اصلاح سطح و مشخصه‌یابی پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات (PET) با پلاسمای SO_2 باهدف کاربرد در حوزه زیست‌پزشکی

فرهاد احمدی[۱]، محمد تقی خراسانی[۲]، آزاده آصف نژاد[۳]، مرتضی دلیری جوپاری[۴]

[۱] گروه بیومواد، پژوهشکده نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، البرز، ایران

[۲] پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران، ایران

[۳] گروه بیومواد، دانشکده علوم و فناوری‌های پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

[۴] پژوهشکده زیست‌فناوری کشاورزی، پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست‌فناوری، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۹/۱۹- پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸)

چکیده

پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات (PET)، عضوی از خانواده پلیمرهای پلی‌استر، به دلیل پایداری مکانیکی و شیمیایی بالا برای ساخت کاشتنی‌های پزشکی، به‌ویژه در ساخت عروق مصنوعی، استفاده می‌شود. اصولاً، تحقیق حاضر به‌منظور اصلاح سطح این پلیمر باهدف تولید PET با خصوصیات سطح بهینه جهت افزایش تطابق و عملکرد در کاربردهای پزشکی انجام شده است. این اصلاحات شامل تنظیم زاویه تماس، تغییرات ترکیب شیمیایی سطح، بهبود ویژگی‌های آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح، و تغییرات در ریخت‌شناسی سطح می‌شود. هدف این تحقیق، بهبود خصوصیات سطحی PET به‌گونه‌ای است که بهبود عملکرد و کارایی آن در ساخت عروق مصنوعی و سایر کاربردهای پزشکی حاصل گردد. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق شامل زمان تیمار، غلظت گاز دی‌اکسید گوگرد، شدت پلاسما و خواص سطح پلیمر هستند. در طی این تحقیق، نمونه‌های فیلم پلیمری درون دستگاه پلاسما با محفظهٔ خلأ قرار داده شدند و در معرض پلاسمای SO_2 قرار گرفتند. عامل دار شدن سطح پلیمر با حضور مولکول‌ها یا گروه‌های شیمیایی شامل گوگرد و اکسیژن به‌وسیلهٔ طیف‌سنجی (FTIR) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج طیف‌سنجی فروسرخ در نمونهٔ تیمار شده با پلاسمای گاز SO_2، وجود پیک‌های پیوندهای متقارن SO_2 در SO_3 یا SO_4 را در نمونه تأیید کرد. تصاویر سه‌بعدی AFM و آزمون زاویهٔ تماس، تأییدکننده تغییرات ریخت‌شناسی و ترشوندگی سطح پلیمر و بودند. استفاده از روش پلاسما با گاز SO_2 یک روش مناسب جهت اصلاح سطح پلی‌اتیلن‌ترفتالات بوده و کاربرد این پلیمر را در حوزه زیست‌پزشکی تقویت می‌نماید.

کلمات کلیدی: پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات، اصلاح سطح، پلاسمای SO_2، مشخصه‌یابی

Surface modification and characterization of polyethylene terephthalate (PET) polymer with SO_2 plasma with the aim of application in the field of biomedicine

Abstract

Polyethylene terephthalate (PET) polymer, a member of the polyester polymer family, is used for the manufacture of medical implants, especially in the manufacture of artificial vessels, due to its high mechanical and chemical stability. Basically, the current research has been carried out in order to modify the surface of this polymer with the aim of producing PET with optimal surface characteristics to increase compatibility and performance in medical applications. These modifications include adjusting the contact angle, changes in the surface chemical composition, improving the hydrophilic and hydrophobic properties of the surface, and changes in the surface morphology. The aim of this research is to improve the surface properties of PET in such a way as to improve its performance and efficiency in the production of artificial vessels and other medical applications. The variables investigated in this research include treatment time, sulfur dioxide gas concentration, plasma intensity and polymer surface properties. During this research, polymer film samples were placed inside the plasma device with a vacuum bag and were exposed to SO_2 plasma. The functionalization of the polymer surface with the presence of molecules or chemical groups including sulfur and oxygen was investigated by spectroscopy (FTIR) and the results of infrared spectroscopy in the sample treated by SO_2 gas plasma showed the presence of peaks of symmetrical bonds of SO_2 in SO_3 or SO_4 in the sample. approved. 3D AFM images and contact angle test confirmed the morphological changes and wettability of the polymer surface. Using the plasma method with SO_2 gas is a suitable method to modify the surface of polyethylene terephthalate and strengthens the application of this polymer in the field of biomedicine.

