

بررسی خواص کشش مذاب آلیاژهای سه‌گانه پلی الفینی (پلی پروپیلن / پلی اتیلن /

اتیلن پروپیلن دی ان مونومر) به هدف بهبود فرایندپذیری پلی پروپیلن

سمیه محمدیان گزاز^۱، مهری علی محمدی^{۲*}

۱. دانشیار گروه شیمی، دانشگاه پیام نور، ایران.

۲. کارشناسی ارشد شیمی، دانشگاه پیام نور، ایران.

(تاریخ وصول: ۹۸/۰۳/۱۱ - تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۵/۳۱)

Study on the melt tension behavior of polyolefinic terblends to improve the processability of polypropyleneSomayeh Mohammadian Gazaz¹, Mehri Alimohammadi^{2*}

1. Associate Professor of Chemistry, Payame Noor University, Iran.

2. M.A in Chemistry, Payame Noor University, Iran.

(Received: Jun. 01, 2019 - Accepted: Aug. 22, 2019)

Abstract

Considering the good properties and price, PP (polypropylene) is a very important organic polymer with a wide application. However, because of its low elasticity and poor melt strength, the process is difficult to handle. In this work, the effect of blending with HDPE and EPDM on the high temperature properties of PP was studied. PP/HDPE/EPDM terblends having various compositions was prepared then the hot tensile and sagging tests were performed. The effects of composition, temperature and load speed were evaluated. Hot stress-strain behavior proved that at every temperature and speed, blending improved the properties of PP. All blends had the better elastic modulus, tensile strength and post yield modulus; hence the better processability than PP. The changes in temperature and load speed also affected the results. The sagging trend was improved in several blends as well. Totally, the blending will promoted the hot tension and the melt strength of PP.

Keywords: Cyanuric Triazide, Nitrene Intermediate, DFT and MP2 Calculations, IR and NMR Spectroscopy.

چکیده

با توجه به خواص و قیمت مناسب، پلی پروپیلن (PP) یک پلیمر با ساختار آلی و با کاربرد بسیار در صنعت است، اما از آنجا که دارای الاستیسیته کم و استحکام مذاب ضعیف است، فرایند آن دشوار است. در این پژوهش، اثر آلیاژ کردن PP با پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر (EPDM) بر مقاومت آن در دمای بالا مطالعه شده است. آلیاژهای سه‌گانه PP/HDPE/EPDM دارای ترکیب درصدهای مختلف، با استفاده از اکسترودر دو ماردونه همسوگرد آزمایشگاهی تهیه شدند و اثر سرعت اعمال نیرو و دما بر خواص نمونه‌ها توسط آزمون‌های کشش داغ و مقاومت وزنی صفحه داغ مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب، اثرات ترکیب درصد آلیاژ و فرآیند، مانند دمای ورقه و سرعت کرنش بررسی شد. رفتار تنش-کرنش داغ در دماها و سرعت‌های کشش مختلف نشان داد که آلیاژ سه‌تایی، خواص مذاب PP را بهبود می‌بخشد. در تمام آلیاژها، مدول الاستیک، تنش تسلیم و مدول پس از تسلیم در مقایسه با PP خالص تغییرات مطلوبی داشتند. افزایش درجه حرارت و سرعت کشش (سرعت کرنش) اثرات قابل توجهی بر خواص کشش داغ داشت و به‌طور کل عملیات آلیاژسازی باعث بهبود کشش‌پذیری و مقاومت مذاب PP شد.

واژگان کلیدی: پلی الفین، پلی پروپیلن، آلیاژسازی، کشش داغ، مقاومت مذاب.

*Corresponding Author: Mehri Alimohammadi

Email: teh.pnu@gmail.com

نویسنده مسئول: مهری علی محمدی

مقدمه

[۳]. از مشکلات این روش، محدودیت آن به تولید محصولاتی با ضخامت و عمق کم و وجود تنش‌های باقیمانده در قطعه است که سبب پایین آمدن دمای کاربری محصول می‌شود.

تغییر در شیوه شکل‌دهی بسیار خاص و محدود بوده و از نظر اقتصادی به صرفه نیست. مناسب‌ترین راه‌های بهبود قابلیت شکل‌دهی حرارتی پلی پروپیلن، تغییر در ساختار شیمیایی و یا آمیزه‌سازی با بعضی مواد دیگر است. اصلاح در ساختار شیمیایی با ایجاد شاخه‌های بلند جانبی، بالا بردن جرم مولکولی و پهن‌تر کردن توزیع وزن مولکولی انجام می‌گیرد که منجر به تولید انواع پلی پروپیلن با مقاومت مذاب بالا می‌شود که برای شکل‌دهی حرارتی مناسب هستند [۹-۴]؛ اما اصلاح شیمیایی روشی محدود و هزینه‌بر بوده و کمتر در دسترس است و علاوه بر آن در تولید ورق به روش اکستروژن نیز مشکلاتی را به وجود می‌آورد. بنابراین روش آمیزه‌سازی با مواد دیگر که از فرایندهای پس از راکتور است، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. موادی که به این منظور به پلی پروپیلن افزوده می‌شوند، یاف [۱۳-۱۰]، پرکننده‌های معدنی [۱۹-۱۴]، مواد هسته‌گذار [۲۳-۲۰] را شامل می‌شود. بیشتر مطالعات انجام‌شده در زمینه آلیاژسازی PP محدود به استفاده از کوپلیمرهای اکریلیک بوده است.

در این پژوهش، جهت بهبود

پلی پروپیلن دارای خواص مطلوبی مانند سختی، مقاومت شیمیایی و حرارتی و مکانیکی، نفوذپذیری، دمای کاربری بالا و بی‌اثر بودن بر مواد غذایی است. مجموع این خواص و قیمت مناسب موجب شده است که این پلیمر در مصارف مختلف فرایند شکل‌دهی حرارتی (بسته‌بندی، خودرویی، کشاورزی، دارویی و ...) مورد توجه قرار گرفته و جایگزین مناسبی برای پلیمرهای معمول مورد استفاده در این فرایند مانند اکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن (ABS)، پلی‌وینیل کلراید (PVC) و پلی‌استایرن (PS) شود [۱]. علی‌رغم فواید مذکور، شکل‌دهی حرارتی این پلیمر با مشکلاتی روبروست. الاستیسیته کم و مقاومت مذاب ضعیف پلی پروپیلن سبب نازکی، غیریکنواختی ضخامت در قطعه تولیدی و شکم دادن بیش از حد ورقه حین گرم کردن می‌گردد. دامنه دمایی شکل‌دهی حرارتی این پلیمر بسیار باریک است [۲].

