

تولید کامپوزیت‌های پلیمری هادی با ضریب دمایی مثبت بر پایه‌ی پلی اتیلن به روش

پرتودهی الکترونی

INC29-1241

فاطمه انوری^۱، مهدی انتظام^۲، حسینعلی بابایی^۱، یحیی خیرخواه^۱، محمد رضایی^۱، مریم بنایی^۱، منصورجاویدمهر^۱، ونوس احمدیان^۱، سعیده دهشیری^۱

۱. مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۳۸۹-۸۹۱۷۵، یزد- ایران

۲. گروه مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه یزد، صندوق پستی ۸۴۱۱-۸۹۱۵۸۱، یزد- ایران

چکیده:

کامپوزیت‌های پلیمری رسانا با ضریب دمایی مثبت (PTC)، توجه زیادی را برای کاربرد در زمینه گرمایش هوشمند به خود جلب کرده‌اند. مقاومت ویژه مواد PTC در نزدیکی دمای ذوب پلیمر بلورینه، افزایش شدیدی دارد. این اثر به‌طور گسترده در دستگاه‌های محافظ جریان بالا، وسایل گرمایشی خود تنظیم، سنسورهای میکروسوئیچ و حسگرهای دما بکار می‌رود. تکرارپذیری PTC برای تضمین امنیت و کاربرد کامپوزیت‌های PTC بسیار ضروری است. در این تحقیق تاثیر پرتودهی الکترونی بر خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت‌های پلی اتیلن سنگین پر شده با دو نوع دوده بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد، مقاومت و شدت ضریب دمایی مثبت کامپوزیت‌های پلیمری رسانا، تا حد زیادی بستگی به نوع و مقدار دوده موجود در ماتریس پلیمری دارد. همچنین، مشاهده می‌شود که پرتودهی با باریکه الکترونی، منجر به بهبود تکرارپذیری رفتار PTC در کامپوزیت‌های پلیمری رسانا می‌شود، که ناشی از کاهش حرکت آزاد ذرات دوده در دمای بالای ذوب کریستالی پلیمر در اثر ایجاد اتصالات عرضی است.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت‌های پلیمری هادی، ضریب دمایی مثبت، دوده، پرتودهی الکترون

Production of conductive polymer composites with positive temperature coefficient based on polyethylene by electron beam irradiation

F. Anvari¹, M. Entezam², M.A. Babaei¹, H. Kheirkhah¹, M. Rezaei¹, M. Banaei¹,M. Javidmehr¹, V. Ahmadian¹, S. Dehshiri¹

1. Radiation Processing Complex of Central Iran, Iran Radiation Application Development Co., AEOL, P.O. Box: 89175-389, Yazd- Iran

2. Department of Chemical and Polymer Engineering Yazd University, P.O. BOX: 891581-8411, Yazd, Iran

Abstract:

Conductive polymer composites with positive temperature coefficient (PTC) have gained intensive attention for the potential application in the smart heating field. The specific resistance of PTC material increases sharply near the melting temperature of the crystalline polymer. This effect is widely used in high current protection instruments, self-regulating heating devices, microswitch and temperature sensors. The PTC reproducibility is significantly essential to guarantee the security and utility of PTC composites. In this research, the effect of electron beam irradiation on the thermal, mechanical and electrical properties of high-density polyethylene composites filled with carbon black was investigated. The results show that the strength and intensity of positive temperature coefficient of conductive polymer composites largely depends on the type and amount of carbon black in the polymer matrix. It is also observed that electron beam irradiation leads to the improvement of the repeatability of PTC behavior in conductive polymer composites, which was due to the reduction of free movement of carbon black particles at above the melting temperature of polymer crystalline regions, resulting from increasing the crosslinking of polymer.