***Keywords**: Polyethylene terephthalate polymer, Surface modification, SO_2 plasma, Characterization.*

E-mail of Corresponding author: farhadahmadi6767@gmail.com

مقدمه

پلی‌اتیلن‌ترفتالات از شناخته‌شده‌ترین رزین‌های پلیمری گرمانرم، از خانوادهٔ پلی‌استرها با فرمول شیمیایی $(C10H8O4)_n$ است. همچنین این پلیمر با نام‌های تجاری خود مانند داکرون نیز شناخته می‌شود. کاربردهای پلی‌اتیلن‌ترفتالات را می‌توان بر اساس درجه‌های متفاوت این پلیمر پرکاربرد دسته‌بندی کرد. استفاده از درجهٔ نخ یا الیاف آن برای تولید نخ‌ها و پارچه‌های پلاستیکی و استفاده از درجه بطری و ظرف آن برای تولید ظروف پلاستیکی نگهدارندهٔ نوشیدنی‌ها و مواد خوراکی به دلیل مقاومت این ماده به عبور گازها و نداشتن اثر منفی روی مواد خوراکی نقش محافظت از نوشیدنی‌ها و مواد خوراکی را به عهده دارد. به دلیل گرمانرم بودن و ویژگی شکل‌پذیری این پلیمر، در ترکیب با الیاف شیشه از آن در مواد مرکب مهندسی نیز استفاده می‌شود [۱].

کاشتنی‌های ساخته شده از پلیمرهای مختلف از جمله پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات دارای کاربردهای مختلف در زمینهٔ زیست‌پزشکی بوده‌اند؛ اما هم‌زمان کاربرد آنها با چالش‌های بزرگی نیز همراه بوده است [۲]. از دلایل عدم موفقیت کاشتنی‌ها، ویژگی‌های سطح نامناسب آنها است که می‌تواند در برخورد با سیستم ایمنی مشکلاتی را پدید آورد [۱،۳]؛ بنابراین اصلاح سطح پلیمرها روش مناسبی جهت کاربرد کاشتنی‌ها در حوزه زیست‌پزشکی است [۴]. امروزه روش‌های مختلفی باهدف ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی روی سطح مواد مورداستفاده قرار می‌گیرند. روش‌های شیمیایی و بکار بردن محلول‌های شیمیایی، روش‌های تابش پرتو مانند لیزر و پرتوی گاما و پلاسمای سرد، مثال‌هایی برای روش‌های ایجاد تغییر در سطح مواد پلیمری هستند. روش پلاسما به دلیل عدم ایجاد آلودگی مانند پسماند محلول شیمیایی و کم‌خطر بودن در مقایسه با تماس پرتوهای پر انرژی مانند پرتوی گاما، روشی کم‌هزینه، کم‌خطر و سازگار با محیط‌زیست به شمار می‌رود [۵]. خصوصیت بارز اصلاح سطح در پلیمرها با روش پلاسما، ایجاد تغییرات موردنظر روی سطح در ابعاد ۱۰-۵۰ آنگستروم از سطح پلیمر و هم‌زمان حفظ خصوصیات تودهٔ داخلی پلیمرها است که این روش را به‌عنوان روشی مناسب در اصلاح سطح مواد پلیمری معرفی می‌کند [۶]. پژوهش‌های انجام شده روی اصلاح سطح پلیمرهای مورد کاربرد در ساخت کاشتنی‌ها به‌منظور ایجاد تغییراتی که منجر به زیست‌سازگاری و خون سازگاری بیشتر این مواد شود، انجام شده است. موضوع موردمطالعهٔ این تحقیقات برای پلیمرهای مختلف و بر اساس متغیرهای قابل‌کنترل در ایجاد فاز پلاسما که شامل گازهای مورداستفاده، شدت‌جریان و فشار ورودی این گازها به پلاسما و قدرت یا توان بکار برده شده برای تولید پلاسما توسط دستگاه‌های مختلف ایجاد پلاسما، انتخاب شده‌اند [۷،۸].