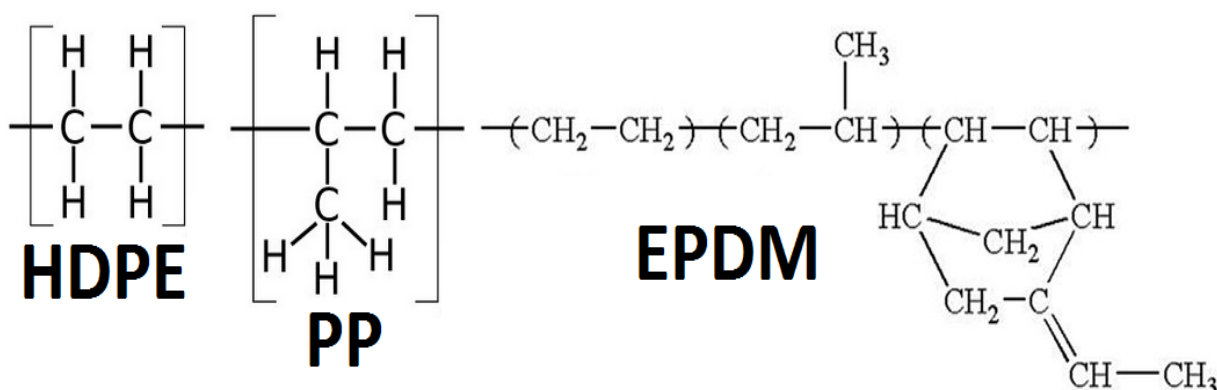
در چند دهه اخیر به منظور بهبود قابلیت شکل‌دهی حرارتی پلی پروپیلن مطالعات فراوانی انجام شده است. در این زمینه، سازندگان دستگاه‌ها و تولیدکنندگان مواد روش‌های گوناگون ابداع نموده‌اند. مثالی از تغییر در تجهیزات و روش شکل‌دهی، شکل‌دهی فشاری در حالت جامد نام دارد که زیر نقطه ذوب، توسط فشار خیلی زیاد و ابزار مکانیکی انجام می‌شود. این فرایند شکل‌دهی قبل از افت شدید مدول پلی پروپیلن در محدوده دمایی که ماده هنوز نسبتاً حالت جامد دارد صورت می‌گیرد

از نوع هموپلیمر با نام تجاری PI-0800 با چگالی 0.9 g/cm^3 ، ساخت مجتمع پتروشیمی بندر امام بود. پلی اتیلن HDPE (EX3) با چگالی 0.94 g/cm^3 ، ساخت مجتمع پتروشیمی اراک و EPDM (Keltan 520) با چگالی 0.86 g/cm^3 ، محصول شرکت DSM هلند بود. متوسط وزنی جرم مولکولی این پلیمرها به ترتیب 250000 ، 200000 و 280000 گرم بر مول بود. ساختار شیمیایی هر یک از این پلی الفینها در شمای ۱ نشان داده شده است.

ترموفرم پذیری PP، تأثیر آمیزه سازی با HDPE و EPDM بر روی قابلیت شکل دهی حرارتی پلی پروپیلن بررسی شده است. جهت پیش بینی رفتار آمیزه ها در فرایند، آزمون های کشش داغ در شرایط مخالف و آزمون افت ورقه داغ، بر روی پلی پروپیلن خالص و آلیاژهای با ترکیب درصدهای مختلف انجام شد.

تجربی

مواد: پلی پروپیلن مورد استفاده در این پژوهش،



شمای ۱. ساختار شیمیایی پلیمرهای مورد استفاده در این پژوهش

سرعت چرخش مارپیچ برای همه آمیزه ها، ثابت و برابر با 200 rpm بود. مذاب حاصل از اکسترودر توسط آب خنک شده و به صورت گرانول جمع آوری گشت. از گرانول های حاصل توسط دستگاه پرس در دمای 220°C و فشار 25 MPa ورقه هایی با ضخامت های $1/5$ میلی متر تهیه شد. جهت بررسی خواص نمونه ها، آزمون های کشش داغ و آزمون های رئولوژیکی انجام شد.

آمیزه سازی: مقادیر مختلف از PE، PP (۳۰ و ۲۰ و ۱۰ درصد) و EPDM (۱۵ و ۱۰ و ۵ درصد) توسط یک اکسترودر دومارپیچه همسوگرد ($L/D=40$)، ساخت شرکت Coperion Werner & Pfliederer آلمان، مخلوط شدند. در نام گذاری نمونه ها حرف B به معنی آلیاژ و اعداد بعد از آن، به ترتیب مقادیر EPDM و PE را نشان می دهد. شرایط دمایی اکسترودر عبارت بود از 170 ، 180 ، 190 ، 200 ، 210 درجه سانتی گراد و

روش‌ها

- سرعت کشش آزمون متناسب با

سرعت شکل‌دهی

- درصد تغییر طول با میزان کشیده شدن

در قالب طی فرایند

نمونه‌های مربوط به این آزمون، به صورت

دمبل مطابق با شکل ۱ توسط پانچ از ورقه‌های

پلیمری تولیدشده با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر، تهیه

شدند.

کشش داغ - بررسی رفتار تنش - کرنش در

دماهای بالا جهت پیش‌بینی عکس‌العمل پلیمر

داغ و نیمه‌مذاب هنگام کشیده شدن، بسیار مفید

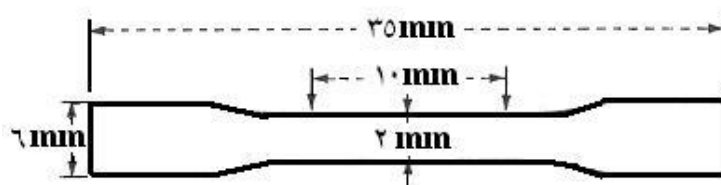
است. این امر با استفاده از آزمون کشش داغ،

امکان‌پذیر بوده و شرایط فرایند به ترتیب زیر

قابل شبیه‌سازی است [۲۴-۲۵]:

- دمای آون کشش داغ متناسب با دمای

ورقه در فرایند



شکل ۱. نمونه آزمون کشش داغ

ورقه پلیمری در آون داغ، روی فولادی، از دو

طرف بسته شده و در دمای مشخصی در محدوده

ذوب، میزان پایین آمدن ورقه در مرکز، توسط

دوربینی ثبت شده و نمودار فاصله شکم دادن

ورقه بر حسب زمان رسم می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آزمون کشش داغ: شمای ۲ یک نمودار

آزمون کشش داغ را به‌طور نمونه نشان می‌دهد.