Keywords: Conductive polymer composites, Positive temperature coefficient, Carbon black, Electron beam irradiation

۱. مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری رسانا^۱ (CPCs) معمولاً با مخلوط کردن یک ماتریس پلیمری عایق بلورینه با انواع مختلف پرکننده‌های رسانا مانند پودرهای فلزی، دوده یا کربن سیاه، نانولوله‌های کربن، نانوالیاف کربن، نانوالیاف گرافیت و ... ساخته می‌شوند. سه رفتار معمول مقاومت در برابر دما برای این کامپوزیت‌ها وجود دارد که شامل اثر ضریب دمایی مثبت^۲ (PTC)، اثر ضریب دمایی منفی^۳ (NTC) و ضریب دمایی صفر^۴ (ZTC) است. مقاومت الکتریکی PTCs و NTCs به ترتیب با افزایش دما افزایش و کاهش می‌یابد. در حالی که، مقاومت الکتریکی ZTCs بدون تغییر باقی می‌ماند [۹-۱]. مقاومت ویژه مواد PTC در نزدیکی دمای ذوب پلیمر بلورینه، افزایش شدیدی دارد. این اثر به‌طور گسترده در صنعت برق مانند دستگاه‌های محافظ جریان بالا، دستگاه‌های گرمایشی خود تنظیم و سنسورهای میکروسونیچ، فیوزهای قابل تنظیم مجدد، حسگرهای دما و ... بکار می‌رود. با ترکیب ماتریس‌های مختلف پلیمری و پرکننده‌های رسانا، نه تنها می‌توان خواص الکتریکی و مکانیکی CPCs را تنظیم و متناسب با نیازهای مورد نظر مشخص کرد، بلکه می‌توان ویژگی‌های دیگری نظیر حساسیت به برخی از محرک‌های خارجی از جمله کرنش، دما، رطوبت و ... را معرفی نمود [۱۰].

مواد با رفتار PTC بر پایه پلیمر دارای مزایای بسیاری از جمله قابلیت شکل‌پذیری عالی، انعطاف‌پذیری، وزن سبک، بازده انرژی و امنیت بالا هستند. با این حال، این مواد دارای معایبی مانند اثر NTC، تکرارپذیری و خواص مکانیکی ضعیف نیز می‌باشند. همچنین نوع افزودنی و نحوه‌ی پخش آن در زمینه‌ی پلیمر، نوع پلیمر، شرایط فرآیندی تهیه‌ی آمیزه و محصول و همچنین شبکه‌ای شدن ساختار PTCs، به شدت، عملکرد آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. موادی که پدیده PTC را نشان می‌دهند، اولین بار توسط هارمن^۵ در سال ۱۹۵۷ هنگام کار با تیتانات باریم آمیخته شده با ساماریوم، مورد توجه قرار گرفتند. او دریافت که این ماده در دمای پخت خود مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد و این اثر را "پدیده ضریب دمایی مثبت" نام‌گذاری کرد [۱۱]. پس از آن، با توجه به دمای مد نظر برای عملکرد PTCs، پلیمرهای بلورینه‌ی متنوعی از جمله پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، کوپلیمر اتیلن وینیل استات و پلی‌وینیلیدین فلوراید به کار گرفته شدند. در این میان، پلی‌اتیلن با توجه به فرآیندپذیری آسان، خواص فیزیکی- مکانیکی مطلوب و قیمت نسبتاً مناسب، کاربرد نسبتاً وسیعی در صنایع سیم و کابل، از جمله در ساخت PTCs دارد. در میان افزودنی‌های رسانای مختلف نیز دوده به دلیل قیمت نسبتاً پایین، تنوع و دسترسی آسان، از اهمیت قابل توجه و کاربری بالایی در ساخت PTCs برخوردار است. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهند، رفتار غیر خطی در رسانایی الکتریکی سامانه‌های CB/PE در محدوده باریک دمایی نزدیک به دمای ذوب بلورهای PE، به این سامانه ویژگی خاصی داده است به نحوی که مقاومت الکتریکی PTCs بر پایه‌ی کامپوزیت CB/PE با افزایش دما تا نزدیکی دمای ذوب بلورها کاهش ملایم و خطی دارد و در حوالی دمای مزبور ناگهان افزایش می‌یابد. پس از دمای نقطه اوج، مقاومت الکتریکی با افزایش دما تا دمای ذوب به سرعت کاهش می‌یابد. از میان روش شیمیایی و پرتودهی برای شبکه‌ای کردن ساختار پلیمر، روش پرتودهی به دلیل عدم استفاده از ترکیبات شیمیایی و امکان انجام در دمای محیط، مورد توجه است. بر اساس گزارش محققان، شبکه‌ای کردن ساختار کامپوزیت منجر به تقویت و تکرارپذیری رفتار کامپوزیت PTC می‌شود [۱۹-۱۲]. در این پژوهش کامپوزیت پلی‌اتیلن سنگین با مقادیر مختلف دوده تهیه شد. سپس نمونه‌ها با باریکه الکترونی ۱۰ MeV پرتودهی شد و اثر شبکه‌ای شدن و نوع دوده بر خواص و سرعت تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

