

پیش‌بینی ویسکوزیته آمیزه‌های لاستیکی در محدوده سرعت برشی اکسترودر با استفاده از مقایسه بین ویسکوزیته حاصل شده از آزمون های دستگاه RPA و رئومتر کاپیلاری

علیرضا خانی، فرشاد کارگران، علی تاجداری، حسین شریفی
کارشناس تحقیق و توسعه اداره طراحی فرآیند و فرآورده‌ها-شرکت ایران یاسا تایر و رابر

khani.alireza1373@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش به پیش‌بینی ویسکوزیته یک نمونه آمیزه لاستیکی در محدوده سرعت برشی اکسترودر به کمک مقایسه ویسکوزیته برشی کمپلکس اندازه‌گیری شده با آزمون تحلیلگر پردازش لاستیک (RPA) در دو حالت روبش فرکانس و روبش کرنش با ویسکوزیته برشی حاصل شده از رئومتر کاپیلاری با نسبت‌های L/D ۲۰، ۱ و ۳۳، ۶ پرداخته شد. کلیه آزمون‌های مذکور در یک دمای ثابت اخذ گردید. نتایج حاصل از آزمون روبش فرکانس در کرنش‌های متفاوت حاکی از آن است که با افزایش میزان کرنش آزمون، ویسکوزیته کمپلکس به شدت افزایش یافته و رفتار جریان به حالت پایدار متمایل می‌شود بنابراین نمودار حاصل از آزمون روبش فرکانس در کرنش بیشتر به رفتار جریان حالت پایدار آزمون کاپیلاری، نزدیک‌تر است حال آن‌که در آزمون روبش کرنشی با افزایش فرکانس، ویسکوزیته کمپلکس به شدت کاهش یافته و رفتار جریان از حالت پایدار فاصله می‌گیرد پس نمودار حاصل از آزمون روبش کرنش در فرکانس کمتر به رفتار جریان حالت پایدار آزمون کاپیلاری، نزدیک‌تر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ویسکوزیته کمپلکس؛ ویسکوزیته برشی؛ رئومتر کاپیلاری؛ آزمون RPA؛ روبش فرکانسی؛ روبش کرنشی

محور مقاله: پیش‌بینی ویسکوزیته آمیزه‌های لاستیکی در سرعت‌های برشی بالاتر (محدوده سرعت برشی اکسترودر)

مقدمه

لاستیک یکی از پرکاربردترین مواد در محصولات مهندسی است. مزایای لاستیک مانند الاستیسیته و میرایی زیاد سبب شده که در کاربردهای مختلف از جمله تایر، میراگر، واشر، آب بند، تسمه نقاله و بسیاری از محصولات مهندسی دیگر به کرات استفاده شود [۱]. به همین جهت بررسی خواص رئولوژیکی آمیزه‌های لاستیکی حین فرآورش به ویژه در حین فرآیند اکستروژن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از جمله پارامترهای مهم رئولوژیکی قابل بررسی، ویسکوزیته آمیزه‌های لاستیکی می‌باشد. از انواع ویسکوزیته‌های مهم و قابل بررسی، ویسکوزیته برشی پایدار و ویسکوزیته دینامیک کمپلکس است که در این پژوهش به آن اشاره خواهد شد. معادله زیر ویسکوزیته جریان پایدار را تعریف می‌کند:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

رابطه ۱:

که η ، $\dot{\gamma}$ و τ به ترتیب ویسکوزیته جریان پایدار، سرعت برشی و تنش برشی را نشان می‌دهند.

همچنین مقدار مطلق ویسکوزیته کمپلکس توسط معادله زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$|\eta^*| = \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2}$$

رابطه ۲:

که پارامترهای η' و η'' به ترتیب بیانگر ویسکوزیته مدول اتلاف و ویسکوزیته مدول ذخیره هستند.

در مجموع می‌توان ویسکوزیته را به عنوان سیالیت یک مایع یا میزان مقاومت آن در برابر جریان در نظر گرفت که تا حد زیادی تابع پارامتری به نام سرعت برشی است. سرعت برشی در اصطلاح فنی‌تر، سرعت حرکت لایه‌های سیال از کنار یکدیگر است [۳]. این امر خود سبب بروز پدیده‌هایی از قبیل تورم دای مذاب خروجی و شکست مذاب می‌گردد. شکست مذاب پدیده‌ای است که در تنش‌های برشی بیش از مقدار بحرانی بر مذاب به وجود آمده که منجر به زبری در سطح ماده خروجی از اکسترودر می‌شود [۴]. تورم دای زمانی اتفاق می‌افتد که ماده‌ای از دای کپیلاری خارج شود. یکی از راه‌های توضیح تورم دای، در نظر گرفتن توانایی مذاب پلیمر در به خاطر سپردن تاریخچه جریان آن است. ایده اصلی این است که تصور شود یک سیال از مخزن به داخل یک دای کاپیلاری به صورت حرکت از یک استوانه با L/D کم به استوانه‌ای خود بازگشته و اثر تورم دای ایجاد می‌شود. در صورتی که زمان اقامت سیال در دای کوتاه‌تر از زمان آسودگی کامل آن باشد، سیال تمایل دارد به شکل اولیه آن‌ها به یک روند معنی‌دار و به دنبال آن یک درک از میزان ویسکوزیته مذاب درون جریان اکسترودر برسیم.