کمیت‌های مهم موردبررسی در این بخش روی

این نمودار نشان داده شده‌اند که شامل موارد ذیل

می‌باشند:

- مدول کششی الاستیک یا یانگ (Elastic

Modulus): این کمیت از شیب قسمت خطی

قبل از اعمال کشش، حدود ۴ دقیقه زمان

پیش گرم به هر نمونه داده می‌شود تا به یکنواختی

حرارتی مناسب برسد. این آزمایش‌ها در دستگاه

کشش داغ Instron ۶۰۲۵ که دارای محفظه

حرارتی است، در دماهای 120°C ، 135°C ، 150°C و

سرعت کشش ثابت 500mm/min صورت

گرفت. جهت بررسی اثر نرخ تغییر شکل، سرعت

کشش‌های 200 ، 500 ، 800mm/min در دمای

ثابت 135°C اعمال شد. اثر ترکیب درصد آلیاژ

در شرایط ثابت 135°C و 500mm/min بررسی

شد.

آزمون شکم دادن (افت ورقه داغ) - جهت

مطالعه رفتار ورقه مذاب، آزمون شکم دادن

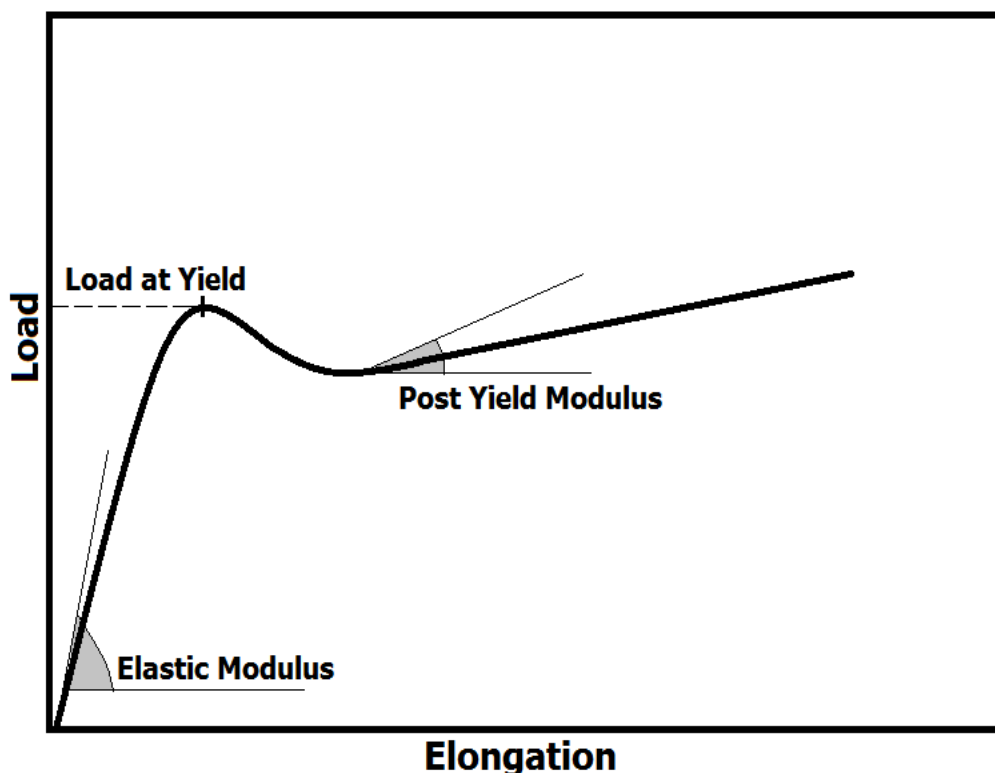
(Sagging) طراحی و انجام شد. در این آزمون،

موجود در ابتدای منحنی تنش-کرنش در درصد کشش کم حاصل می‌گردد.

کشش کم حاصل می‌گردد.

- نیرو در نقطه تسلیم (Load at Yield): این مقدار نیرو مرتبط با حد پایین نیروی لازم به منظور کشش مواد پلیمری است.

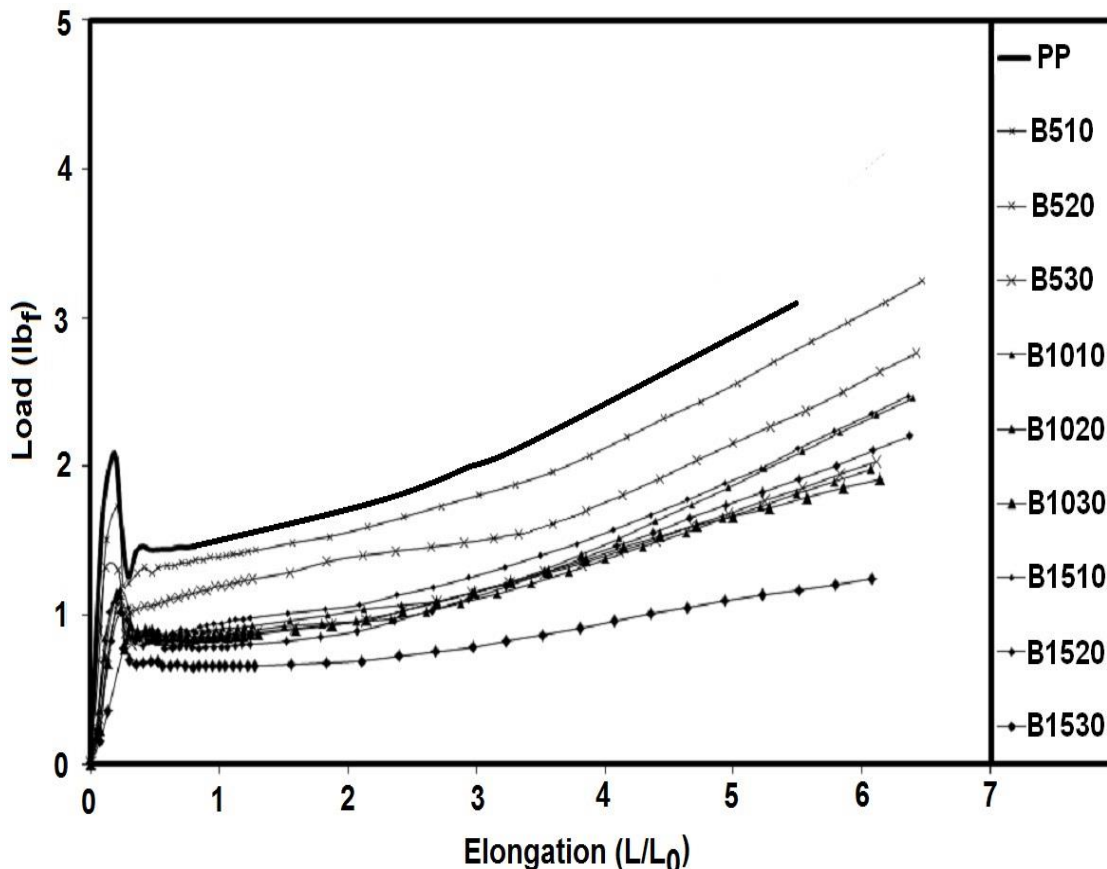
- مدول پس از تسلیم (Post Yield Modulus): این کمیت از شیب منحنی نیرو-ازدیاد طول پلیمر در ناحیه پس از نقطه تسلیم به دست می‌آید و با میزان نیروی تسلیم در حالت نرم شده است.