در پژوهش‌های بسیاری هم به پلیمریزاسیون پیوندی توسط پلاسما و نشاندن مولکول‌های زیستی؛ مانند هپارین و آلبومین روی سطح پلیمرها باهدف افزایش زیست‌سازگاری و خون سازگاری پلیمرها پرداخته شده است که در حقیقت این فرایندهای اصلاح سطح نیاز به آنالیز و اطمینان از پیوند اشتراکی پوشش‌های نامبرده دارد. به دلیل حضور گروه‌های دارای سولفور در هپارین، اصلاح سطح پلی‌اتیلن‌ترفتالات با گاز SO_2 می‌تواند با ایجاد گروه‌های واکنش‌گر گوگرددار، خاصیت زیست تقلیدی، به‌منظور خون سازگار کردن سطح پلیمر ایجاد کند [۹، ۱۰]. براین‌اساس، مطالعه حاضر به هدف سطح پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات با استفاده از پلاسمای گاز دی‌اکسید گوگرد به‌منظور ایجاد زیست‌سازگاری بیشتر، انجام‌گرفته است، گرچه ایجاد پلاسمای گاز دی‌اکسید گوگرد،

باتوجه‌به متغیرهای قابل‌کنترل نظیر توان دستگاه و نرخ ورودی گاز و زمان قرارگرفتن پلیمر در معرض پلاسما، از چالش‌های پیش رو در این پژوهش بوده است.

مواد و روش تحقیق

آماده‌سازی فیلم‌های پلی‌اتیلن‌ترفتالات

فیلم‌های پلی‌اتیلن‌ترفتالات از شرکت راد مهر پلاست تهیه شدند و در ابعاد ۱۰ در ۲۰ سانتی‌متر مربع، برش خوردند تا قابل قرارگیری در محفظهٔ خلأ دستگاه پلاسمای فرکانس رادیویی (RF) باشند. به‌منظور قرارگیری هر دوروی فیلم‌های پلی‌اتیلن‌ترفتالات در برخورد با پلاسمای گاز دی‌اکسید گوگرد، در قسمتی از ورقه‌ها سوراخ‌های کوچکی ایجاد شد تا، به‌منظور آویزان بودن در محفظهٔ دستگاه، در قلاب قرار گیرد. در قدم بعد فیلم‌های برش خورده، به‌منظور پاک‌شدن از آلودگی‌های سطحی مانند چربی‌ها و ریزاندامگان، توسط الکل و استون پاک‌سازی شدند.

آماده‌سازی دستگاه پلاسما با محفظهٔ خلأ

در این مطالعه از سامانه‌پردازش پلاسمای RF تحت خلأ (مدل GC-B00RF) محصول شرکت بسا فن آوران نصیر، استفاده گردید. قبل و بعد از استفاده از محفظهٔ پلاسما، دستگاه با پلاسمای آرگون پاک‌سازی شد. شرایط کار دستگاه با هدف انجام فرایند پاک‌سازی با فشار ۱۰ سانتی متر مکعب در دقیقه، توان ۵۰ وات و در مدت زمان ۱۰ دقیقه می‌باشد که طی فرآیند مذکور، اتم‌ها و ذرات متصل به داخل محفظه‌ی دستگاه که از قبل به سطح محفظه دستگاه اتصال یافته‌اند، از دستگاه روبیده و پاکسازی می‌شوند تا فرایند اصلاح سطح ما تحت تاثیر این ذرات از پیش موجود در دستگاه قرار نگیرد [۱۱،۱۲].

شکل ۱- سامانه‌پردازش پلاسما

قراردادن نمونه‌های پلیمری در برخورد با پلاسمای دی‌اکسید گوگرد

نمونه‌های فیلم پلیمری درون دستگاه پلاسما با محفظهٔ خلأ قرار گرفتند و با گاز دی‌اکسید گوگرد در زمان‌های ۲ دقیقه، ۱دقیقه، ۳۰ ثانیه و ۱۵ ثانیه با توان نامی ۱۵۰ وات، در برخورد با پلاسما قرار داده شدند. فرکانس مولد روی ۱۳/۵۶ مگاهرتز و فشار گاز ۸۰ میلی‌تور، در نظر گرفته شد. به‌منظور قرارگرفتن دوروی فیلم‌های پلیمری در برخورد با پلاسما، آنها درون محفظهٔ پلاسما به‌صورت معلق در محفظه دستگاه به شکل آویخته قرار گرفتند. شرایط پلاسما برای ۴ نمونه متفاوت با زمان‌های ۲ دقیقه، ۱دقیقه، ۳۰ ثانیه و ۱۵ ثانیه در جدول ۱ نشان داده شده است.