۲. روش کار

- 1- Conductive Polymer Composites (CPCs)
- 2- Positive Temperature Coefficient
- 3- Negative Temperature Coefficient
- 4- Zero Temperature Coefficient
- 5- Harman

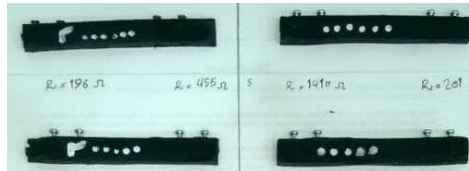
۲-۱. مواد

در این تحقیق از پلی‌اتیلن سنگین HDPE EX3 محصول پتروشیمی بندر امام با شاخص جریان مذاب $0.45 \text{ g}/10\text{min}$ و دانسیته‌ی $0.945 \text{ g}/\text{cm}^3$ به عنوان پلیمر زمینه استفاده شد. همچنین دو نوع دوده N-330 و N-326 از شرکت کربن سیمرغ به عنوان پرکننده‌ی هادی به کار گرفته شد. مشخصات دوده‌ها در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. مشخصات دوده‌های مصرفی				
ردیف	کد	دانسیته (g/l)	عدد جذب DBP (ml/100g)	میزان خاکستر (wt%)
۱	N-330 (B)	۳۶۰-۴۰۰	۹۷-۱۰۷	۰/۷۵
۲	N-326 (A)	۴۳۵-۴۷۵	۶۷-۷۷	۰/۷۵

۲-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

با استفاده از دستگاه غلتک آمیزه‌هایی از پلی‌اتیلن سنگین و هر یک از دوده‌های A و B با درصدهای مختلف در دمای 180°C و مدت زمان اختلاط ۱۰ دقیقه تهیه شد. از آمیزه‌ها با دستگاه پرس گرم ساخت شرکت Dr.Collin آلمان و مطابق با استاندارد ASTM D1248 صفحاتی به ضخامت ۲ میلی‌متر در دمای 90°C و فشار ۶۰ bar تهیه گردید. به همین روش نمونه‌هایی با طول ۱۰ سانتی‌متر، عرض ۱ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تهیه شد. نمونه‌ها با دستگاه شتابدهنده الکترون مدل رودترون TT200 ساخت شرکت IBA بلژیک پرتودهی شد.



شکل ۱. نمونه‌های تهیه شده برای آزمون مقاومت الکتریکی.

۲-۳. آزمون‌ها

۲-۳-۱. آزمون مقاومت الکتریکی

با استفاده از دستگاه اهم‌متر میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌های پلیمری در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. در این راستا نمونه‌ها به همراه حسگر دما داخل حمام روغن سیلیکون و بر روی هیتر قرار گرفتند و نتایج تغییرات مقاومت نمونه‌ها بر حسب دما اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۲. آزمون کشش

میزان استحکام کششی و درصد افزایش طول نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش هیوا ۲۰۰ ساخت ایران و مطابق با استاندارد ASTM D638 در دمای محیط اندازه‌گیری شد. از صفحات پرتودهی شده دمبل‌های استاندارد تهیه و با سرعت $50 \text{ mm}/\text{min}$ تحت آزمون کشش قرار گرفت.