شماي ۲. نمونه‌ای از نمودار حاصل از آزمون کشش داغ

یک قله در نمودار مشاهده می‌گردد. قبل از تسلیم، تغییر شکل پلیمر، حالت الاستیک دارد که از شیب این قسمت مدول الاستیک قابل محاسبه است. تفاوت‌هایی که در نمودارهای نمونه‌های مختلف است، با محاسبه کمیت‌های مربوط به این آزمون بررسی شدند که شامل مدول الاستیک نیرو در نقطه تسلیم و مدول پس از تسلیم است که در ادامه آورده شده‌اند.

شکل ۲ نمودارهای تنش-کرنش را برای تمام نمونه‌ها در دمای 135°C و سرعت کشش 500mm/min نشان می‌دهد. هنگامی که یک پلیمر نیمه بلوری مانند PP در دمای بالا کشیده می‌شود، پس از اینکه این زنجیرها به حداکثر مقدار ممکن کشش رسیدند، باز شدن و شکستن ریزساختارهای کریستالی شروع می‌شود و پدیده تسلیم در برابر کشش رخ می‌دهد که به صورت



شکل ۲. نتایج حاصل از آزمون کشش داغ نمونه‌ها در دمای 135°C و سرعت کشش 500 mm/min .

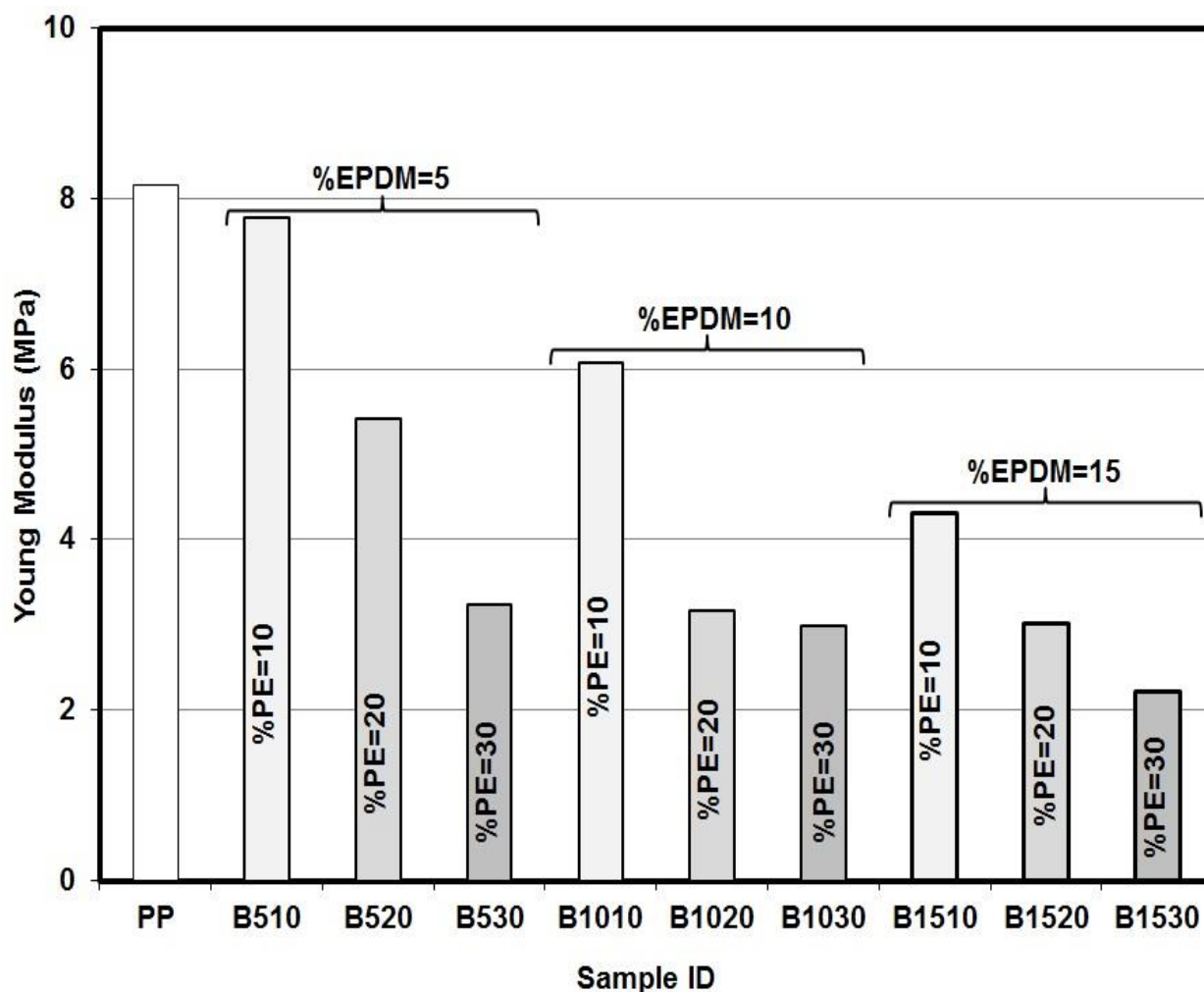
بنابراین در PP بر اثر کشش ساختارهای کشیده شده بیشتری قابل ایجاد است و مدول الاستیک بالاتر است. این بدان معنی است که در مرحله اول فرایند، آلیاژهای PP نیروی کمتری برای کشیده شدن در قالب نیاز دارند.