آزمون طیف‌سنجی فروسرخ

عامل دار شدن سطح پلیمر با حضور مولکول‌ها یا گروه‌های شیمیایی شامل گوگرد و اکسیژن بوسیله آنالیز طیف‌سنجی بازتاب کل تضعیف‌شده فروسرخ تبدیل فوریه (ATR-FTIR)، دستگاه Bruker مدل vector33 ساخت کشور آلمان در محدودهٔ عدد موج 4000-400 (cm^{-1}) و با استفاده از دستور کارهای مطالعات پیشین موردمطالعه و بررسی قرار گرفت [۱۳].

جدول ۱- شرایط پلاسما برای ۴ نمونه متفاوت. (Hz، W و MT به ترتیب بیانگر مگا هرتز، وات و میلی‌تور است.)

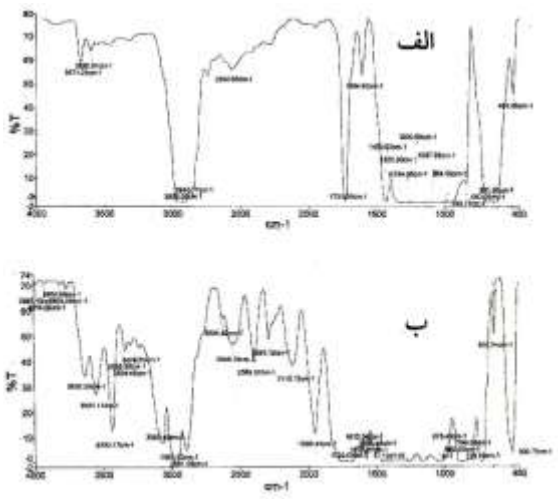
شماره نمونه	شرایط دستگاه برای گاز آرگون	زمان برای گاز آرگون	شرایط دستگاه برای گاز SO_2	زمان برای گاز SO_2
۱	۱۳/۵۶ Hz ۱۰۰ W ۶۸ MT	۱ min	۱۳/۵۶ Hz ۱۵۰ W ۸۰ MT	۲ min
۲	۱۳/۵۶ Hz ۱۰۰ W ۶۸ MT	۱ min	۱۳/۵۶ Hz ۱۵۰ W ۸۰ MT	۱ min
۳	۱۳/۵۶ Hz ۱۰۰ W ۶۸ MT	۱ min	۱۳/۵۶ Hz ۱۵۰ W ۸۰ MT	۳۰ sec
۴	۱۳/۵۶ Hz ۱۰۰ W ۶۸ MT	۱ min	۱۳/۵۶ Hz ۱۵۰ W ۸۰ MT	۱۵ sec

آزمون زاویه تماس آب (WCA)

زاویه تماس قطره آب بر روی فیلم‌های پلیمری به روش sessile drop با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری نوری زاویه تماس مدل OCA20 شرکت Data physics ساخت کشور آلمان، اندازه‌گیری شد. تغییرات شیمی سطح و تغییرات ریخت‌شناسی سطح هر دو بر روی مقدار آب‌دوستی و آب‌گریزی سطح تأثیرگذار هستند. مقدار زاویه تماس برای نمونه‌های پلاسما شده با زمان‌های ۲ دقیقه، ۱دقیقه، ۳۰ ثانیه و ۱۵ ثانیه اندازه‌گیری و ثبت شد. برای ارزیابی صحیح از تغییرات آبدوستی یا آبگریزی نمونه‌ها، مقدار میانگینی از زاویه‌های تماس ۱۰ نقطه‌ی انتخاب شده به صورت تصادفی از نمونه‌ها را حساب کرده و مقدار بدست آمده را نماینده آن نمونه در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