۲-۳-۳. آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی

نمونه‌هایی به وزن ۵-۶ میلی‌گرم با آهنگ حرارت‌دهی $10^\circ\text{C}/\text{min}$ در محیط نیتروژن و توسط دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی DSC 50 ساخت شرکت Shimadzu ژاپن تحت آنالیز حرارتی قرار گرفت و محدوده دما و آنتالپی ذوب نمونه‌ها تعیین شد.

۲-۳-۴. آزمون میزان ژل

درصد شبکه‌ای شدن نمونه‌های پرتودهی شده با آزمون ژل و مطابق استاندارد ASTM D2765 بدست آمد. حدود 0.3 گرم از نمونه‌های خرد شده به مدت ۲۴ ساعت در زایلن جوشان تحت استخراج قرار گرفت. سپس نمونه‌ها در آن خلاء و در دمای 150°C تا رسیدن به وزن ثابت خشک و توزین گردید. درصد ژل نمونه‌ها به صورت زیر محاسبه شد:

$$\text{درصد ژل} = \frac{\text{جرم باقیمانده}}{\text{جرم اولیه}} \times 100 \quad (1)$$

لازم به ذکر است نمونه‌ها بر اساس جدول ۲ کدگذاری شد. نمونه CS نمونه خارجی و شاهدهی است که به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. معرفی کدگذاری نمونه‌ها

ردیف	کد نمونه	دوز پرتودهی (kGy)	نوع افزودنی	میزان افزودنی (%)
۱	PHDPE	۰	-	۰
۲	UAL	۰	A	۱۵
۳	UAM	۰	A	۲۰
۴	UAH	۰	A	۲۵
۵	UBL	۰	B	۱۵
۶	UBM	۰	B	۲۰
۷	UBH	۰	B	۲۵
۸	IAL	۱۵۰	A	۱۵
۹	IAM	۱۵۰	A	۲۰
۱۰	IAH	۱۵۰	A	۲۵
۱۱	IBL	۱۵۰	B	۱۵
۱۲	IBM	۱۵۰	B	۲۰
۱۳	IBH	۱۵۰	B	۲۵
۱۴	CS	نامعلوم	نامعلوم	بالا

PHDPE: نمونه HDPE خالص و CS: نمونه شاهد

۳. نتایج و بحث

نتایج میزان ژل نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است. کلیه‌ی نمونه‌ها دارای میزان ژل در محدوده ۶۰٪ تا ۷۰٪ هستند که این میزان ژل ناشی از تشکیل ساختار شبکه‌ای میان زنجیره‌های پلی‌اتیلن حین فرایند پرتودهی است. میزان ژل نمونه‌ها در حدود نمونه‌ی شاهد با میزان ژل ۶۵٪ است. اثر قابل توجهی از نوع افزودنی روی میزان ژل اکثر نمونه‌ها دیده نمی‌شود، اگرچه برای هر دو نوع افزودنی، با افزایش میزان آن‌ها، میزان ژل نمونه‌ها تا حدی افزایش می‌یابد.

جدول ۳: میزان ژل نمونه‌های پرتودهی شده و نمونه‌ی شاهد

ردیف	کد نمونه	میزان ژل (%)
۱	PIHDPE	۶۰/۸±۰
۲	IAL	۶۷/۶±۰
۳	IAM	۶۷/۰±۲/۳
۴	IAH	۶۹/۹±۰
۵	IBL	۶۴/۰±۲/۱
۶	IBM	۶۶/۰±۸/۳
۷	IBH	۷۰/۰±۶/۱
۸	CS	۶۵/۷± ۱