مطابق با شکل ۴، تغییرات نیرو در نقطه تسلیم روندی مشابه با مدول الاستیک نشان می‌دهد. این مشاهده را می‌توان با اثر مستقیم مدول الاستیک روی نیرو در نقطه تسلیم توجیه نمود که کاهش در مدول آلیاژها منجر به کاهش نیرو در نقطه تسلیم شده است. نتایج نشان داد که تغییر در نقطه تسلیم نمونه‌ها تغییر محسوسی نکرده است. بنابراین در مقدار کشش

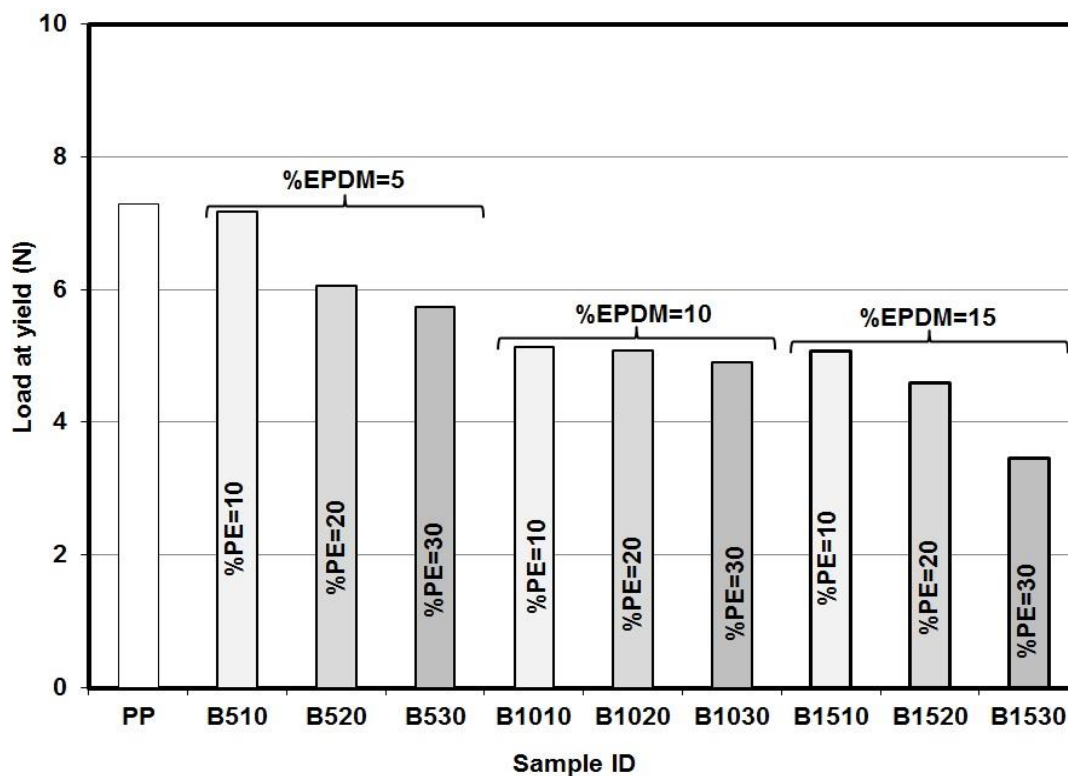
شکل ۳ مدول الاستیک نمونه‌ها را در دمای 135°C و سرعت کشش 500 mm/min نشان می‌دهد. مشخص است که PP خالص نسبت به آلیاژهای PP از مدول الاستیک بالاتری برخوردار است. با افزایش مقدار HDPE و EPDM، مدول الاستیک کاهش می‌یابد. به علت وجود HDPE و EPDM، فاز آمورف آلیاژها از PP بیشتر است و به علت ساختار کریستالی بیشتر PP نسبت به آلیاژها، مقدار زنجیرهای آمورف موجود بین ساختارهای کریستالی، دارای تکیه‌گاه (بخش‌های کریستالی مانند تکیه‌گاه عمل می‌کنند) که قابلیت کشیده شدن و محکم بسته شدن را دارند، بیشتر است.

علت نرم شدن و ذوب شدن EPDM و HDPE، مقاومت به تغییر شکل پلاستیک در آلیاژهای حاوی این پلیمرها کمتر از PP خالص است. به عبارت دیگر EPDM و HDPE، زنجیرهای PP را نرم کرده‌اند. کاهش مدول پس از تسلیم، به معنی کمتر بودن سخت شدن کرنشی است. بنابراین قابلیت فرایند بهبود یافته، جریان‌پذیری بهتر می‌شود و توزیع ضخامت در قطعه، یکنواخت‌تر خواهد بود.

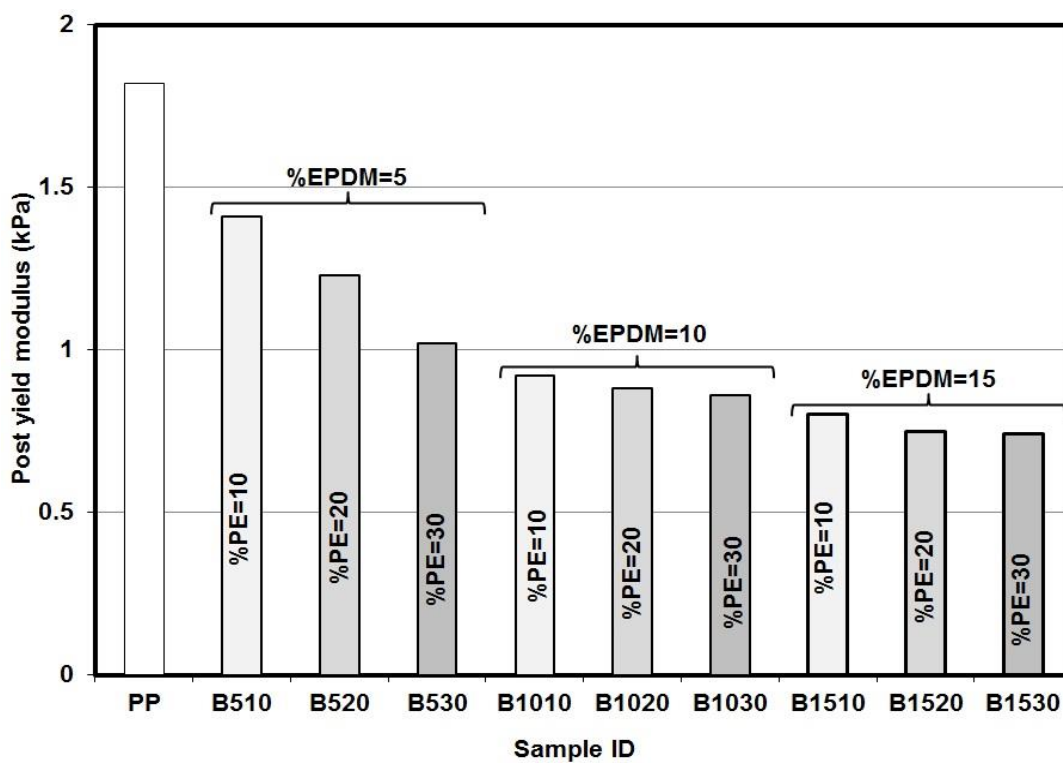
ثابت، آلیاژهای PP را با نیروی کمتری می‌توان فرایند کرد، درحالی‌که تنش‌های باقیمانده در قطعه به وجود نمی‌آید و خطر پاره شدن و نازکی ضخامت قطعه نیز کم خواهد شد. اثر غلظت‌های مختلف HDPE و EPDM روی مدول پس از تسلیم در دمای 135°C و سرعت کشش 500mm/min در شکل ۵ مشاهده می‌شود. افزایش هر یک از آن‌ها سبب کاهش مدول پس از تسلیم می‌شود. می‌توان گفت که در دمای آزمون کشش داغ، به



شکل ۳. تغییرات مدول الاستیک با غلظت HDPE در سه مقدار مختلف از EPDM.



