

ایجاد پوشش شفاف و ضد الکتریسیته ساکن روی زیرلایه پلی (متیل متاکریلات)

فریرز اتابکی و مهران عربی

غلامعلی کوهمره

دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دانشکده شیمی، دانشگاه اصفهان

(دریافت مقاله ۹۴/۰۴/۰۹ - پذیرش مقاله : ۹۴/۰۸/۰۹)

چکیده

در این تحقیق به وسیله دستگاه پوشش دهی چرخشی روی زیرلایه پلی (متیل متاکریلات)، پلیمر رسانای پلی (۳،۴- اتیلن دی اکسی تیوفن) از مونومر ۴،۳- اتیلن دی اکسی تیوفن به روش پلیمری شدن درجا، سنتز شد. در ادامه اثر پارامترهای دمای پخت، زمان پخت و سرعت پوشش دهی، بر ویژگی های ساختاری، نوری، الکتریکی و مکانیکی این پوشش مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از طیف سنجی تبدیل فوریه-مادون قرمز (FT-IR)، طیف سنجی ماورای بنفش-مرئی (UV-Vis)، اندازه گیری مقاومت الکتریکی و آزمون تپ استفاده شد. نتایج نشان داد که یک سطح با مقاومت الکتریکی ۶۱/۳۸ کیلو اهم، با شفافیت خوب و چسبندگی مطلوب برای کاربردهای ضد الکتریسیته ساکن به دست آمده است. همچنین این داده ها نشان می دهد مقاومت این پوشش های پلیمری از مقاومت 10^8 اهم کمتر است. از آنجا که کاهش مقاومت الکتریکی پلیمر تا 10^8 اهم و کمتر از این مقدار می تواند تجمع الکتریسیته ساکن در سطح پلیمر را کاهش دهد، بنابراین پوشش پلیمری ایجاد شده روی زیر لایه پلی (متیل متاکریلات)، توانایی کاهش تجمع الکتریسیته ساکن را دارد.

واژه های کلیدی: پوشش شفاف، پوشش ضد الکتریسیته ساکن، پلی (متیل متاکریلات)، پلی (۳،۴- اتیلن دی اکسی تیوفن).

Transparent, anti-static coating on poly substrate (methyl methacrylate)

F. Atabaki and M. Arabi

Department of Chemistry, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan

Gh. Koohmareh

Department of Chemistry, University of Isfahan

(Received 30 June 2015, accepted 31 October 2015)

Abstract

In this research, by spin coating, a layer of conductive poly(3,4-ethylene dioxythiophene)(PEDOT) synthesized via in situ polymerization of 3,4-ethylene dioxythiophene(EDOT) was coated on poly(methyl methacrylate)(PMMA) substrate. The effect of different factors such as time and temperature of curing, speed of spin coating on the structural, electrical and mechanical properties of coated layer were characterized by FT-IR and UV-Vis spectroscopy, conductive measurements and tape test. The results revealed that a surface with good conductivity (61.38 k Ω) and excellent transparency with an excellent adhesion was obtained which can be useful for anti-static application. Also these data show that the resistance of the prepared coating is less than 10 $^8\Omega$ and since the decrease of polymer electrical resistance to 10 $^8\Omega$ or less, can reduce the accumulation of static electricity on the surface of the polymer, therefore, this coating has the ability to reduce accumulation of static electricity.

Keywords: Transparent coating, Anti-static coating, PMMA, PEDOT.

E-mail of corresponding author: atabaki@mut-es.ac.ir.

مقدمه

عوامل ضد الکتریسیته ساکن موادی هستند که به منظور کاهش تمایل جذب بار الکتریسیته ساکن به پلیمرها اضافه می‌شوند و یا وقتی باری ایجاد می‌شود این مواد به پخش آن کمک می‌کنند. روش‌ها و مواد متفاوتی از جمله استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، پرکن‌های رسانا و اکسیدهای فلزی شفاف و پلیمرهای رسانا برای ایجاد خاصیت ضد الکتریسیته ساکن استفاده شده است [۷، ۸، ۹].

افزودنی‌های شیمیایی به دلیل ارزان بودن بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی برای ایجاد رسانایی و خاصیت ضد الکتریسیته ساکن نیاز دارند تا رطوبت و نمک‌های موجود در محیط را جذب کنند و در نتیجه رسانایی آن‌ها به شکل عمده به رطوبت محیط وابسته است و در سطح آن‌ها یک حالت گریسی ایجاد می‌شود [۱]. تعداد زیادی اکسید فلزی مانند ITO ، ATO و IZO برای ایجاد پوشش‌های شفاف و رسانا به روش سل ژل استفاده شده است اما نیاز به دمای بالا برای آنیله کردن پوشش‌های به دست آمده از روش سل ژل یکی از معایب این روش است که می‌تواند ساختار بسیاری از مواد را تغییر بدهد [۸، ۹].

