عنوان کرده اند. به عبارت دیگر، کاتیون آمین های پروتونه در لایه های نانورس به عنوان یک کاتالیزور اسیدی فعالیت بیشتری نسبت به ماده پخت از خود نشان داده و سبب پخت سریعتر اپوکسی می شوند. [11].

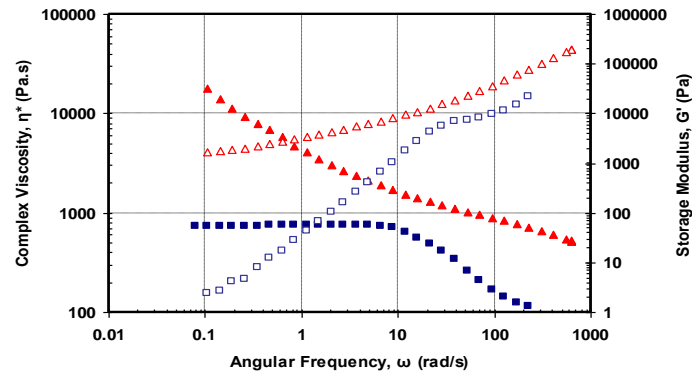


شکل 10: تغییرات ویسکوزیته مختلط (η^*) برحسب زمان اپوکسی حاوی ماده پخت (▲) و اپوکسی/نانورس (EN) حاوی ماده پخت (■) در دمای 240°C

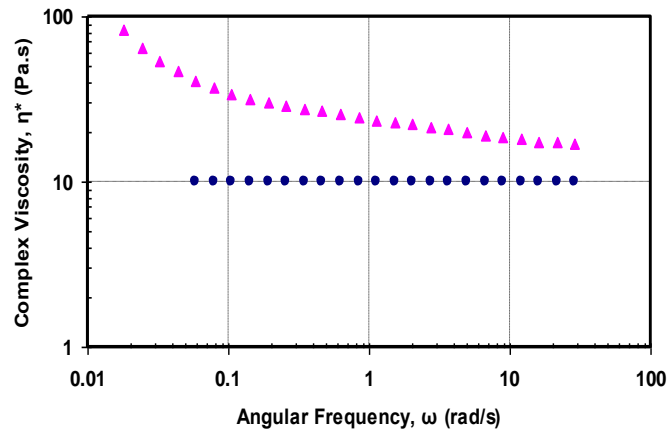
3-4-نتایج ریولوژی:

شکل 11 منحنی تغییرات ویسکوزیته مختلط (η^*) و مدول ذخیره (G') برحسب بسامد زاویه ای را برای PBT، PBT/ نانورس (BN)، اپوکسی، و اپوکسی/ نانورس (EN) نشان می دهد. مشخص است که نمونه های BN و EN رفتار غیر انتهای در مدول ذخیره و چرخش رو به بالای ویسکوزیته در بسامدهای پایین را از خود نشان می دهند. به نظر می رسد که PBT و اپوکسی از توانایی یکسان در ایجاد ساختار درج گذاری در نانوکامپوزیت برخوردار بوده و این نتیجه بخوبی با نتایج مشاهده شده در آزمون XRD در تطابق می باشد.

a)



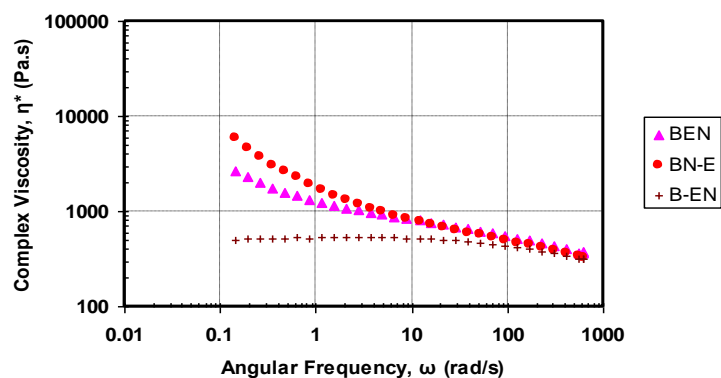
b)