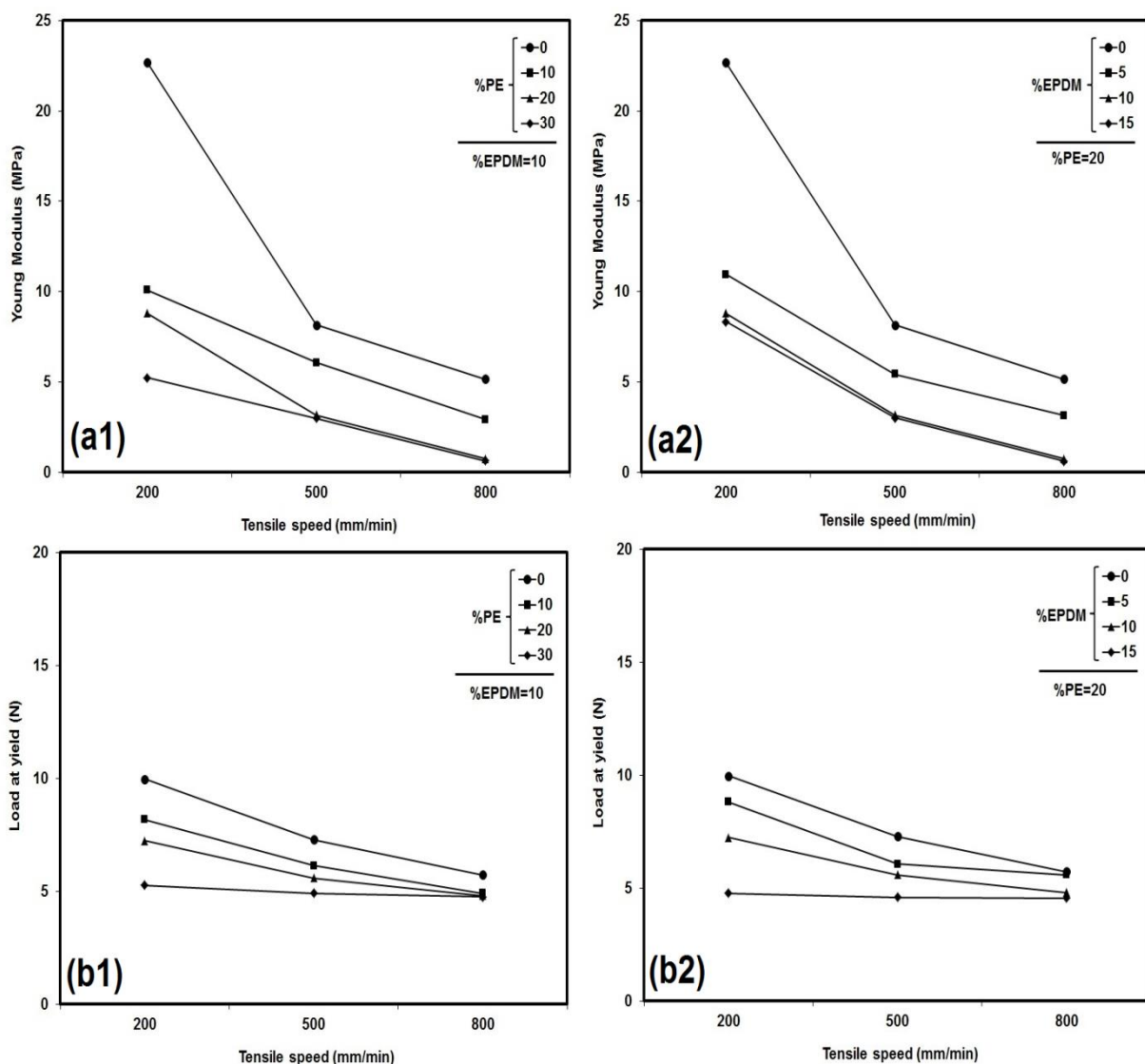
شکل ۴. تغییرات نیرو در نقطه تسلیم با غلظت HDPE در سه مقدار مختلف از EPDM.



شکل ۵. اثر غلظت HDPE و EPDM بر روی مدول پس از تسلیم.

می‌نماید. سرعت کشش بالا، این فرصت را به زنجیرها نمی‌دهد تا بتوانند در برابر نیروی اعمالی عکس‌العمل لازم را نشان داده و در جهت نیرو منظم شوند، لذا با افزایش سرعت، مدول الاستیک و نیرو در نقطه تسلیم کاهش می‌یابند.