جدول ۴ نتایج آنالیز حرارتی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. دمای ذوب $130/6^{\circ}\text{C}$ برای نمونه‌ی شاهد نشان می‌دهد که پلی‌اتیلن زمینی به کارگرفته شده در این نمونه از نوع HDPE است. میزان و نوع افزودنی و همچنین پرتودهی الکترونی اثر قابل توجهی بر دمای ذوب HDPE ندارد. محدوده‌ی دمای ذوب کلیه‌ی نمونه‌های تهیه شده 86°C تا 145°C است. میزان بلورینگی HDPE با افزایش افزودنی A به آن بین ۹٪ تا ۱۳٪ و با افزایش افزودنی B بین ۱۳٪ تا ۲۱٪ کاهش می‌یابد. پرتودهی اثر قابل توجهی بر میزان بلورینگی نمونه‌های حاوی افزودنی A یا B ندارد. میزان بلورینگی نمونه‌های پرتودهی شده حداکثر ۵٪ با میزان بلورینگی نمونه‌ی شاهد (۳۳٪ بلورینگی) تفاوت دارند و اکثر نمونه‌ها میزان بلورینگی بالاتری دارند. با توجه به نتایج حاصل از آزمون DSC، مشخصه‌های بلورینگی شامل دمای ذوب، محدوده دمایی

اختتام فرایند ذوب و میزان بلورینگی برای اکثر نمونه‌های حاوی افزودنی A یا B پس از فرایند پرتودهی در حد نمونه‌ی شاهد است.

جدول ۴: نتایج حاصل از آزمون DSC نمونه‌ها

ردیف	کد نمونه	دمای ذوب (°C)	میزان بلورینگی (%)
۱	PHDPE	۱۳۱±۰/۵	۴۶±۰
۲	UAL	۱۳۱±۰	۳۷±۰
۳	UAM	۱۳۰±۰/۱	۳۸±۰/۲
۴	UAH	۱۳۲±۰/۱	۳۳±۰/۶
۵	UBL	۱۳۰±۰	۳۳±۰/۵
۶	UBM	۱۳۰±۰/۸	۳۳±۰/۷
۷	UBH	۱۲۹±۰/۹	۲۵±۰
۸	IAL	۱۲۹±۰	۳۶±۰/۳
۹	IAM	۱۲۹±۰	۳۷±۰/۵
۱۰	IAH	۱۲۸±۰/۹	۳۴±۰
۱۱	IBL	۱۳۳±۰/۶	۳۴±۰/۸
۱۲	IBM	۱۲۸±۰/۵	۳۴±۰/۵
۱۳	IBH	۱۲۹±۰	۲۶±۰/۶
۱۴	CS	۱۳۰±۰/۶	۳۳±۰

نتایج آزمون کشش نمونه‌ها در جدول ۵ آمده است. جمع‌بندی کلی نتایج نشان می‌دهد که هر دو افزودنی A و B موجب کاهش استحکام کششی و افزایش طول در نقطه شکست HDPE می‌شوند که این کاهش برای افزایش طول در نقطه شکست بسیار چشمگیر است. به جز در میزان ۲۵٪ افزودنی A که خواص مکانیکی بالاتری را نسبت به افزودنی B برای HDPE باعث می‌شود، در مقادیر ۱۵٪ و ۲۰٪، نوع افزودنی تفاوت چندانی در خواص HDPE ایجاد نمی‌کند. اگرچه پرتودهی الکترونی، استحکام کششی نمونه‌ی HDPE حاوی ۱۵٪ افزودنی A و همچنین افزایش طول در نقطه شکست نمونه‌های HDPE حاوی ۲۵٪ از افزودنی A یا B را تقویت می‌کند، به طور کلی، اثر قابل توجه دیگری بر خواص مکانیکی نمونه‌های HDPE حاوی افزودنی A یا B نشان نمی‌دهد.