پلیمرهای رسانا می‌توانند رسانایی در حد فلزات داشته باشند و به همین دلیل به آن‌ها فلزات سنتزی می‌گویند. این پلیمرها به دلیل خواص برجسته مانند کاربرد آسان و قیمت مناسب به‌طور ویژه برای کنترل بار الکتریسیته ساکن مورد استفاده قرار می‌گیرند اما بعضی از خواص پلیمرهای رسانا باعث می‌شود تا استفاده‌های کاربردی از آن‌ها محدود شود، به‌عنوان مثال پلی پیروول، پلی آنیلین، پلی تیوفن و پلیمرهای رسانای دیگر که با استفاده از مونومرهای هتروسیکل تهیه می‌شوند خواص مکانیکی آن‌ها مانند شکنندگی و فرآیند پذیری‌شان از پلیمرهای معمولی کمتر است و تلاش‌های زیادی برای تقویت خواص مکانیکی

پلیمرها اولین بار در اواسط قرن نوزدهم استفاده شدند و این مواد به دلیل قیمت مناسب، تنوع، ساخت و استفاده آسان نسبت به سایر مواد کاربردهای بسیاری در صنعت و زندگی روزمره یافتند [۱].

برخی پلیمرها شفاف و بعضی از آن‌ها غیر شفاف هستند، پلی (متیل متاکریلات) یکی از پلیمرهای شفاف و در طول موج ۶۵۰ نانومتر دارای ضریب شکست $1/49$ است و این مقدار نزدیک به ضریب شکست شیشه $1/52$ است [۲]. (پلی متیل متاکریلات) کاربرد‌های نوری زیادی دارد و به‌عنوان جایگزینی برای شیشه‌های معدنی استفاده می‌شود و علاوه بر شفافیت عالی دارای مزایایی نسبت به شیشه معدنی است که از آن جمله می‌توان وزن کمتر به دلیل دانسیته کمتر، مقاومت بیشتر در برابر شکستن، جذب اشعه ماورای بنفش در طول موج ۲۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر و ضریب شکست ثابت در محدوده دمایی ۱۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد را نام برد [۳، ۴].

رسانایی (پلی متیل متاکریلات) خالص در حالت توده حدود 10^{-13} زیمنس بر سانتیمتر است و این امر می‌تواند باعث تجمع بار الکتریسیته ساکن بر روی سطح پلیمر و در نتیجه منجر به تخلیه الکتریکی و یا جذب گردوغبار گردد. تخلیه الکتریکی در مکان‌هایی که مواد آتش‌زا وجود دارد باعث آتش‌سوزی و پاک کردن مواد جذب‌شده در سطح پلیمر سبب آسیب رساندن به سطح پلیمر می‌شود [۵]. کاهش مقاومت الکتریکی پلیمر تا 10^8 اهم و کمتر از این مقدار می‌تواند تجمع الکتریسیته ساکن در سطح پلیمر را کاهش دهد و برای دستیابی به این هدف از پوشش‌های ضد الکتریسیته ساکن استفاده شده است [۳، ۶].

مواد و روش تحقیق

مونومر EDOT از کشور چین، شرکت Shangh Chunyu Phytochemistry خریداری شد. افزودنی‌های به‌کاررفته و حلال‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. کلیه مواد به همان شکل اولیه و بدون خالص‌سازی مجدد مورد استفاده قرار گرفت. از قطعات پلی (متیل متاکریلات) با ابعاد $13 \times 13 \times 4$ میلی‌متر به‌عنوان زیر لایه استفاده شد. این قطعات از گرید نظامی بوده و از شرکت هواپیماسازی ایران (هسا) تهیه شد. زیرلایه‌ها به‌وسیله آب و صابون و سپس اتانول شسته و به مدت ۱۵ دقیقه در آون و دمای 40°C درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا کاملاً خشک شود. سپس زیر لایه‌ها در ظرف‌های شیشه‌ای تمیز تا مرحله لایه نشانی پلیمر نگهداری شد. آهن (III) توسیلات به‌صورت تجاری در دسترس نبود و در آزمایشگاه به شرح زیر سنتز گردید [۱۰]: مقدار ۱ گرم نمک $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ در دمای محیط به ۱۴ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد و به‌وسیله همزن مکانیکی به مدت ۱۰ دقیقه به شدت مخلوط و به‌طور کامل حل شد. به محلول حاصل در دمای محیط مقدار ۳ میلی‌لیتر محلول NH_4OH اضافه و بعد از یک دقیقه اختلاط مقدار زیادی رسوب قهوه‌ای $\text{Fe}(\text{OH})_3$ تشکیل گردید. رسوب حاصل با استفاده از سانتریفیوژ جدا و به‌منظور حذف یون‌های Cl^- چندین مرتبه با آب مقطر شست‌وشو داده شد. با توجه به این‌که $\text{Fe}(\text{OH})_3$ در برابر هوا ناپایدار است به همین دلیل به‌صورت تازه تهیه و مصرف گردید. رسوب $\text{Fe}(\text{OH})_3$ به دست آمده، در دمای اتاق و با کمک همزن مکانیکی به مدت ۵ دقیقه در ۱۰ میلی‌لیتر متانول تعلیق شد و سپس مقدار $2/07$ گرم محلول حاصل به مدت ۸ ساعت در دمای 60°C درجه سانتی‌گراد رفلکس شد و بعد از آن با یک کاغذ صافی $0/45$ میکرومتری و به‌منظور حذف $\text{Fe}(\text{OH})_3$ اضافی

پلیمرهای رسانا از جمله مخلوط کردن آن‌ها با پلیمرهای دیگر انجام شده است [۶، ۱].

