

Melt Electrospinning: An Overview on History, Methods and Applications

Polymerization

Quarterly, 2016

Volume 6, Number 2

Pages 107-115

ISSN: 2252-0449

Maryam Mashayekhi¹, Mahya Safarzadeh¹, Hamed Daemi^{2*}

1. Polymer Engineering College, Amirkabir University of Technology,
P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

2. Polyurethane Department, Faculty of Science, Iran Polymer and Petrochemical
Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 6 May 2015, Accepted: 15 July 2015

Abstract

Electrospinning has been developed as a common method to produce micro- and nanofibers in both laboratory and industrial areas due to its convenience, low cost and availability. In this method, continuous fibers are fabricated as a consequence of applying an external electrostatic field to a polymer solution or melt flow. Solvent-free melt electrospinning system has attracted interests in application fields such as solar cells, biotechnology, environment, and defense because it does not employ harmful toxic solvents. Melt electrospun fibers are larger in diameter than those obtained from solution electrospinning. In this regard, there are limited reports on the fabrication of nanofibers by melt electrospinning. With respect to the developments in fabrication of polymeric fibers used in different industries, in this study, a comprehensive literature review is presented on recent developments in melt electrospinning concerning instruments and its applications, and its differences with solution electrospinning.

Key Words

melt electrospinning,
solution electrospinning,
microfibers,
nanofibers,
tissue engineering

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: h.daemi@ippi.ac.ir

الکتروریسی مذاب: مروری بر پیشینه، روش‌ها و کاربردها

مریم مشایخی^۱، محیا صفرزاده^۱، حامد دائمی^{۲*}

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده علوم، گروه پلی‌یورتان، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۴/۲/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۲۴

الکتروریسی از روش‌های رایج تولید میکرو و نانوالیاف پلیمری است که به دلیل آسانی، هزینه کم و در دسترس بودن، در هر دو حوزه آزمایشگاهی و صنعتی به خوبی توسعه یافته است. در این روش، جریان پلیمر به حالت محلول یا مذاب در معرض میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرد که در نتیجه آن، الیافی پیوسته ایجاد می‌شود. روش الکتروریسی مذاب به دلیل نبود حلال و مشکلات سمیت حاصل از آن طی فرایند الکتروریسی، به طور گسترده برای کاربرد در حوزه‌های پیشرفته، از جمله سلول‌های خورشیدی، زیست‌فناوری، محیط زیست و دفاعی مورد توجه قرار گرفته است. الیاف به دست آمده از روش الکتروریسی مذاب در مقایسه با الکتروریسی محلول، معمولاً قطر بیشتری دارند. از این رو، مطالعات محدودی در ارتباط با تولید نانوالیاف پلیمری با روش الکتروریسی مذاب گزارش شده است. با توجه به گسترش کاربردهای روش‌های الکتروریسی به منظور تولید الیاف پلیمری برای استفاده در صنایع گوناگون و نبود گزارشی مطلوب در ارتباط با توسعه این روش‌ها، هدف از این مقاله مروری، بررسی پیشرفت‌های اخیر در هر دو زمینه دستگاهی و کاربردهای جدید روش الکتروریسی مذاب و مقایسه آن با روش الکتروریسی محلول است.

بسیار ش
فصلنامه علمی-ترویجی
سال ششم، شماره ۲
صفحه ۱۱۵-۱۰۷، ۱۳۹۵
ISSN: 2252-0449

چکیده



مریم مشایخی



محیا صفرزاده



حامد دائمی

واژگان کلیدی

الکتروریسی مذاب،
الکتروریسی محلول،
میکروالیاف،
نانوالیاف،
مهندسی بافت

مقدمه

[۳،۵،۶]، اما مشکلاتی مانند گرانروی زیاد، سخت بودن خروج هوا از مذاب، رسانایی کم، گرمای زیاد و ناتوانی در تولید الیاف در مقیاس نانو، کاربرد آن را محدود ساخته است. افزون بر این، در روش الکتروریسی مذاب به دلیل گرانروی زیاد مذاب پلیمر که به موجب آن، انرژی بیشتری برای فرایند الکتروریسی مورد نیاز است، صرفه اقتصادی روش ممکن است با چالش‌هایی روبه‌رو شود. با این حال، روش الکتروریسی مذاب برای مواردی که سمیت حلال مشکل‌آفرین است، می‌تواند بسیار مورد توجه قرار گیرد [۵،۶]. نمایی از هر یک از دو روش الکتروریسی محلول و مذاب در شکل ۱ نشان داده شده است [۷]. الکتروریسی مذاب برای نخستین بار با استفاده از مذاب پلی‌پروپیلن انجام شد [۸].