جدول ۵: خواص مکانیکی کششی نمونه‌ها

ردیف	کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	افزایش طول در نقطه شکست (%)
۱	PHDPE	۳۲±۱	۱۱۱۱±۳۰
۲	UAL	۲۲/۵±۰	۲۱/۸±۲
۳	UAM	۲۴/۳±۰	۲۴±۴
۴	UAH	۲۷/۵±۰	۱۸/۵±۳
۵	UBL	۲۳/۰±۵/۵	۲۹/۶±۳
۶	UBM	۲۴/۳±۰	۲۷±۳
۷	UBH	۲۴/۰±۷/۶	۱۲±۱
۸	IAL	۲۵/۱±۵	۲۴±۴
۹	IAM	۲۴/۰±۵/۵	۲۸/۵±۴
۱۰	IAH	۲۶/۴±۰	۲۸/۳±۳/۷
۱۱	IBL	۲۳/۰±۷/۳	۲۴/۳±۵/۵
۱۲	IBM	۲۳/۰±۸/۲	۲۶/۸±۱

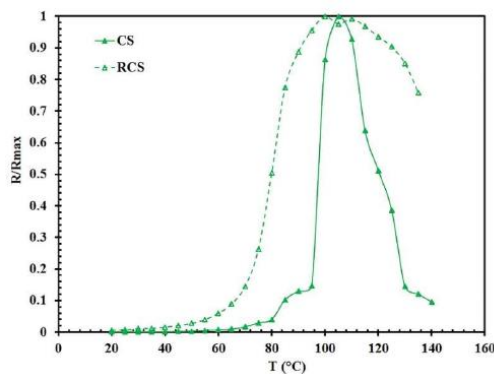
۲۵۵±۵	۲۵/۰±۵/۵	IBH	۱۳
>۱۰۰	۱۰/۱±۸/۴	CS	۱۴

نتایج تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه‌ها با دما، در جدول ۶ آمده است. کلیه‌ی نمونه‌ها با میزان ۲۰٪ و ۲۵٪ از افزودنی A یا B رفتار PTC نشان می‌دهند، اگرچه با افزایش میزان افزودنی، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در کلیه‌ی دماها و رفتار PTC آن‌ها کاهش می‌یابد. افزودنی A نسبت به افزودنی B در کلیه‌ی دماها مقاومت الکتریکی بالاتر و رفتار PTC شدیدتری را باعث می‌شود و تنها در میزان ۲۵٪ افزودنی و در دماهای بالای ۱۳۰ °C، نمونه‌ی حاوی افزودنی B مقاومت بی‌نهایت نشان می‌دهد و نمونه‌ی حاوی افزودنی A دارای مقادیر مشخصی از مقاومت الکتریکی است. در میزان ۲۰٪ از افزودنی A یا B، مقاومت الکتریکی نمونه پس از پرتودهی تا دماهای حدود ۱۲۵ °C کاهش می‌یابد اما در دماهای بالاتر نمونه بعد از پرتودهی مقاومت بی‌نهایت و قبل از پرتودهی مقاومت الکتریکی مشخصی را نشان می‌دهد. در میزان ۲۵٪ از افزودنی A یا B، مقاومت الکتریکی نمونه پس از پرتودهی در کلیه‌ی دماها افزایش می‌یابد. پرتودهی نمونه‌ها منجر به تقویت رفتار PTC آن‌ها می‌شود.

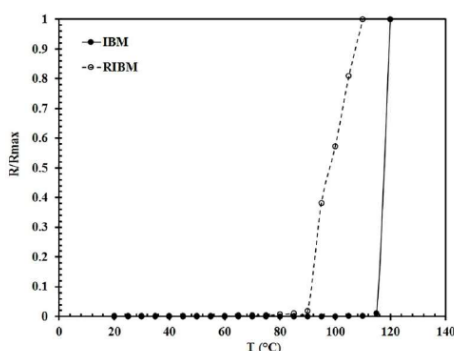
نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نرمالایز بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش و سرمایش برای نمونه‌های مختلف، در شکل‌های ۲ تا ۴ آمده است. در مقایسه با نمونه شاهد، افزودنی A مقاومت‌ها و رفتار PTC بهتری را نسبت به افزودنی B برای HDPE باعث می‌شود، اگرچه میزان افزودنی A در فرمولاسیون نیاز به اصلاح دارد.