بخش تجربی

در این پروژه یک آمیزه لاستیکی مرجع با فرمولاسیون مشخص مطابق جدول ۱ به عنوان نمونه در نظر گرفته شد.

جدول ۱: فرمولاسیون آمیزه مرجع

مواد	NR	SBR	N۳۳۰	Ar-oil	ZnO	St-A	S	MBTS	CBS
مقدار (phr)	۵۰	۵۰	۶۰	۲۵	۵	۲	۲	۰,۴	۱,۴

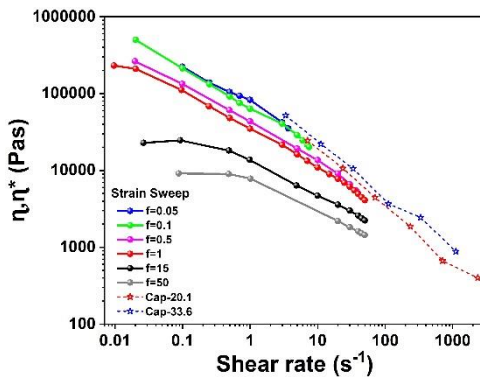
به منظور تعیین ویسکوزیته حالت پایدار حاصل از آزمون رئومتر کاپیلاری و ویسکوزیته کمپلکس حاصل از آزمون RPA، آزمون‌های کاپیلاری و RPA (در دو حالت روبش فرکانس و روبش کرنش) تحت شرایط جدول ۲ اخذ شد.

جدول ۲- شرایط آزمون‌های کاپیلاری و RPA.

سرعت (cm/min)	L/D دای	دما (°C)	آزمون کاپیلاری
۰,۰۶			پیستونی
۰,۲		۱۰۰	
۰,۶	۲۰,۱		
۲	۳۳,۶		
۶			
۲۰			
فرکانس (Hz)	کرنش (%)	دما (°C)	آزمون RPA
۰,۰۵			روبش کرنش
۰,۱		۱۰۰	
۰,۵	متغیر		
۱			
۱۵			
۵۰			
			روبش فرکانس
	۰,۰۷	۱۰۰	
	۰,۱۴		
متغیر	۱		
	۲۵		
	۳۵		
	۵۵		

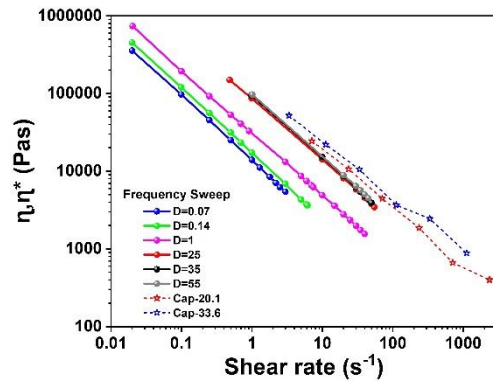
شکل ۱ نمودار مقایسه بین ویسکوزیته برشی حالت پایدار در دو L/D مختلف یعنی ۲۰,۱ و ۳۳,۶ و ویسکوزیته کمپلکس حاصل از آزمون روبش فرکانس را در برابر سرعت برش در کرنش‌های مختلف در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است، با افزایش میزان کرنش آزمون، ویسکوزیته کمپلکس به شدت افزایش یافته و رفتار جریان به حالت پایدار متمایل می‌شود. بنابراین نمودار حاصل از آزمون روبش فرکانس در کرنش بیشتر به رفتار جریان حالت پایدار آزمون کاپیلاری، نزدیک‌تر است. شکل ۴ نمودار ویسکوزیته پایدار و کمپلکس را در برابر سرعت برش برای آزمون روبش کرنش نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش فرکانس، ویسکوزیته

کمپلکس به شدت کاهش یافته و رفتار جریان از حالت پایدار فاصله می‌گیرد. بنابراین نمودار حاصل از آزمون روبش کرنش در فرکانس کمتر به رفتار جریان حالت پایدار آزمون کاپیلاری، نزدیک‌تر است.