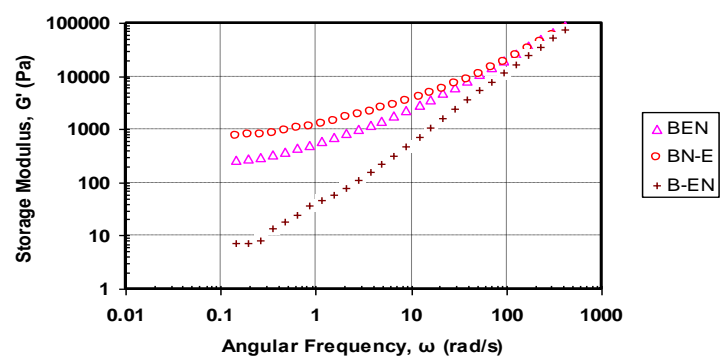
شکل 11: مقادیر ویسکوزیته مختلط (η^*) و مدول ذخیره (G') بر حسب بسامد زاویه‌ای برای PBT (□, ■) و نانورس / PBT (BN) (▲, Δ)، و اپوکسی (●) و اپوکسی / نانورس (EN) (▲). نمادهای توخالی مربوط به مدول ذخیره و نمادهای توپر مربوط به ویسکوزیته مختلط می‌باشد.

جهت بررسی تاثیر پارامتر ترتیب خوراک‌دهی بر خواص نانوکامپوزیت سه نمونه زیر تهیه شد: 1) خوراک‌دهی همزمان سه جزء PBT، اپوکسی و نانورس (BEN)، 2) تهیه نمونه براساس مستریچ نانورس در PBT (BN-E)، و 3) تهیه نمونه براساس مستریچ نانورس در اپوکسی (B-EN). خواص ویسکوالاستیک خطی نمونه نانوکامپوزیت‌های ترکیبی تهیه شده در شکل 12 نشان داده شده است. همان گونه که در شکل نیز مشص است ترتیب خوراک‌دهی تاثیر زیادی بر رفتار رپولوژیکی نانوکامپوزیت دارد. این نتایج در تضاد با نتایج مشاهده شده از آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) دارد که در آنجا مشاهده گردید که ترتیب خوراک‌دهی هیچ تاثیری بر میزان باز شدن صفحات نانورس نداشته و برای هر سه نمونه تقریباً برابر و مساوی بود.

a)

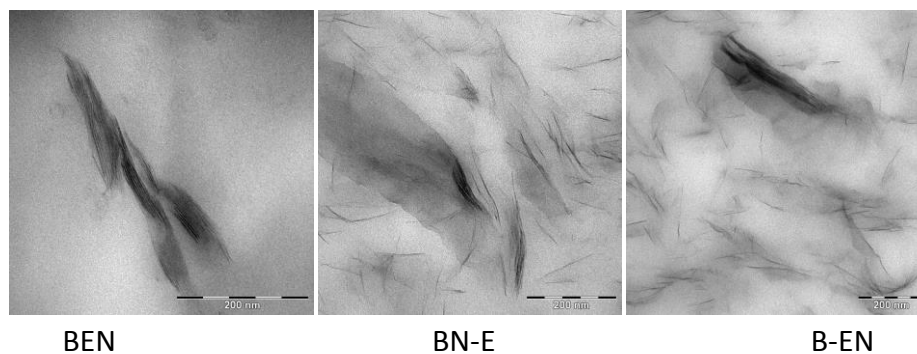


b)



شکل 12: منحنی (a) ویسکوزیته مختلط (η^*) و (b) مدول ذخیره (G') بر حسب بسامد زاویه ای برای نانوکامپوزیت های ترکیبی BEN, BN-E, B-EN