الکتروریسی

روش الکتروریسی در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌هایی همچون سادگی و امکان تولید الیافی با اندازه قابل کنترل، انباشتگی تخلخل‌ها تا حدود ۸۰٪ و ارتباط بین آن‌ها، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [۹-۱۳]. نسبت سطح به حجم و تخلخل زیاد، امکان انتقال بین‌سطحی و برهم‌کنش سطحی را فراهم می‌کند. از این ویژگی می‌توان برای کاربردهای پیشرفته نظیر کاتالیزورها و ذخیره‌گرهای انرژی و همچنین، مهندسی بافت استفاده کرد [۱۱،۱۴]. همچنین در بین روش‌های ساخت داربست مهندسی بافت، از الکتروریسی به علت امکان کنترل توپوگرافی و خواص مکانیکی داربست، به منظور ره‌ایش کنترل‌شده دارو استفاده شده است [۱۵،۱۶].

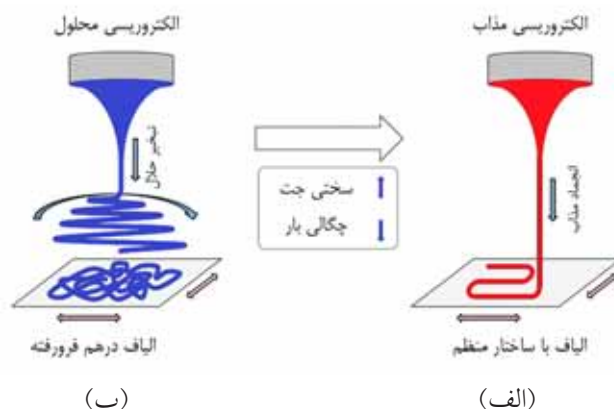
انواع الکتروریسی

روش الکتروریسی از سال ۱۹۹۰، زمانی که برای تولید الیاف پیوسته با قطر کم استفاده شد، به شدت مورد توجه قرار گرفت [۱۷]. الکتروریسی در یک دسته‌بندی کلی به دو بخش محلول و مذاب تقسیم می‌شود. الکتروریسی محلول، خود به دو شیوه الکتروریسی محلول با نازل و الکتروریسی محلول بدون نازل دسته‌بندی می‌شود. برخی از ویژگی‌های هر یک از دو روش محلول و مذاب در جدول ۱ فهرست شده است. فرایند الکتروریسی محلول را می‌توان شامل خروج محلول پلیمر از نازل به سمت جمع‌کننده و خروج حلال در این مسیر دانست.

در روش الکتروریسی محلول، یک میدان الکتریکی قوی بین پلیمر موجود در مخزن و جمع‌کننده برقرار می‌شود. در ولتاژ بحرانی، نیروی الکتریکی بر گرانروی پلیمر غلبه می‌کند و پلیمر

الکتروریسی روشی مبتنی بر قوانین جاذبه و دافعه فیزیکی است که طی آن برای تولید میکروالیاف و نانوالیاف از محلول یا مذاب پلیمری، از میدان‌های الکتریکی استفاده می‌شود [۱]. تاریخچه نخریسی الکتروستاتیک (electrostatic spinning) از محلول‌های پلیمری که امروزه الکتروریسی محلول نامیده می‌شود، به بیش از یک قرن پیش بازمی‌گردد. فرایند الکتروریسی مذاب برای نخستین بار در سال ۱۹۳۶ توسط Norton معرفی شد. اولین گزارش علمی در باره الکتروریسی نوعی مذاب پلیمر در سال ۱۹۸۱ توسط Lar-rondo و Manley منتشر شد [۲]. پیش از انتشار این گزارش‌ها پژوهشگران می‌دانستند، سیالات و محلول‌های پلیمری، قابلیت تشکیل باریکه‌های جریان پلیمر، موسوم به جت را دارند. با این وجود Larrondo نشان داد، پلیمرهای مذاب در نتیجه نیروهای الکتروستاتیکی، قابلیت کشیده شدن دارند و از معادله اثبات شده Taylor برای سایر سیالات، پیروی می‌کنند. مقاله بعدی در باره الکتروریسی مذاب، که ۲۰ سال بعد توسط Reneker منتشر شد، به الکتروریسی در خلاء پلیمرهای پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات و پلی‌اتیلن نفتالات اشاره داشت [۳،۴].

الکتروریسی به دو روش محلول و مذاب انجام می‌شود [۳،۵]. بیشتر پلیمرها قابلیت الکتروریسی به روش محلول دارند. با این وجود، روش الکتروریسی مذاب فقط برای برخی از پلیمرهای دارای مذاب پایدار گزارش شده است. از این رو، تعداد مقالات منتشر شده در زمینه الکتروریسی محلول بسیار بیشتر از مقالات منتشر شده در زمینه الکتروریسی مذاب است. اگرچه عدم انباشتگی و باقی ماندن حلال در الیاف تولید شده با روش الکتروریسی مذاب باید به شکل بالقوه موجب کاربرد گسترده این روش شود



شکل ۱- نمایی از روش‌های الکتروریسی: (الف) مذاب و (ب) محلول [۷].

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های دو روش الکتروریسی محلول و مذاب [۳،۵].