پلیمر PEDOT از جمله پلیمرهای رسانا است که از زمان سنتز به‌صورت تجاری استفاده شده است. ویژگی این پلیمر به خاطر خواص آن در حالت دوپه شده مانند پایداری زیاد، رسانایی بالا و شفافیت عالی است و به‌علاوه اضافه کردن پلیمر رسانا به فرمولاسیون پوشش باعث افزایش طول عمر فرمولاسیون پوشش می‌شود همچنین مکانیسم رسانایی مربوط به رسانایی شبه‌فلز پلیمرهای رسانا و ایجاد الکترون حفره بین ذرات پلیمر رسانا است [۳، ۱].

به‌هرحال ایجاد پوشش روی پلیمرها دارای مشکلاتی است که از جمله می‌توان به حساس بودن پلیمرها در برابر حرارت اشاره کرد و در نتیجه برای ایجاد پوشش روی پلیمرها باید از حرارت زیاد پرهیز شود، به‌علاوه قطبیت این نوع زیرلایه‌ها مشکلات مربوط به چسبندگی را به وجود می‌آورد.

در این تحقیق به دلیل استفاده از پلی (متیل متاکریلات) به‌عنوان زیر لایه امکان استفاده از عملیات حرارتی و یا آنبیل کردن وجود نداشت و روش پوشش دهی چرخشی برای ایجاد یک پوشش شفاف و ضد الکتریسیته ساکن از جنس پلی ۳ و ۴- اتیلن دی اکسی تیوفن روی زیرلایه پلی (متیل متاکریلات) استفاده شده است. نمک آهن (III) پاراتولوئن سولفونات در آزمایشگاه سنتز و سپس یک لایه شفاف از پلیمر رسانا با استفاده از این نمک و مونومر ۳، ۴- اتیلن دی اکسی تیوفن بر سطح پلی متیل متاکریلات ایجاد گردید و اثر پارامترهای دمای پخت، زمان پخت، سرعت پوشش دهی و محلول شست‌وشو بر ویژگی‌های ساختاری، نوری، الکتریکی و مکانیکی پوشش مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱. مشخصات مواد شیمیایی اولیه.

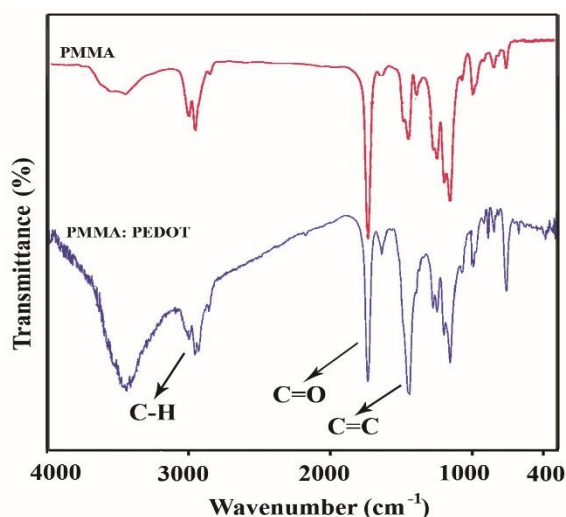
شرکت سازنده	جرم مولکولی (gr/mol)	نام	فرمول شیمیایی
Chunyuan	142.18	3,4-Ethylenedioxythiophene	C ₆ H ₆ O ₂ S
Commercial grade	35.05	Ammonium hydroxide	NH ₄ OH
Sigma Alderich	190.22	p-toluenesulfonic acid monohydrate	C ₇ H ₈ O ₃ S.H ₂ O
Merck	108.13	Methoxybenzene	C ₆ H ₅ OCH ₃
Commercial grade	74.12	1-Butanol	CH ₃ (CH ₂) ₃ OH
Merck	270.3	Ferric chloride hexahydrate	FeCl ₃ .6H ₂ O
Merck	34.04	Methanol	CH ₃ OH
Commercial grade	46.0414	Ethanol	C ₂ H ₅ OH
Military grade	-	Poly(methyl methacrylate)	(C ₅ H ₈ O ₂) _n