عامل دار شدن سطح پلیمر با حضور مولکول‌ها یا گروه‌های شیمیایی شامل گوگرد و اکسیژن بوسیله ی آنالیز طیف‌سنجی بازتاب کل تضعیف شده فروسرخ تبدیل فوریه نشان داد که گروه‌های SO_2 و SO از ترکیبات گوگرد، پیوندهای فروسرخ بسیار قوی در محدودهٔ ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ (cm^{-1})، ایجاد می‌کنند. شکل۱ نتایج به دست آمده از طیف‌سنجی فروسرخ نمونه‌های پلاسما شده و نمونه شاهد را نشان می‌دهد. از آنجا که با توجه به شرایط تعیین شده برای دستگاه پلاسما، در بازه‌ی زمانی کوتاهی، تقریباً تغییرات شیمی سطح ایجاد شده به مقدار ثابتی می‌رسد، نمودار حالت (ب) برای همه بازه‌های زمانی، تقریباً یکسان مشاهده می‌شود. مورد الف مربوط به نمونه شاهد است که بین مقدارهای عدد موج ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ cm^{-1} پیک خاصی مشاهده نمی‌شود ولی در نمونه‌ی پلاسما خورده، پیک‌های مربوط به پیوندهای کششی متقارن SO_2 در SO_3 یا SO_4 در ۱۱۸۰ cm^{-1} قابل مشاهده است.



شکل ۲- نمودار طیف سنجی فروسرخ مربوط به الف) نمونه شاهد ب) نمونه‌های پلاسما خورده

یافته‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان دادند که به‌کارگیری روش پلاسما با گاز SO_2 یک روش مناسب برای اصلاح سطح پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات است. درحالی‌که پلیمرها موادی هستند که به طور گسترده در صنعت زیست‌پزشکی مورداستفاده قرار می‌گیرند، به‌ندرت

به شکل اصلاح نشده توانایی کاربرد دارند. نوعی تیمار بهبود سطحی بیشتر برای دستیابی به ویژگی‌های مناسب برای کاربردهای خاص لازم است. در کاربردهای زیست‌پزشکی چهار روش رایج اصلاح سطح پلیمر وجود دارند که عبارت‌اند از: اصلاح با لیزر، کاشت یون، پلاسما و پیوند نانوذرات. در این میان مطالعات مربوط با اصلاح سطح با استفاده از پلاسما و به‌ویژه استفاده از گاز SO_2 بسیار محدود است [۱۴]. گرچه در سال‌های اخیر، رشد قابل‌توجهی در اصلاح سطح پلیمری، با تمرکز ویژه بر اثرات تاثیرگذار تیمار با SO_2 پلاسما، وجود داشته است. در این راستا، ندلا و همکاران روش‌های مختلف اصلاح سطح پلیمری را بررسی کرده و اثرات متمایز SO_2 پلاسما را برجسته نموده‌اند [۱۵]. عبدالرشید و همکاران در مجموع بر اثرات قابل توجه تیمار با SO_2 پلاسما بر اصلاح سطح پلیمر تأکید ویژه‌ای داشته‌اند [۱۶].

در مطالعاتی اصلاح سطح پلیمرها توسط پلاسمای گاز SO_2 مورد بررسی قرار گرفته است. دراین‌خصوص در یک مطالعه پلیمر پلی‌استری با پلاسمای دی‌اکسید گوگرد تیمار شده، یافته‌ها نشان دادند که گروه‌های واکنش‌گر تشکیل شده توسط تیمار پلاسما می‌توانند سولفیدها یا گروه‌هایی با گوگرد بسیار اکسید شده مانند گروه‌های اسید سولفونیک و سولفات‌ها باشند که می‌تواند منجر به بهبود پلیمر گردد [۱۷]. همچنین در پژوهشی مشابه با پژوهش حاضر نتایج نشان دادند که استفاده از گاز SO_2 می‌تواند سبب اصلاح سطح پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات شود و کاربرد زیست‌پزشکی آن را تقویت نماید [۱۸]. از طرفی اصلاح سطح با استفاده از دی‌اکسید گوگرد، دارای تأثیرات مهمی بر اصلاح سطح برخی پلیمرها و افزایش خواص ضدباکتریایی آنها بوده‌اند [۱۹].

از نظر مکانیسم اثر اصلاحی پلاسمای SO_2 بر پلیمر می‌توان گفت که تیمار با پلاسمای SO_2 سطوح پلیمرها را از طریق جذب مولکول‌های SO_2، ایجاد تعاملات فیزیکی و تشکیل گونه‌های واکنشی مانند رادیکال‌های گوگرد تغییر می‌دهد. واکنش‌های شیمیایی گروه‌های واکنش‌گر شامل SO_3H و SO_2OH را به سطح پلیمر وارد می‌کند که ویژگی‌های مرتبط با واکنش‌پذیری سطح را افزایش می‌دهد. این فرایند همچنین پیوندهای میان زنجیره‌ای بین زنجیره‌های پلیمری ایجاد کرده و ویژگی‌های مکانیکی را تغییر می‌دهد [۲۰].