شکل ۲- نمودار دو لگاریتمی ویسکوزیته پایدار و کمپلکس

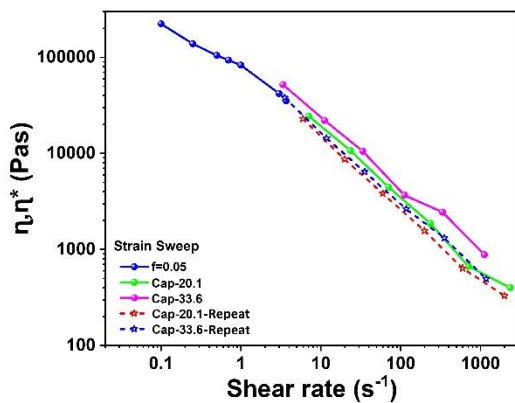
تحت روبش کرنش در فرکانس‌های مختلف



شکل ۱- نمودار دو لگاریتمی ویسکوزیته پایدار و کمپلکس

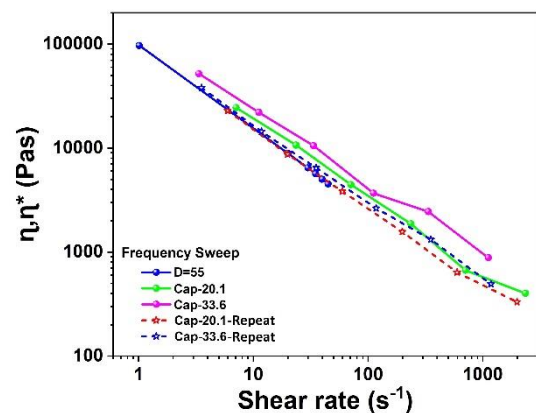
تحت روبش فرکانس در کرنش‌های مختلف

در ادامه نیز نتایج حاصل از آزمون کپیلاری با آزمون RPA (در بالاترین کرنش آزمون روبش فرکانس و کمترین فرکانس آزمون روبش کرنش) مطابق شکل‌های ۳ و ۴ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۴- مقایسه نمودار دو لگاریتمی ویسکوزیته پایدار

با ویسکوزیته کمپلکس تحت روبش کرنش در فرکانس ۰.۰۵ Hz.



شکل ۳- مقایسه نمودار دو لگاریتمی ویسکوزیته پایدار با ویسکوزیته

کمپلکس تحت روبش فرکانس در کرنش ۵۵ درصد.

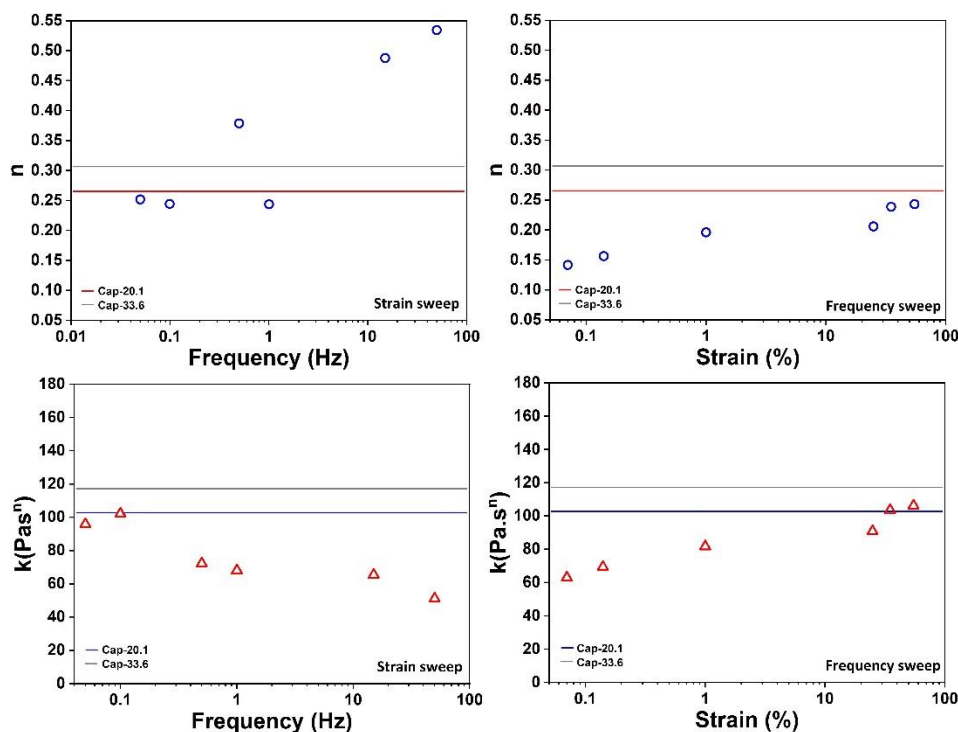
بخش نظری

مطابق مدل پاورلا، یک رابطه خطی معکوس بین $\ln(\dot{\gamma})$ و $\ln(\eta, \eta^*)$ وجود دارد.