اندازه‌گیری و همچنین اثر پارامترهای سرعت پوشش دهی، دمای پخت و زمان پخت بر مقاومت الکتریکی و ویژگی نوری پوشش برر سی شد. به منظور برر سی تأثیر محلول شست و شو بر خواص الکتریکی و چسبندگی پوشش به زیرلایه، دود سته نمونه آماده و برای دسته اول از آب مقطر به عنوان محلول شست و شو و برای دسته دوم از محلول متوکسی بنزن-بوتانول با نسبت یک به یک به عنوان محلول شست و شو استفاده شد. پوشش دهی با دستگاه لایه نشانی چرخشی مدل AFB0812SH، ساخت کشور ایران با قابلیت چرخش حداکثر تا ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه، همراه با تنظیم تعداد دور و مدت زمان چرخش، انجام شد. اندازه‌گیری مقاومت سطحی لایه‌های نازک PEDOT به وسیله مولتی‌متر دیجیتال و دستگاه سنج ۴- سوزنی که در آزمایشگاه نانو دانشگاه صنعتی مالک اشتر ساخته شده است، انجام شد. جهت اندازه‌گیری درصد عبور نمونه‌ها از طیف‌سنجی ماورای بنفش- مرئی استفاده شد. طیف‌های ماورای بنفش توسط دستگاه ماورای بنفش شرکت PG Instruments Ltd مدل UVLT70 در آزمایشگاه نانو دانشگاه صنعتی مالک اشتر انجام شد. این دستگاه دارای دو لامپ دوتریم و تنگستن است که قابلیت سنجش جذب و عبور در گستره طول موج‌های ۱۹۰nm تا ۱۱۰۰nm را دارد. برای شناسایی ساختار شیمیایی پوشش از طیف سنجی مادون قرمز استفاده شد. طیف FT-IR نمونه با قدرت تفکیک ۴ cm⁻¹ در محدوده فرکانسی ۴۰۰۰-۴۰۰ cm⁻¹ در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد.

صاف گردید و سپس حلال CH₃OH تبخیر و نمک حاصل داخل آون خلأ و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. نمک حاصل زرد رنگ و دارای نقطه ذوب ۱۰۶ درجه سانتی‌گراد است. به منظور تهیه محلول پلیمری شدن مقدار ۰/۰۲۲ گرم از مونومر ۳ و ۴-اتیلن دی اکسی تیوفن درون یک بالن ریخته و به آن ۱۰ میلی‌لیتر بوتانول نرمال اضافه و به مدت ۵ دقیقه در دمای اتاق به وسیله همزن مغناطیسی مخلوط شد. مونومر در بوتانول حل گردید و سپس به محلول فوق ۰/۲۶ گرم آهن (III) توسیلات اضافه شد. رنگ محلول از حالت شفاف و بی‌رنگ به رنگ زرد کدر تغییر یافت. محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق مخلوط شد و در این مدت هیچ‌گونه تغییر رنگی نداشت، PH این محلول به وسیله PH متر اندازه‌گیری شد و مقدار آن برابر ۴ بود. برای ایجاد پوشش شفاف و ضد الکتریسیته ساکن لایه نشانی چرخشی محلول پلیمری شدن بر روی زیر لایه پلی (متیل متاکریلات) انجام شد و در پایان و پس از اطمینان از پخت لایه، مقاومت فیلم‌ها اندازه‌گیری گردید. سپس لایه‌ها به منظور حذف کاتالیزور اضافی و واکنش نداده و حذف یون‌های آهن باقی‌مانده با محلول شست و شو و با استفاده از دستگاه لایه نشانی چرخشی با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه برای ۲۰ ثانیه پوشش داده شد. محلول شست و شو با سرعت ثابت در ۱۰ ثانیه اول در مرکز نمونه تخلیه گردید. سپس نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و بعد از اطمینان از خشک شدن لایه‌ها، مقاومت فیلم‌ها

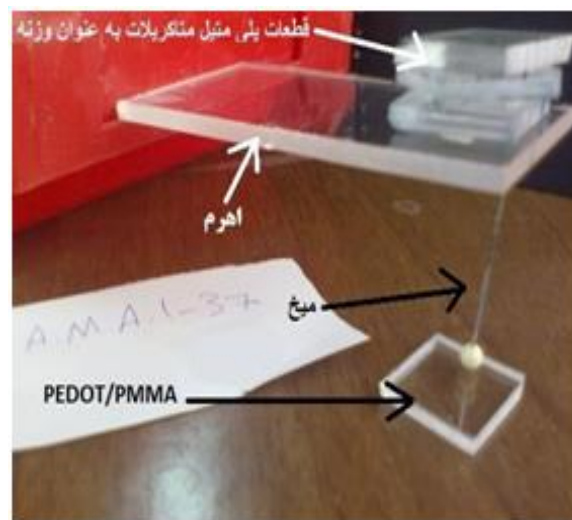
و ۱۱۹۳ و ۱۰۶۶ و ۹۸۵ و 664 cm^{-1} مشاهده شدند که مربوط به پیوندهای موجود در پوشش تشکیل شده بر زیر لایه PMMA است. ساختار PMMA و PEDOT در شکل ۳ آمده است، با توجه به ساختارهای ارایه شده پیک‌های نواحی 1631 و 1437 و 1193 و 1066 و 985 و 664 cm^{-1} مربوط به حلقه تیوفن و پیک‌های مشاهده شده در نواحی 1271 و 1241 cm^{-1} مربوط به دوپه کننده است [۱۲، ۱۳].