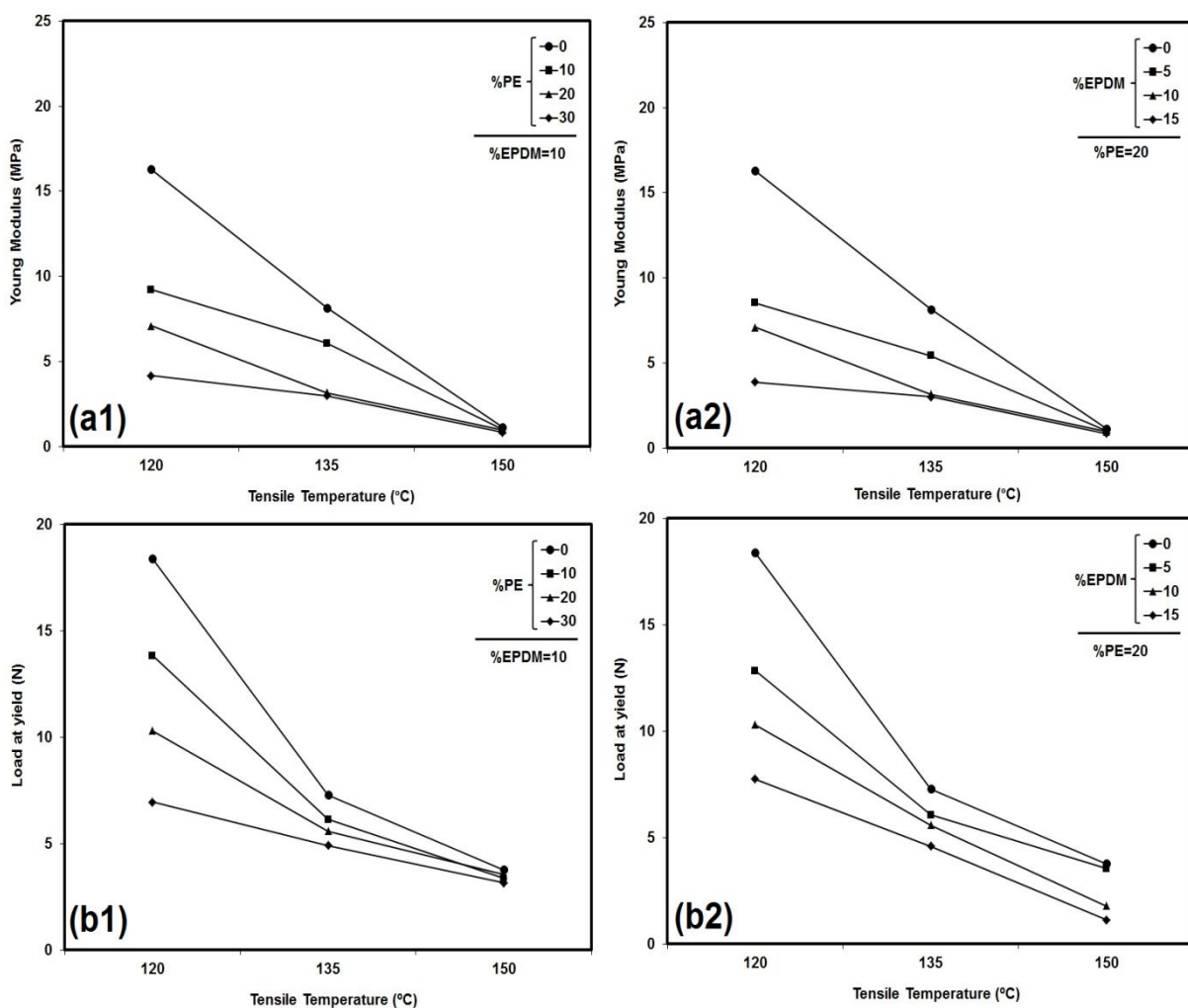
نمودارهای شکل ۶ اثر سرعت کشش را روی مدول الاستیک و نیرو در نقطه تسلیم در دمای ثابت 135°C نشان می‌دهند. در تمام نمونه‌ها با افزایش سرعت کشش، این دو کمیت کاهش می‌یابند. در دمای آزمون، انرژی حرارتی، حرکت زنجیرها را آسان‌تر کرده و جهت‌گیری آن‌ها را در اثر کشش آسان‌تر



شکل ۶. اثر سرعت کشش روی مدول الاستیک (a1: درصد PE مختلف، a2: درصد EPDM مختلف) و نیرو در نقطه تسلیم (b1: درصد PE مختلف، b2: درصد EPDM مختلف) در دمای ثابت 135°C

روی نتایج کشش داغ PP گزارش نموده‌اند [۱۵ و ۲۴]. در دماهای بالا، نیرو در نقطه تسلیم به مقادیر کمتری منتقل می‌شود بنابراین فرایند آسان‌تر می‌شود، اما باید توجه داشت که در دماهای بالا احتمال شکم دادن و پارگی مذاب بیشتر می‌شود؛ بنابراین در ادامه نتایج آزمون شکم دادن (افت ورق داغ) مورد بررسی قرار گرفته است.

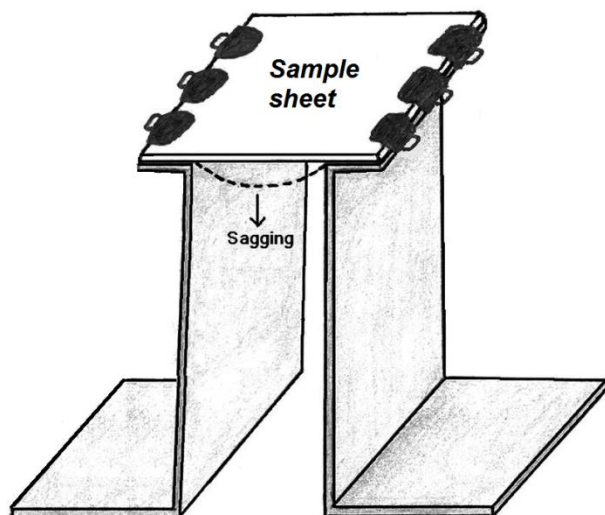
تغییرات مدول الاستیک و نیرو در نقطه تسلیم در دماهای مختلف و سرعت کشش ثابت ۵۰۰mm/min در نمودارهای شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این دو پارامتر، با افزایش دما کاهش می‌یابند. از آنجاکه در دماهای بالاتر میزان حرکت زنجیرهای پلیمر بیشتر است، تسلیم در برابر کشش در نیروی کمتری رخ می‌دهد. محققین دیگری نتایج مشابهی را در مورد اثر سرعت کشش و دما بر



شکل ۷. تغییرات مدول الاستیک (a1: درصد PE مختلف، a2: درصد EPDM مختلف) و نیرو در نقطه تسلیم (b1: درصد PE مختلف، b2: درصد EPDM مختلف) با دما در سرعت کشش ۵۰۰mm/min.

می‌دهد)، توسط دوربینی با دقت مناسب برحسب سانتیمتر ثبت شده و نمودار فاصله شکم دادن ورقه با زمان رسم شده و از آن مقادیر افت نهایی و سرعت افت به دست می‌آید.

نتایج آزمون افت ورقه داغ: شکل ۸ طرح ساده‌ای از این آزمایش را نشان می‌دهد. ورقه پلیمری روی دو پایه فولادی قرار گرفته و با گیره از دو طرف بسته می‌شود. میزان تغییر ارتفاع در مرکز ورقه (جایی که حداکثر شکم دادن رخ



شماي ۳. تصوير آزمون شكم دادن (sagging) نمونه

به بعد، میزان افت ورقه با پلی اتیلن افزایش و شدت می‌یابد. باید توجه داشت که در اینجا وزن ورقه عامل مهمی است که در نمونه‌های مختلف ثابت نیست. با توجه به چگالی مختلف اجزای آمیزه، چگالی نمونه‌ها نیز متغیر است که در جدول (۱) آمده است. مشخص است که EPDM علاوه بر بهبود الاستیسیته مذاب، وزن نمونه را هم کاهش داده است، اما نمونه‌های دارای پلی اتیلن بیشتر، چگالی بیشتر داشته و مقدار افت ورقه داغ آن‌ها تحت وزنشان بیشتر است.