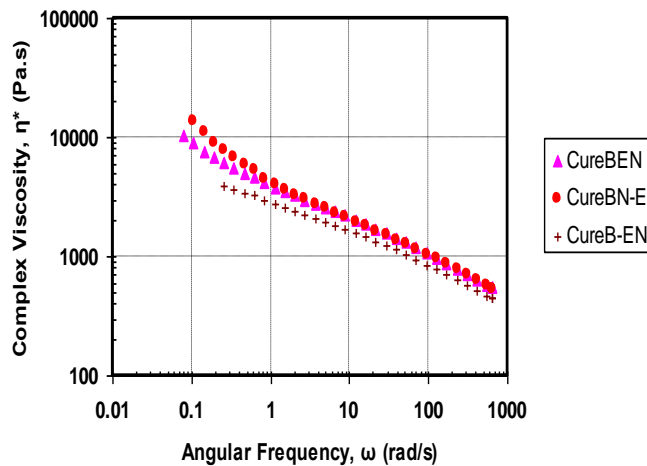
هر دو نمونه BEN و BN-E دارای ویسکوزیته و الاستیسیته بیشتر در مقایسه با نمونه B-EN بوده و رفتار شبه جامد در بسامدهای زاویه ای پایین از خود نشان می دهند که این بدلیل حضور نانورس در بستر و توزیع بهتر آن در نانوکامپوزیت در مقایسه با نمونه B-EN می باشد. در نمونه B-EN ذرات نانورس درون قطرات اپوکسی حبس شده و به علت نسبت منظر بالا و ویسکوزیته زیاد بستر و فاز متفرق امکان مهاجرت آن از قطره به درون بستر PBT وجود ندارد. لذا رفتار غیر انتهایی در مدول ذخیره و چرخش رو به بالای ویسکوزیته در بسامدهای پایین برای نمونه B-EN مشاهده نمی گردد. [12] این نظریه بخوبی توسط ریزنگار های TEM که در شکل 13 ارائه گردیده اثبات می شود.



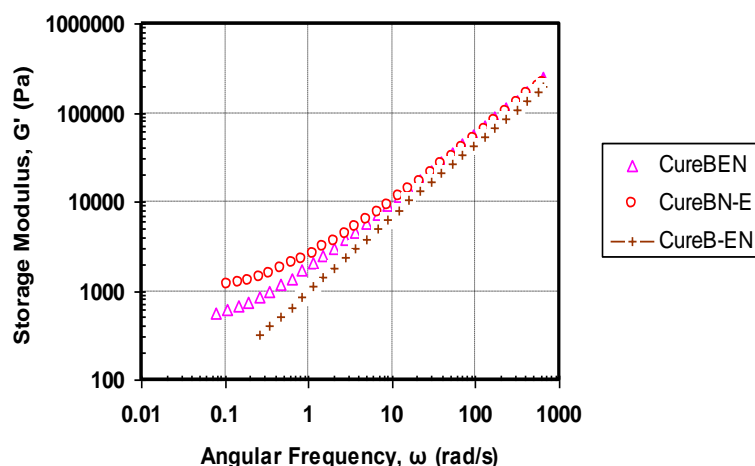
شکل 13: ریزنگار TEM مربوط به نمونه نانوکامپوزیت‌های BEN، BN-E و B-EN

همان‌گونه که در شکل فوق مشاهده می‌گردد، هر دو نمونه BEN و BN-E ریزساختار درج گذاری شده و ورقه ورقه شده را از خود نشان می‌دهند و صفحات و دسته لایه‌های نانورس بخوبی در بستر PBT پخش شده‌اند در حالی که در نمونه B-EN ذرات نانورس عمدتاً درون قطرات فاز متفرق اپوکسی حبس شده اند. [13]. از جمع بندی نتایج آزمون ریزولوژی و XRD نمونه نانوکامپوزیت‌های ترکیبی می‌توان گفت که اگرچه ترتیب خوراک‌دهی بر میزان درج گذاری و پخش نانورس تأثیری ندارد، اما تأثیر زیادی بر میزان توزیع نانورس و سهم آن در هر فاز دارد. علیرغم تمایل ترمودینامیکی یکسان PBT و اپوکسی با نانورس، به علت بالا بودن زمان مهاجرت و جابجایی نانورس از قطرات اپوکسی به بستر PBT نسبت به زمان فرایند اختلاط، نانورس امکان جابجایی از قطره اپوکسی به بستر را در نمونه B-EN ندارد. نتایج بدست‌آمده از انجام آزمون‌های ریزولوژیکی مشابه بر روی نمونه نانوکامپوزیت‌های ترکیبی پخت‌شده روند مشابهی که در مورد نمونه‌های پخت‌نشده بیان شده را نشان می‌دهد (شکل 13). از نتایج بدست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که فرایند پخت سبب تغییرات جزئی در میزان پخش و توزیع نانورس داشته و این در تطابق با نتایج مشاهده شده در آزمون XRD می‌باشد. افزایش در ویسکوزیته مختلط و مدول ذخیره نمونه‌های پخت شده در مقایسه با نمونه‌های پخت‌نشده عمدتاً بدلیل پخت قطرات اپوکسی و افزایش چسبندگی بین سطحی فاز متفرق و بستر می‌باشد. [14].