جدول ۳ نتایج مربوط به تأثیر دمای پوشش دهی بر مقاومت الکتریکی پوشش را نشان می‌دهد و بیانگر این مطلب است که دمای پخت تأثیر زیادی بر مقاومت الکتریکی پوشش ندارد؛ زیرا واکنش پلیمری شدن (شکل ۴) در دمای اتاق تقریباً کامل شده است. همچنین به دلیل این که کاتالیزور استفاده شده یعنی آهن (III) تو سیلات در دمای اتاق بلوری نمی‌شود، بنابراین پوشش ایجاد شده در دمای اتاق مقاومت قابل قبولی را نشان داد. اگر کاتالیزور در دمای اتاق بلوری می‌شد، باید بلافاصله پوشش در دمای بالا پخت می‌شد تا از تبلور کاتالیزور جلوگیری شود [۱۵].



شکل ۲. طیف FT-IR مربوط به PMMA بدون پوشش [۱۴] و PMMA پوشش داده شده با PEDOT.

چسبندگی لایه PEDOT به PMMA به وسیله آزمون تب و با استفاده از چیدمانی که در شکل ۱ نشان داده شده است به روش زیر بررسی شد [۱۱]. یک میخ به یک بازو از جنس PMMA که روی یک قطعه پلاستیکی قرار داشت متصل شد و سر میخ روی نمونه قرار گرفت. قطر سر میخ ۳ میلی‌متر و دارای یک نوک گرد است. مقدار نیروی وارد شده بر نمونه با تعداد قطعات PMMA قرار گرفته روی اهرم کنترل شد. نمونه PEDOT/PMMA از زیر میخ تحت فشار برون کشیده شد و نمونه مورد بررسی قرار گرفت تا مشاهده شود لایه PEDOT چه مقدار آسیب دیده است. این روش مقادیر پیوسته‌ای از مقاومت لایه PEDOT را نمی‌دهد و فقط برای مقایسه تفاوت چسبندگی لایه PEDOT به زیرلایه در نمونه‌ها استفاده می‌شود و یک مقدار تقریبی و قابل مقایسه را می‌دهد.



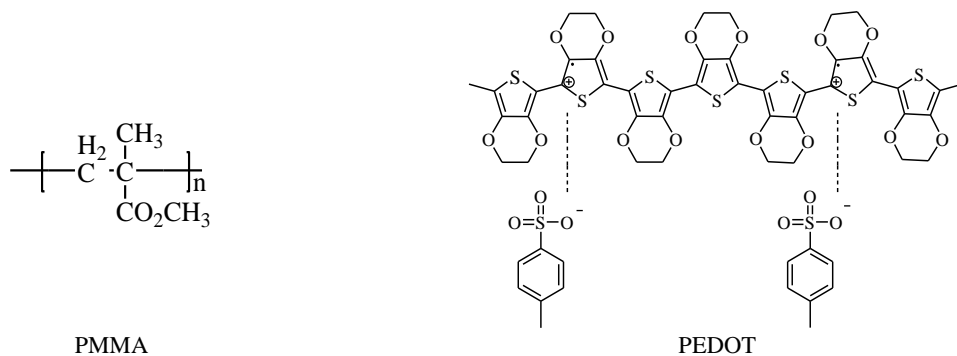
شکل ۱. چیدمان مورداستفاده برای آزمون چسبندگی.

نتایج و بحث

در شکل ۲ و جدول ۲ به ترتیب طیف FT-IR و مشخصات کامل پیک‌های موجود در طیف FT-IR مربوط به نمونه PMMA پوشش داده شده و بدون پوشش آمده است. از مقایسه این مقادیر با یکدیگر، پیک‌های جدیدی برای نمونه پوشش داده شده در نواحی 1631 و 1437 و 1271 و 1241

جدول ۲. پیک‌های طیف FT-IR برای PMMA بدون پوشش [۱۲] و پوشش داده‌شده.

PMMA بدون پوشش		PMMA پوشش داده‌شده	
مشخصه	فرکانس (cm ⁻¹)	مشخصه	فرکانس (cm ⁻¹)
v (C-C)	۷۵۰	v (C=C)	۱۶۳۱
v _s (C-O-C)	۸۱۳	v (C-C)	۱۴۳۷
v _a (C-O-C)	۱۱۴۹	v (S=O)	۱۲۷۱
v _a (C-O-C)	۱۱۹۲	v (S=O)	۱۲۴۱
v (C=O)	۱۷۳۱	v(C-O-C)	۱۱۹۳
v (C-H)	۲۹۵۱	v(C-O-C)	۱۰۶۶
		v (S-C)	۹۸۵
		v (S-C)	۶۶۴



شکل ۳: ساختار مربوط به PMMA و PEDOT [۱۶, ۱۲].

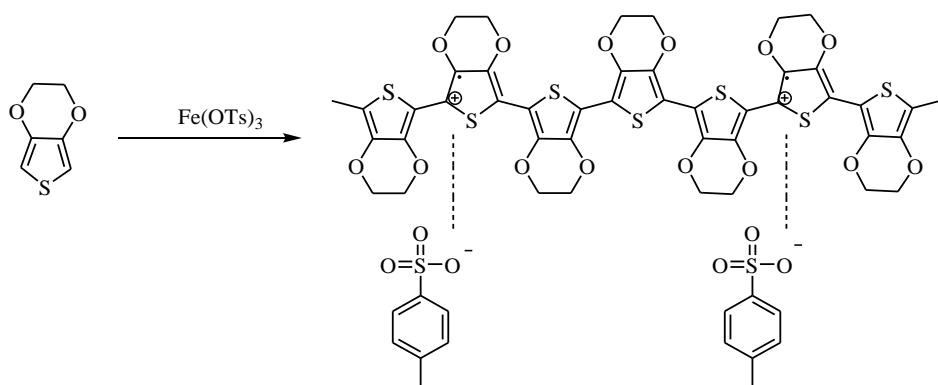
جدول ۳. تأثیر دمای پخت بر مقاومت لایه.