$$\eta, \eta^* = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\ln(\eta, \eta^*) = \ln(k) + (n - 1) \ln(\dot{\gamma}) \quad \text{رابطه ۴}$$

دو پارامتر k و n که به ترتیب ضریب همبستگی جریان و ثابت پاورلا بوده و از عرض از مبدأ و شیب نمودار $\ln(\eta, \eta^*)$ در برابر $\ln(\dot{\gamma})$ حاصل می‌شود، برای حالت‌های مختلف آزمون RPA محاسبه و با پارامترهای پاورلا حاصل از آزمون کاپیلاری در دو L/D برابر با ۲۰،۱ و ۳۳،۶ مقایسه شد که در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای مدل پاورلا در فرکانس‌های پایین‌تر آزمون روبش کرنش و در کرنش‌های بالاتر آزمون روبش فرکانس به نتایج آزمون کاپیلاری نزدیک‌تر است.



شکل ۵- مقایسه پارامترهای مدل پاورلا مستخرج از آزمون کپیلاری و مقایسه آن با آزمون‌های روبش کرنش و فرکانس.

بحث و نتیجه‌گیری

به منظور یافتن راهی جهت پیش بینی ویسکوزیته آمیزه‌های لاستیکی در سرعت‌های برشی بالاتر (در محدوده 1000 s^{-1} که محدوده سرعت برشی اکسترودر می‌باشد)، ویسکوزیته برشی حالت پایدار حاصل از آزمون رئومتر کپیلاری در دو L/D مختلف با ویسکوزیته برشی کمپلکس حاصل از آزمون RPA در دو حالت روبش فرکانس و روبش کرنش تحت شرایط معین اخذ و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شد. همان‌طور که در بخش تجربی به آن اشاره شد در آزمون روبش فرکانس با افزایش میزان کرنش آزمون، ویسکوزیته کمپلکس به شدت افزایش یافته و رفتار جریان به حالت پایدار متمایل می‌شود. بنابراین نمودار حاصل از آزمون روبش فرکانس در کرنش بیشتر به رفتار جریان حالت پایدار آزمون کپیلاری، نزدیک‌تر است (شکل ۱) حال آنکه در آزمون روبش کرنشی ملاحظه می‌شود با افزایش فرکانس، ویسکوزیته کمپلکس به شدت کاهش یافته و رفتار جریان از حالت پایدار فاصله می‌گیرد. بنابراین نمودار حاصل از آزمون روبش کرنش در فرکانس کمتر به رفتار جریان حالت پایدار آزمون کپیلاری، نزدیک‌تر است (شکل ۲). همچنین این امر با استخراج دو پارامتر k و n که به ترتیب ضریب همبستگی جریان و ثابت پاورلا بوده و از عرض از مبدأ و شیب نمودار $\ln(\eta, \eta^*)$ در برابر $\ln(\dot{\gamma})$ حاصل می‌شود، برای حالت‌های مختلف آزمون RPA محاسبه و با پارامترهای پاورلا حاصل از آزمون کپیلاری در دو L/D برابر با ۲۰٫۱ و ۳۳٫۶ مقایسه شد که در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای مدل پاورلا در فرکانس‌های پایین‌تر آزمون روبش کرنش و در کرنش‌های بالاتر آزمون روبش فرکانس به نتایج آزمون کپیلاری نزدیک‌تر است.

مراجع

- [۱] Bhowmick, A.K. Rubber Products Manufacturing Technology; CRC Press, ۱۹۹۴
- [۲] Dao TT, Ye AX, Shaito AA, Roye N, Hedman K. Capillary Rheometry: Analysis of Low-Viscosity Fluids, and Viscous Liquids and Melts at High Shear Rates. *Am Lab* ۲۰۰۹;۵.
- [۳] Moonay D. What is Shear Rate and Why is it Important?. *Am Lab* ۲۰۱۷;۴۹:۳۵-۷.
- [۴] Shenoy A V. Extensional flow properties. *Rheol. Fill. Polym. Syst., Springer* ۱۹۹۹; ۳۹۵-۴۱۵.
- [۵] Koopmans RJ. Die swell or extrudate swell. *Polypropylene: An A-Z reference* ۱۹۹۹; ۱۵۸-۶۲.