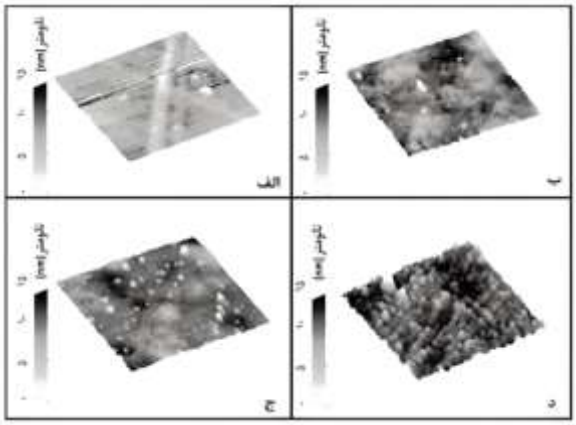
یافته‌های به‌دست‌آمده از آزمون زاویهٔ تماس آب در جدول ۲ نشان‌داده‌شده است. آن‌طور که از مقادیر به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود، زاویه تماس نمونه شاهد مقدار ۷۸ درجه است که به‌درستی نشان‌دهندهٔ خاصیت آب‌گریزی در پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات است. مقدار به‌دست‌آمده برای نمونه‌های زمان‌های ۱ و ۲ به عدد ۵ بسیار نزدیک است که نشان‌دهندهٔ افزایش چشمگیر خاصیت آب‌دوستی نمونه‌های پلاسما شده است. نمونه‌های زمان‌های ۱۵ و ۳۰ ثانیه نیز با افزایش ویژگی آب‌دوستی، مقادیر عدد زوایای ۲۰ و ۱۷ درجه را نشان می‌دهند.

تصویربرداری سه‌بعدی از سطح نمونه با میکروسکوپ نیروی اتمی الف) نمونه شاهد ب) ۱۵ ثانیه، ج) ۳۰ ثانیه و د) ۲ دقیقه نشان دادند که باگذشت ۱۵ ثانیه آغاز شکل‌گیری ذرات به شکل قطرات بر روی سطح صاف قابل مشاهده است. در زمان ۳۰ ثانیه ذرات با ارتفاع کمتر از ۱ میکرومتر ابعاد جانبی تقریباً برابر ۱ میکرومتر به روشنی نمایان است. با گذشت ۲ دقیقه از قرارگرفتن نمونه دربرخورد با پلاسمای گاز SO_2 ذرات با ابعاد نامبرده قابل مشاهده، تمام سطح نمونه را فرا گرفته‌اند. بنابراین باگذشت زمان تا جایی زبری سطح ابتدا کاهش می‌یابد و سپس با

شکل‌گیری ذرات روی سطح نمونه، افزایش زبری دیده می‌شود؛ ولی از یک‌زمان به بعد دوباره کاهش زبری مشاهده می‌گردد (شکل ۲).

جدول ۲- مقادیر زاویه‌ی تماس قطره آب بر روی نمونه‌های پلیمری

نمونه/ نقطه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	میانگین زاویه ترشوندگی	انحراف معیار
شاهد	۷۸	۷۸	۷۷	۷۶	۷۷	۸۲	۸۰	۷۸	۷۸	۷۷	۷۸/۱	۱/۷۳
۱۵ ثانیه	۲۰	۱۹	۱۸	۲۰	۱۹	۲۰	۱۹	۱۹	۱۸	۱۹	۱۹/۱	۰/۷۴
۳۰ ثانیه	۱۵	۱۵	۱۷	۱۶	۱۸	۱۵	۱۶	۱۶	۱۸	۱۷	۱۶/۲	۱/۰۳
۱ دقیقه	۵	۵	۴	۵	۵	۵	۴	۴	۵	۵	۴/۷	۰/۴۸
۲ دقیقه	۴	۵	۵	۴	۴	۴	۵	۴	۴	۵	۴/۴	۰/۵۲