مقاومت (کیلو اهم)		دمای پخت (درجه سانتی‌گراد)	شماره نمونه
ب	الف		
۷	۷	۲۵	۱
۷-۷/۵	۷-۷/۵	۳۵	۲
۷/۵	۷/۵	۴۵	۳
۷	۷	۵۵	۴

الف: مقاومت پوشش قبل از شست‌وشو

ب: مقاومت پوشش بعد از شست‌وشو با آب مقطر

برای تمامی نمونه‌ها سرعت پوشش دهی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، زمان پخت ۱۰ دقیقه و تعداد لایه برابر با یک است.



شکل ۴. پلیمری شدن EDOT به PEDOT [۱۷].

حلال اطمینان حاصل کرد و مطمئن شد حلال ۱۰۰٪ تبخیر و واکنش پلیمری شدن کامل شده است.

شکل ۵ نتایج مربوط به نمونه‌های تهیه شده با محلول پلیمری شدن یکسان در دما پخت و زمان پخت مشابه ولی سرعت‌های پوشش دهی متفاوت را نشان می‌دهد. مشاهده شد که از سرعت ۲۰۰۰-۵۰۰ دور بر دقیقه با افزایش سرعت پوشش دهی مقاومت لایه‌ها افزایش یافت زیرا با

جدول ۴ نتایج مربوط به تأثیر زمان پخت بر مقاومت الکتریکی پوشش را نشان می‌دهد و بیانگر این مطلب است که زمان پخت تأثیر زیادی بر مقاومت الکتریکی پوشش ندارد؛ زیرا سطح تماس زیاد محلول پلیمری شدن با هوا باعث افزایش سرعت تبخیر حلال بوتانول در دمای اتاق گردیده و واکنش پلیمری شدن تا حدی کامل شده است و با قرار دادن نمونه در داخل آن می‌توان از تبخیر کامل

جدول ۴: تأثیر زمان پخت بر مقاومت لایه

شماره نمونه	سرعت پوشش دهی (دور بر دقیقه)	زمان پخت (دقیقه)	مقاومت (کیلو اهم)
۱	۷۵۰	۵	الف
۱	۷۵۰	۱۰	ب
۱	۷۵۰	۱۵	۵/۵
۲	۱۰۰۰	۵	۷
۲	۱۰۰۰	۱۰	۷/۵
۲	۱۰۰۰	۱۵	۷/۵

الف: مقاومت پوشش قبل از شست‌وشو

ب: مقاومت پوشش بعد از شست‌وشو

برای تمامی نمونه‌ها دمای پخت برابر ۵۵ درجه سانتی‌گراد و تعداد لایه‌ها برابر با یک است.

شیب $\frac{1}{R}$ است. همچنین مقاومت سطح بر حسب کیلو اهم بر مربع بوده و با استفاده از معادله ۲ بدست می آید.

همان طور که نتایج نشان می دهد مقاومت این پوشش های پلیمری از مقاومت 10^8 اهم کمتر است، و از آنجا که کاهش مقاومت الکتریکی پلیمر تا 10^8 اهم و کمتر از این مقدار می تواند تجمع الکتریسیته ساکن در سطح پلیمر را کاهش دهد بنابراین پوشش پلیمری ایجاد شده روی زیر لایه پلی (متیل متاکریلات)، توانایی کاهش تجمع الکتریسیته ساکن را دارد.

$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad \text{معادله ۲}$$

افزایش سرعت پوشش دهی ضخامت لایه ها کمتر شده و مطابق معادله ۱ [۱۸] با کاهش ضخامت لایه، مقاومت افزایش می یابد ولی مقاومت های به دست آمده از سرعت های بیش از ۲۰۰۰ دور بر دقیقه از یک الگوی خاص پیروی نمی کند، زیرا با افزایش سرعت چرخش، مقدار تبخیر حلال بوتانول افزایش یافته است و این باعث شده است شرایط محلول پلیمری شدن تغییر کند و نتایج از یک الگوی یکسان پیروی نکند.