جدول ۶. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در دماهای مختلف، به همراه شدت رفتار PTC آن‌ها.

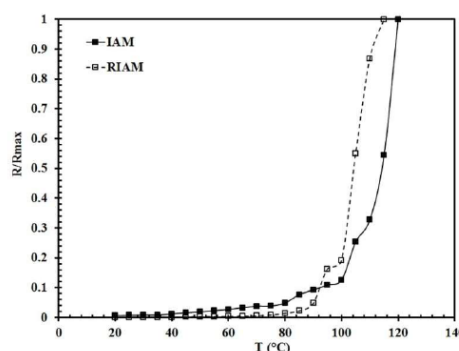
ردیف	کد نمونه	مقاومت الکتریکی (kΩ.cm)	مقاومت الکتریکی (kΩ.cm)	مقاومت الکتریکی (kΩ.cm)	مقاومت الکتریکی (kΩ.cm)	بیشینه مقاومت الکتریکی (kΩ.cm)	شدت رفتار PTC
		۳۰ °C	۶۰ °C	۹۰ °C	۱۰۵ °C		
۱	PHDPE	∞	∞	∞	∞	∞	-
۲	UAL	∞	∞	∞	∞	∞	-
۳	UAM	۸۴۰۰	۲۲۳۰۰	۶۷۰۰۰	۴۷۰۰۰	۲۴۵۰۰۰ (۱۲۵)	۲۹/۱
۴	UAH	۵/۵	۹/۴	۳۴	۸۶	۱۲۹۰ (۱۲۵)	۲۳۴
۵	UBL	∞	∞	∞	∞	∞	-
۶	UBM	۵۶	۷۶	۱۵۰	۲۵۵	۳۶۴۰۰ (۱۲۵)	۶۵۰
۷	UBH	۰/۶	۰/۸	۱/۵	۲/۷۵	۱۸/۲ (۱۲۵)	۳۰
۸	IAL	∞	∞	∞	∞	∞	-
۹	IAM	۳۰۴	۱۰۰۰	۳۴۰۰	۹۳۰۰	∞ (۱۲۵)	∞
۱۰	IAH	۱۱/۵	۳۲	۴۸	۸۱	۲۲۰۰۰۰ (۱۳۰)	۱۹۱۳۰
۱۱	IBL	∞	∞	∞	∞	∞	-
۱۲	IBM	۱۰	۱۷/۶	۳۶	۱۱۸	∞ (۱۲۵)	∞
۱۳	IBH	۰/۸	۱/۳	۱/۸۴	۲/۷۳	∞ (۱۲۵)	∞
۱۴	CS	۲۳۳	۱۲۸۰	۲۱۵۰۰	۱۶۶۰۰۰	۱۶۶۰۰۰ (۱۰۵)	۷۱۲



شکل ۲. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نرمالایز بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش (CS) و سرمایش (RCS) برای نمونه‌ی شاهد.



شکل ۴. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نرمالایز بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش (IBM) و سرمایش (RIBM) برای نمونه‌ی پرتوده‌ی شده حاوی میزان متوسط افزودنی B.



شکل ۳. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نرمالایز بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش (IAM) و سرمایش (RIAM) برای نمونه‌ی پرتوده‌ی شده حاوی میزان متوسط افزودنی A.

۴. نتیجه گیری

جمع‌بندی نتایج درباره‌ی تهیه محصول PTC با خواص مطلوب نشان می‌دهد که آمیزه‌های حاوی میزان ۱۵٪ یا ۲۵٪ از افزودنی A یا B مناسب نیستند. افزودنی A با میزان ۲۰٪ نسبت به افزودنی B، به‌ویژه از دیدگاه خواص الکتریکی و رفتار PTC مناسب‌تر است. استحکام کششی نمونه‌های حاوی افزودنی A یا B قبل و بعد از پرتودهی از نمونه شاهد بالاتر است. اگرچه نمونه‌ها از دیدگاه مکانیکی رفتار منعطف و چکش‌خوار نشان می‌دهند اما افزایش طول در نقطه شکست آن‌ها پایین‌تر از نمونه‌ی شاهد است. اگر در کاربرد مورد نظر، قابلیت تغییر شکل بالا مشابه با نمونه‌ی شاهد مد نظر باشد، این خاصیت نمونه‌ها باید تقویت شود.