(a)



(b)



شکل 13: منحنی (a) ویسکوزیته مختلط (η^*) و (b) مدول ذخیره (G') بر حسب بسامد زاویه‌ای برای نانوکامپوزیت-های ترکیبی پخت‌شده CureBEN، CureBN-E، و CureB-EN

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری :

☑ نتایج حاصل از آنالیز حرارتی و ریدولوژی حاکی از دو فاز بودن آلیاژ PBT/اپوکسی می‌باشد، که این نتیجه می‌تواند ناشی از بالا بودن جرم مولکولی اپوکسی مورد استفاده باشد. هم‌چنین نشان داده شد که فرایند پخت در آلیاژ بصورت انتخابی فاز اپوکسی را شبکه‌ای کرده و تاثیری بر فاز PBT ندارد.

☑ در بررسی آزمون پراش اشعه ایکس این موضوع که عامل پخت تاثیر چندانی روی بلورینگی PBT ندارد هم‌چنان که پخت تاثیری روی PBT نداشته است اما خود رزین اپوکسی روی بلورینگی PBT تاثیر می‌گذارد.

☑ از نتایج حاصل از آزمون کشش دریافتیم اضافه کردن اپوکسی به PBT موجب افزایش مدول و افزایش سفتی زنجیره می‌شود که این افزایش مدول به علت برهمکنش قوی بین گروه‌های OH رزین اپوکسی و گروه‌های کربوکسیلیک پلی بوتیلن ترفتالات است.

☑ نتایج آزمون کشش آلیاژ PBT/اپوکسی نشان می‌دهد که اضافه کردن عامل پخت موجب افزایش مدول کششی خواهد شد زیرا پخت موجب سفتی و سختی زنجیره می‌شود.

مراجع:

[1] C.M. Gómez, I. Porcar, I.S. Monzo, C. Abad, A.N. Campos, Eur. Polym. J., 43, 360, (2007).

[2] F. Xie, C.X. Zhou, W. Yu, D.F. Wu, Eur. Polym. J., 41, 2171, (2005).

[3] F. Xie, C.X. Zhou, W. Yu, Polym. Composites, 72, (2008).

- [4] H. Zhang, SH. Sun, M. Ren, Q. Chen,, J. Song, H. Zhang, Z. Mo, J. Appl. Polym. Sci, 109, 4082, (2008).
- [5] A. Saadat, H. Nazockdast, F. Sepehr, M. Mehranpour, Polym. Eng. Sci., 50, 2340, (2010).
- [6] T. E. Sandhya, C. Ramesh, S. Sivaram, Macromolecules, 40, 6906, (2007).
- [7] Y. W. Mai, Z. Zh. Yu, Polymer Nanocomposites, Woodhead Publishing Limited, CRC Press, (2006).
- [8] K. Jayanarayanan, T. Jose, S. Thomas, K. Joseph, Eur. Polym. J., 45, 1738, (2009).
- [9] M.M. Salehi, H Nazockdast, Gh R Pircheraghi Journal of Macromolecular Science, Part B(2012)
- [10] X. Yi, L. Xu, Y.L. Wang, G.J. Zhong, X. Ji, Zh.M. Li, Eur. Polym. J., 46, 719, (2010).
- [11] E. Nazockdast, H. Nazockdast, F. Goharpey, Polym Eng. Sci., 48, 1240, (2008).
- [12] Y. W. Mai, Z. Zh. Yu, Polymer Nanocomposites, Woodhead Publishing Limited, CRC Press, (2006).
- [13] D. Dean, R. Walker, M. Theodore, E. Hampton, E. Nyairo, Polymer, 46, 3014, (2005).
- [14] R. Foudazi, H. Nazockdast, Appl. Rheol., 20, 1221