$$\rho = \frac{\rho_0}{G_7 \left(\frac{W}{S} \right)} \quad \text{معادله ۱}$$

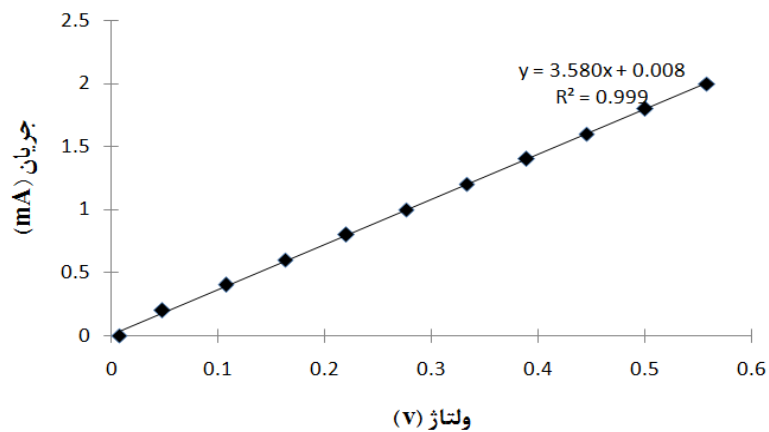
ρ مقاومت ویژه، W ضخامت و S فاصله بین سوزنها است. نمودار ۱ منحنی جریان-ولتاژ برای نمونه شماره ۲ از جدول ۵ را نشان می دهد. این نمودار یک خط صاف با

جدول ۵. لایه نشانی چرخشی با سرعت های متفاوت بر روی PMMA و اندازه گیری مقاومت.

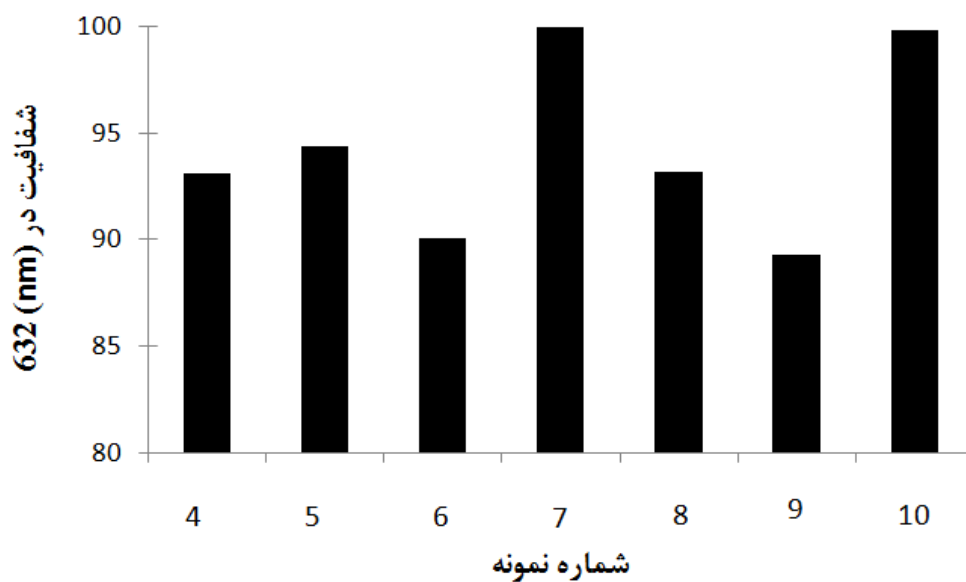
شماره نمونه	سرعت (دور بر دقیقه)	*مقاومت سطح (کیلو اهم بر مربع)
۱	۲۵۰	-
۲	۵۰۰	۱/۲۶
۳	۷۵۰	-
۴	۱۰۰۰	۴/۶۸
۵	۱۵۰۰	۸/۲۷
۶	۲۰۰۰	۱۱/۹۵
۷	۲۵۰۰	۶۱/۳۸
۸	۳۰۰۰	۸/۸۵
۹	۳۵۰۰	۲۴/۸۵
۱۰	۴۰۰۰	۲۰/۹۵

* از دستگاه سنججه ۴-سوزنی برای اندازه گیری مقاومت استفاده شده است.

برای تمامی نمونه ها زمان پخت ۱۰ دقیقه، دمای پخت ۵۵ درجه سانتی گراد و تعداد لایه ها برابر با یک است.



نمودار ۱. منحنی جریان-ولتاژ، نمونه شماره ۲.



نمودار ۲. مقایسه درصد عبور در طول موج ۶۳۲ nm برای نمونه‌های شماره ۴ تا ۱۰

می‌دهد که درصد عبور برای نمونه‌های شسته شده با محلول متوکسی بنزن-بوتانول بیشتر است و استفاده از محلول متوکسی بنزن-بوتانول به جای آب مقطر به عنوان محلول شست و شو باعث افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه می‌شود و این افزایش بیش از ۵ برابر است.

جدول ۶ درصد عبور برای نمونه‌های پوشش داده شده با سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد، برای نمونه‌های ۱ و ۲ از آب مقطر به عنوان محلول شست و شو و برای نمونه ۳ و ۴ از محلول متوکسی بنزن-بوتانول به عنوان محلول شست و شو استفاده شده است. این نتایج نشان

جدول ۶. تأثیر محلول شست‌وشو بر خواص نوری و مکانیکی پوشش.