۵. مراجع

1. Kim, J. I., P.H. Kang, and Y.C. Nho, Positive temperature coefficient behavior of polymer composites having a high melting temperature. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004. 92(1): p. 394-401.
2. Zhang, X., et al., Two-step positive temperature coefficient effect with favorable reproducibility achieved by specific "island-bridge" electrical conductive networks in HDPE/PVDF/CNF composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017. 94: p. 21-31.
3. Zha, J.-W., et al., High performance hybrid carbon fillers/binary-polymer nanocomposites with remarkably enhanced positive temperature coefficient effect of resistance. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013. 1(3): p. 843-851.

4. Ren, D., et al., Effect of the carbon black structure on the stability and efficiency of the conductive network in polyethylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013. 129(6): p. 3382-3389.
5. Chu, K., et al., Smart conducting polymer composites having zero temperature coefficient of resistance. *Nanoscale*, 2015. 7(2): p. 471-478.
6. Ding, L., et al., Near zero temperature coefficient of resistivity in antiperovskite $Mn_3Ni_{1-x}Cu_xN$. *Applied Physics Letters*, 2011. 99(25): p. 251905.
7. Takenaka, K., et al., Extremely low temperature coefficient of resistance in antiperovskite $Mn_3Ag_{1-x}Cu_xN$. *Applied Physics Letters*, 2011. 98(2): p. 022103.
8. Ohe, K. and Y. Naito, A new resistor having an anomalously large positive temperature coefficient. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1971. 10(1): p. 99.
9. Xiang, Z.D., et al., Negative temperature coefficient of resistivity in lightweight conductive carbon nanotube/polymer composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2009. 294(2): p. 91-95.
10. Wu, Y., et al., Ultralight graphene foam/conductive polymer composites for exceptional electromagnetic interference shielding. *ACS applied materials & interfaces*, 2017. 9(10): p. 9059-9069.
11. Narongthong, J., et al., Ionic liquid enabled electrical-strain tuning capability of carbon black based conductive polymer composites for small-strain sensors and stretchable conductors. *Composites Science and Technology*, 2019. 174: p. 202-211.
12. Zhang, P. and B.b. Wang, Positive temperature coefficient effect and mechanism of compatible LLDPE/HDPE composites doping conductive graphite powders. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018. 135(27): p. 46453.
13. Liang, J.Z. and Q.Q. Yang, Effects of carbon black content and size on conductive properties of filled high-density polyethylene composites. *Advances in Polymer Technology*, 2018. 37(6): p. 2238-2245.
14. Li, G., et al., Particle size induced tunable positive temperature coefficient characteristics in electrically conductive carbon nanotubes/polypropylene composites. *Materials Letters*, 2016. 182: p. 314-317.
15. Xu, H., et al., Novel Positive Temperature Coefficient Effect of Electrical Resistivity in Ni Particles Filled Two Semi-Crystalline Polymer Intermixture Nanocomposite. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2015. 15(4): p. 3254-3258.
16. Li, J., et al., A new thermal controlling material with positive temperature coefficient for body warming: Preparation and characterization. *Materials*, 2019. 12(11): p. 1758.
17. Zhong, H., et al., Safe positive temperature coefficient composite cathode for lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 2012. 216: p. 273-280.
18. Bystrov, V., et al., Pyroelectric properties of ferroelectric composites based on polyvinylidene fluoride (PVDF) with graphene and graphene oxide. *Ferroelectrics*, 2019. 541(1): p. 17-24.
19. Jiang, S., et al., Positive temperature coefficient properties of multiwall carbon nanotubes/poly(vinylidene fluoride) nanocomposites. *Journal of applied polymer science*, 2010. 116(2): p. 838-842.