شکل ۳- تصاویر سه‌بعدی آنالیز AFM در ابعاد ۵*۵ میکرومتر

در مجموع یافته‌های به‌دست‌آمده از آزمون زاویهٔ تماس آب نشان‌دهندهٔ افزایش چشمگیر خاصیت آب‌دوستی نمونه‌های تیمار شده با پلاسمای SO_2 است. همچنین مطالعات AFM نشان داد که پلیمر در مجموع پس از اصلاح دارای زبری بیشتری بوده است. در این راستا، و همسو با پژوهش حاضر، یافته‌های تحقیقاتی نشان داده‌اند که ارتباط مستقیم بین زبری سطح و آب‌گریزی برای نمونه‌های پلیمری اصلاح شده وجود دارد [۲۱] و براین‌اساس اصلاح سطح می‌تواند بر ویژگی آب‌دوستی مؤثر باشد. در مطالعه دیگری از لیزر – پلاسما برای اصلاح سطح پلی‌اتیلن‌ترفتالات استفاده شد و نمونه‌ها به مدت ۱ تا ۲ دقیقه با سرعت تکرار ۱۰ هرتز مورد تابش قرار گرفتند. ریخت‌شناسی سطح نمونه‌های پلیمری پس از تابش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. یافته‌ها نشان‌دهندهٔ اصلاح سطح معنادار پلیمر و تغییرات رفتار آب‌دوستی در پلیمر بود [۲۲]. از سویی، در یک پژوهش اصلاح سطح پلیمر پلی‌اتیلن‌ترفتالات توسط جت پلاسمای فشار اتمسفر با استفاده از گاز آرگون مورد بررسی قرار گرفته و طی این پژوهش نمونه‌ها با استفاده از روش روبش در برابر پساب جت پلاسما قرار داده شدند. ارزیابی ترشوندگی پلیمر نشان داد که تیمار منجر به کاهش بیش از ۴۰ درجه در زاویه تماس آب می‌شود. تغییرات در ترکیب سطح و پیوند شیمیایی توسط طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتوی ایکس و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل شده فوریه واکاوی شدند. ریخت‌شناسی سطح نمونه‌های پلیمری با میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفته و افزایش زبری پلیمر پس از تیمار نمایان شد. نتایج این مطالعه نیز موافق با یافته‌های پژوهش حاضر بود. در این راستا، پلیمر تیمار شده با پلاسما بازیابی آب‌گریز را نشان داد که نشانه‌ای از اصلاح سطح پلیمر بود [۲۳]. همچنین

مطالعات اخیر انجام‌گرفته نیز نشان داده‌اند که تیمار با پلاسما می‌تواند بر زبری پلیمر و در نتیجه بر رفتار آب‌دوستی پلیمر مؤثر باشد [۲۴،۲۵].

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه با عنوان "اصلاح سطح پلیمر PET با پلاسمای SO_2" مصوب دانشکده علوم و فناوری‌های پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات است و نویسندگان این مقاله از زحمات و پشتیبانی معاونت پژوهشی واحد، کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