جدول ۱، مقادیر سرعت شکم دهی و میزان شکم دهی نهایی پس از دوازده دقیقه را نشان می‌دهد. جهت تحلیل دقیق‌تر، مقادیر چگالی نمونه‌ها هم در این جدول آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش EPDM در آمیزه، مقدار شکم دادن نمونه کاهش یافته و همچنین سرعت فروافتادن ورقه (شیب نمودار) نیز کم می‌شود. این به مفهوم تأثیر مثبت EPDM بر رفتار دما بالای آلیاژ پلی الفینی است. پلی اتیلن در مقادیر خیلی کم، اثر مطلوب بر نتیجه این آزمون دارد که به دلیل مقاومت مذاب خوب آن است؛ اما از یک مقدار

جدول ۱. نتایج حاصل از آزمون افت حرارتی ورقه داغ

Sample ID	Ultimate Sag Distance (cm)	Sag Rate(cm/s)*10 ³	Density (g/cm ³)
PP	1.501	1.405	0.9
B510	1.195	0.922	0.903
B520	1.252	1.11	0.908
B530	1.569	2.116	0.913
B1010	1.191	0.983	0.902
B1020	1.532	1.76	0.907
B1030	1.75	2.25	0.912
B1510	1.083	0.972	0.901
B1520	1.571	2.1	0.905
B1530	3.216	1.91	0.91

تمام نمونه‌ها با افزایش سرعت کشش و دما، این دو کمیت کاهش یافت. در سرعت کشش و دماهای بالا، آستانه تسلیم به مقادیر کمتری منتقل شد. در مجموع، در مقایسه با پلی‌پروپیلن خالص، نمونه‌های آلیاژی خواص مذاب بهتری دارا هستند. مقاومت نمونه‌های آلیاژی، خصوصاً آن‌هایی که دارای EPDM بیشتر هستند، در حالت مذاب، در برابر کشش بیشتر بوده و توانایی تحمل نیرو بدون پاره شدن در آن‌ها بیشتر است، بنابراین فرایندپذیری مناسبی خواهند داشت.

در این پژوهش آلیاژ سه‌گانه PP/ HDPE/EPDM با ترکیب درصد‌های مختلف تهیه شد و خواص کشش داغ و رفتار کششی مذاب نمونه‌ها بررسی شد. در تمام آلیاژها با افزایش HDPE و EPDM مدول الاستیک، نیرو در نقطه تسلیم و مدول پس از تسلیم نسبت به PP معمولی کاهش نشان داد. کاهش این پارامترها به مفهوم نیاز داشتن نیروی کمتر برای شکل‌دهی آلیاژها است. همچنین اثر سرعت و دمای کشش بر مدول الاستیک و نیرو در نقطه تسلیم بررسی شد که اثرات قابل‌توجهی بر خواص کشش داغ داشت. در

References

- [1] Karger-Kocsis, J. (1999). *Polypropylene*, Kluwer Academic Publisher, London, 1st ed., 845-852.
- [2] Throne, J.L. (1996). *Technology of thermoforming*, Carl Hanser Verlag, Munich, 1st ed., chapter 9.
- [3] Throne, J.L. (1997). "Rapra Review Reports, Report 93", *Advances in Thermoforming*, 8, 3-25.
- [4] Hylton, D.C. & Cheng, C.Y. (1988). *Plastics Engineering*, 44, 55-57.
- [5] McHugh, K. & Ogale, K. (1990). "High Melt Strength Polypropylene for Melt Phase thermoforming", *SPE ANTEC*, 452-455.
- [6] Yoo, H.J. & Done, D. (1998). "Rheology of High Melt Strength Polypropylene", *SPE ANTEC*, 569-572.
- [7] Lau, H.C., Bhattacharya, S.N. & Field, G.J. (2000). "Influence of rheological properties on the sagging of polypropylene and ABS sheet for thermoforming", *Polym. Eng. & Sci.* 40,

1564-1570.

[8] Gotsis, A.D. & Zeevenhoven, B.L. (2004). "The Effect of Long Chain Branching on the Processability of polypropylene in Thermoforming", *Polym. Eng. and Sci.*, 44, 973-981.

[9] Auhl, D., Stange, J., Munstedt, H. & Beate, V. (2014). "Long Chain Branched polypropylene by electron beam irradiation and their rheological properties", *Macromolecules*, 37, 9465-9472.

[10] Torres, F.G. & Bush, S.F. (2010). "Sheet extrusion and thermoforming of long glass fibre reinforced Polypropylene", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 1289-1294.

[11] Bush, S.F., Torres, F.G. & Methven, J.M. (2009). "Rheological characterisation of discrete long glass fibre (LGF) reinforced Polypropylene", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 1421-1431.

[12] Bhattacharyya, D., Bowis, M. & Jayaraman, K. (2013). "Thermoforming woodfibre-polypropylene composites sheet", *Composites Science and Technology*, 63, 353-365.

[13] Takano, N., Zako, M., Fujitso, R. & Nishiyabu, K. (2014). "Study of large deformation characteristics of knitted fabric reinforced thermoplastic composites at forming temperature by digital image-based strain measurement technique", *Composites Science and Technology*, 64, 2153-2163.

[14] Myers, J.H. (2005). "Polypropylene resins for sheeting and thermoforming", *Journal of Plastic film and sheeting*, 1, 250-257.

[15] Malpass, V. & Kempthorn, J. (2016). "Setting conditions for polyolefin thermoforming", *Plastics Engineering*, 42, 53-57.

[16] Machida, T. (2000). "Deep drawing of polypropylene sheets under differential heating conditions", *Polym. Eng. and Sci.*, 28, 405-412.

[17] Malpass, V., Kempthorn, J. & Dean, A. (2008). "Processing mineral filled polypropylenes for quality packaging", *ANTEC*, 183-186.

[18] Malpass, V., Kempthorn, J. & Dean, A. (2012). "Estimating thermoforming behavior of mineral-filled polypropylenes", *Plastics Engineering*, 45, 27-31.

[19] Maier, C. & Calafut, T. (1998). *Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook*, Plastics Design Library, New York, 1st ed., 234-235.

[20] Jacoby, P., Yang, J.C. & Kissel, W.J. (2004). "A new polypropylene resin with enhanced thermoformability", *SPE ANTEC*, 865-871.

[21] Macauley, N., Harkin-Jones, E. & Murphy, W.R., (2006). "Thermoforming polypropylene", *Plastics Engineering*, July 96, 33.

[22] Macauley, N., Harkin-Jones, E. & Murphy, W.R. (2017). "The influence of nucleating agents on the extrusion and thermoforming of polypropylene", *Polym. Eng. & Sci.*, 38, 516-523.

[23] Jacoby, P., Wu, J. & Heiden, M. (2000). "Thermoformable polypropylene-based sheet", *United States Patent*, 5310584.

[24] Macauley, N., Harkin-Jones, E. & Murphy, W.R. (2007). "Method of assessing thermoformability of extruded polypropylene sheet, Plast". *Rubb. Composites Processing and Applications*, 26, 165-171.

[25] Prosser, W., Hine, P.J. & Ward, I. M. (2000). "Investigation into thermoformability of hot compacted polypropylene sheet, Plast". *Rubb. and Composites*, 29, 401-410.

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors. Licensee PNU, Tehran, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)