نمونه	محلول شست‌وشو	در صد عبور نسبت به نمونه بدون پوشش	نیروی مورد نیاز برای ایجاد صدمات قابل مشاهده
۱	آب مقطر	۹۳/۱	کمتر از ۱۰ گرم
۲	آب مقطر	۹۵	کمتر از ۱۰ گرم
۳	متوکسی بنزن-بوتانول	۱۰۰	بیشتر از ۵۰ گرم
۴	متوکسی بنزن-بوتانول	۱۰۰	بیشتر از ۵۰ گرم

سرعت پوشش دهی برای تمام نمونه‌ها برابر ۱۰۰۰ دور بر دقیقه است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پوشش ایجاد شده روی زیرلایه پلاستیکی پلی (متیل متاکریلات) دارای شفافیت بالا و چسبندگی خوب به سطح است. درصد عبور نور مرئی برای این پوشش بالا است. پوشش در دمای پایین ایجاد شده بنابراین هیچ‌گونه اثر تخریبی روی پلیمر ندارد. پوشش ایجاد شده دارای مقاومت الکتریکی مناسب جهت کاربردهای ضد الکتریسیته ساکن است. این پوشش در حال که دارای چسبندگی مناسب به سطح است، تأثیر منفی بر خواص نوری زیرلایه ندارد.

مراجع

- polycarbonate prepared by the sol-gel method, *Progress in Organic Coatings*, 51(2004) 312-319
- H. Lin, D. E. Day, J. O. Stoffer, *Optical and mechanical properties of optically transparent poly(methyl methacrylate) composites*, *Polymer Engineering & Science*, 32(1992) 344-350.
- C. C. Chang, F. H. Hwang, C. Y. Hsieh, C. C. Chen, L. P. Cheng, *Preparation and characterization of polymer/zirconia nanocomposite antistatic coatings on plastic substrates*, *Coatings Technology and Research*, 10(2013) 73-78.
- M. Omastova, J. Pavlinec, J. Pionteck, F. Simon, S. Kosina, *Chemical preparation and characterization of conductive poly(methyl methacrylate)/polypyrrole composites*, *Polymer*, 39(1998) 6559-6566.
- A. Elschner, S. Kirchmeyer, W. Lovenich, U. Merker, K. Reuter, *PEDOT: Principles and Applications of an Intrinsically Conductive Polymer*, CRC Press, (2010).
- C. Terrier, J. P. Chatelona, R. Berjoanb, J. A. Rogera, *Sb-doped SnO₂ transparent conducting oxide from the sol-gel dip-coating technique*, *Thin Solid Films*, 263(1995) 37-41.
- D. R. Uhlmann, T. Suratwala, K. Davidson, J. M. Boulton, G. Teowee, *Sol-gel derived coatings on glass*, *Non-Crystalline Solids*, 218(1997) 113-122.
- D. M. de Leeuw, P. A. Kraakman, P. F. G. Bongaerts, C. M. J. Mutsaers, D. B. M. Klaassen, *Electroplating of*
- R. B. Rosner, *Conductive materials for ESD applications: an overview*, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 1(2001) 9-16.
- D. Kontziampasis, G. Boulousis, A. Smyrnakis, K. Ellinas, A. Tserepi, E. Gogolides, *Biomimetic, antireflective, superhydrophobic and oleophobic PMMA and PMMA-coated glass surfaces fabricated by plasma processing*, *Microelectronic Engineering*, 121(2014) 33-38.
- M. E. L. Wouters, D. P. Wolfs, M. C. van der Linde, J. H. P. Hovens, A. H. A. Tinnemans, *Transparent UV curable antistatic hybrid coatings on*

- conductive polymers for the metallization of insulators*, Synthetic Metals, 66(1994) 263-273.
10. T. S. Hansen, K. West, O. Hassager, N. B. Larsen, *Integration of conducting polymer network in non-conductive polymer substrates*, Synthetic Metals, 156(2006) 1203-1207.
 11. E. D. Emmons, R. G. Kraus, S. S. Duvvuri, J. S. Thompson, A. M. Covington, *High-pressure infrared absorption spectroscopy of poly(methyl methacrylate)*, Polymer Science Part B: Polymer Physics, 45(2007) 358-367.
 12. M. Mumtaz, E. Ibarboure, C. Labrugere, E. Cloutet, H. Cramail, *Synthesis of PEDOT Nano-objects Using Poly(vinyl alcohol)-Based Reactive Stabilizers in Aqueous Dispersion*, Macromolecules, 41(2008) 8964-8970.
 13. G. Duan, C. Zhang, A. Li, X. Yang, L. Lu, X. Wang, *Preparation and Characterization of Mesoporous Zirconia Made by Using a Poly (methyl methacrylate) Template*, Nanoscale Research Letters, 3(2008) 118-122.
 14. M. A. Flores, R. Castaneda, G. Torres, O. Zelaya, *Optical, electrical and structural properties of indium-doped cadmium oxide films obtained by the sol-gel technique*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(2009) 28-32.
 15. T. Y. Kim, J. E. Kim, K. S. Suh, *Effects of alcoholic solvents on the conductivity of tosylate-doped poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT-OTs)*, Polymer International, 55(2006) 80-86.
 16. T. Y. Kim, C. M. Park, J. E. Kim, K. S. Suh, *Electronic, chemical and structural change induced by organic solvents in tosylate-doped poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT-OTs)*, Synthetic Metals, 149(2005) 169-174.
 17. L. B. Valdes, *Resistivity Measurements on Germanium for Transistors*, Proceedings of the IRE, 42(1954) 420-427.