منابع

1. He W, Benson R. Polymeric biomaterials. InApplied plastics engineering handbook. 2017; 145-164. William Andrew Publishing.
2. Chandy T, Das GS, Wilson RF, Rao GH. Use of plasma glow for surface-engineering biomolecules to enhance bloodcompatibility of Dacron and PTFE vascular prosthesis. Biomaterials. 2000;21(7):699-712.
3. Ratner BD. The catastrophe revisited: blood compatibility in the 21st century. Biomaterials. 2007;28(34):5144-7.
4. de Mel A, Jell G, Stevens MM, Seifalian AM. Biofunctionalization of biomaterials for accelerated in situ endothelialization: a review. Biomacromolecules. 2008;9(11):2969-79.
5. Holländer A, Kröpke S. Polymer Surface Treatment with SO_2- Containing Plasmas. Plasma Processes and Polymers. 2010;7(5):390-402.
6. Mozetič M, Primc G, Vesel A, Modic M, Junkar I, Recek N, Klanjšek-Gunde M, Guhy L, Sunkara MK, Assensio MC, Milošević S. Application of extremely non-equilibrium plasmas in the processing of nano and biomedical materials. Plasma Sources Science and Technology. 2015;24(1):015026.
7. Hiratsuka A, Fukui H, Suzuki Y, Muguruma H, Sakairi K, Matsushima T, Maruo Y, Yokoyama K. Sulphur dioxide plasma modification on poly (methyl methacrylate) for fluidic devices. Current Applied Physics. 2008;8(2):198-205.
8. Abbasi F, Mirzadeh H, Katbab AA. Modification of polysiloxane polymers for biomedical applications: a review.Polymer International. 2001; 50 (12):1279-1287.
9. Li YP, Li SY, Shi W, Lei MK. Hydrophobic over-recovery during aging of polyethylene modified by oxygen capacitively coupled radio frequency plasma: A new approach for stable superhydrophobic surface with high water adhesion. Surface and Coatings Technology. 2012;206(23):4952-8.
10. Berteau O, Mulloy B. Sulfated fucans, fresh perspectives: structures, functions, and biological properties of sulfated fucans and an overview of enzymes active toward this class of polysaccharide. Glycobiology. 2003;13(6):29R-40R.
11. Novák I, Popelka A, Valentín M, Chodák I, Špírková M, Tóth A, Kleinová A, Sedliačik J, Lehocký M, Marônek M. Surface behavior of polyamide 6 modified by barrier plasma in oxygen and nitrogen. International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2014;19(1):31-8.
12. Thompson M. Handbook of inductively coupled plasma spectrometry. Springer Science & Business Media; 2012.
13. Edelmann A, Diewok J, Baena JR, Lendl B. High-performance liquid chromatography with diamond ATR–FTIR detection for the determination of carbohydrates, alcohols and organic acids in red wine. Analytical and bioanalytical chemistry. 2003;376(1):92-7...
14. Neděla O, Slepička P, Švorčík V. Surface modification of polymer substrates for biomedical applications. Materials. 2017;10(10):1115.
15. Neděla O, Slepička P, Švorčík V. Surface Modification of Polymer Substrates for Biomedical Applications. Materials. 2017; 10(10):1115.
16. Abdulrasheed AA, Jalil AA, Triwahyono S, Zaini MAA, Gambo Y, Ibrahim M. Surface modification of activated carbon for adsorption of SO_2 and NOX: A review of existing and emerging technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018 ;94:1067-1085.
17. Holländer A, Kröpke S. Polymer Surface Treatment with SO_2- Containing Plasmas. Plasma Processes and Polymers. 2010;7(5):390-402.
18. Vesel A, Recek N, Motaln H, Mozetic M. Endothelialization of polyethylene terephthalate treated in SO_2 plasma determined

by the degree of material cytotoxicity. Plasma. 2017;1(1):12-22.
19. Maćkiw E, Mąka Ł, Ścieżyńska H, Pawlicka M, Dziadczyk P, Rżanek- Boroch Z. The Impact of Plasma- modified Films with Sulfur Dioxide, Sodium Oxide on Food Pathogenic Microorganisms. Packaging Technology and Science. 2015;28(4):285-92.
20. Xiao F, Kobayashi N, Suami A, Itaya Y. Optimizing the surface modification of cohesive polyethylene powders in a vibrated plasma-spouted bed: Exploring agglomerate size impact on coarser particle addition mechanism. Advanced Powder Technology. 2023 Dec 1;34(12):104274.
21. Ahad I, Fiedorowicz H, Budner B, Kaldonski T, Vazquez M, Bartnik A, Brabazon D. Extreme ultraviolet surface modification of polyethylene terephthalate (PET) for surface structuring and wettability control. Acta Physica Polonica A. 2016;129(2):241-3.
22. Tofil S, Kurp P, Manikandan M. Surface Laser Micropatterning of Polyethylene (PE) to Increase the Shearing Strength of Adhesive Joints. Lubricants. 2023 Aug 31;11(9):368.
23. Kostov KG, Nishime TM, Castro AH, Toth A, Hein LR. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. Applied Surface Science. 2014 Sep 30;314:367-75.
24. Martinez H, Vázquez- Vélez E, Galván-Hernández A, Radilla- Bello J, Xosocotla O, Meza AE. Atmospheric plasma treatment to improve the surface properties of P3HB coating. A study of the influence of substrate roughness. Journal of Applied Polymer Science. 2023;140(39):e54449.
25. Günther R, Caseri W, Brändli C. Application of Atmospheric-Pressure Jet Plasma in the Presence of Acrylic Acid for Joining Polymers without Adhesives. Materials. 2023;16(7):2673.