الکتروریسی مذاب	الکتروریسی محلول	ویژگی
انتقال گرما (سرمايش) بدون حلال	انتقال جرم (تبخیر حلال) معمولاً سمی (حلال‌های آلی)	نحوه تشکیل لیف پایدار حلال
دوست‌دار محیط زیست آسان	مشکل آفرین سخت	شرایط زیست محیطی امکان مدل‌سازی
بزرگ وجود دارد	کوچک وجود ندارد	اندازه لیاف محدودیت گرانبوی

فرصت‌های زیادی به وجود آورده است [۳،۲۲،۲۳]. در الکتروریسی مذاب، گرادیان دمایی بین پلیمر مایع و جمع‌کننده به وجود می‌آید. تاکنون بیش از ۱۲ پلیمر متفاوت با دماهای ذوب در محدوده 55°C تا 320°C با این روش، الکتروریسی شده‌اند. پژوهش‌های مربوط به الکتروریسی مذاب تنها ۱٪ از پژوهش‌های الکتروریسی را تشکیل می‌دهد [۲۴].

نارسانایی و گرانبوی بسیار زیاد مذاب پلیمرها، دو ویژگی مهم هستند که قابلیت آن‌ها را برای الکتروریسی تحت تأثیر قرار می‌دهند [۳۸،۲۵]. گرانبوی مذاب پلیمر با محلول پلیمر بسیار متفاوت است. بنابر تجربه، پلیمری که قابلیت الکتروریسی مذاب داشته باشد، گرانبوی در حدود $200-400 \text{ Pa.s}$ دارد. در مقابل، گرانبوی محلول پلیمر تا حدود 5 Pa.s است. مطالعات نشان می‌دهد، افزون بر گرانبوی مذاب پلیمر، شیمی فضایی گروه‌های آویزان از پیکره اصلی پلیمر نیز می‌تواند روی قطر لیاف اثرگذار باشند. این موضوع که برای پلاستیکی مانند پلی‌پروپیلن، در یک گرانبوی یکسان نمونه بی‌آرایش در مقایسه با نمونه تک‌آرایش لیافی با قطر بیشتر ایجاد می‌کند، به خوبی به اثبات رسیده است [۳].

برخلاف الکتروریسی محلول، در روش مذاب نیازی به تبخیر حلال برای جامدسازی پلیمر وجود ندارد [۵،۶،۲۲،۲۴،۲۶،۲۷]. بنابراین، فرایند یاد شده می‌تواند بدون سامانه تهویه یا حتی در محیط بسته انجام شود. الکتروریسی مذاب حتی می‌تواند در خلأ نیز انجام شود. قابلیت انجام روش الکتروریسی مذاب در محیط‌های بدون تهویه، این روش را برای پژوهش‌های مهندسی بافت و تأمین داروی حیاتی، مناسب ساخته است. متأسفانه بیشتر حلال‌هایی که در الکتروریسی محلول استفاده می‌شوند، سمی بوده و آثار نامطلوبی بر سلول‌ها دارند. از این رو به نظر می‌رسد، لیافی که از الکتروریسی مذاب به دست می‌آیند، برای تماس با سلول

به سمت جمع‌کننده هدایت می‌شود. قطر لیاف در مسیر رسیدن به جمع‌کننده کاهش می‌یابد، تا جایی که دوباره در اثر سرد شدن، گرانبوی غالب می‌شود. نیروی الکتریکی در ولتاژهای کمتر از ولتاژ بحرانی، نمی‌تواند بر کشش سطحی و نیروی الکتروستاتیک غلبه کند [۸،۱۸،۱۹]. در نتیجه دافعه بین بارهای الکتریکی در سطح آزاد پلیمر و غلبه آن بر کشش سطحی و کشسانی سیال، قطره خروجی از نازل به شکل مخروط، که به پاس تلاش‌های Taylor، مخروط Taylor نامیده می‌شود، تغییر شکل می‌یابد. اگر چگالی بار الکتریکی از آستانه بحرانی بیشتر شود، این مخروط ناپایدار شده و سیال به شکل جت، از نوک مخروط خارج می‌شود، شکل ۲ [۵،۲۰]. در سال ۱۹۹۸، گروهی از پژوهشگران انواع ویژه تشکیل جت را که از افشانش الکترویدرودینامیک به دست آمده بود، گزارش کردند. نتایج نشان داد، سیال پلیمری با توجه به شرایط فراورش می‌تواند به شکل قطره‌هایی مجزا یا جت مایع از نازل خارج شود [۲۱].

از میان روش‌های الکتروریسی، نوع محلول توجه زیادی جلب کرده است. علت اصلی آن، تولید لیاف در مقیاس میکرومتر و کمتر از آن است. با وجود کاربردهای گسترده روش الکتروریسی محلول، به دلیل سمیت و انباشتگی حلال در این روش، الکتروریسی مذاب



شکل ۲- مخروط Taylor 20 [۲۵].

مذاب، تنها یک لیف تک ایجاد می‌شود. افزایش گرانیروی مذاب پلیمر که با افزایش پایداری جت همراه است، به تولید الیافی همسان‌تر و با همگونی بیشتر می‌انجامد [۷،۳۱،۳۲]. در این روش، مذاب مشابه با سیال نارسانا، غیرفرار و گرانیرو عمل می‌کند و در نتیجه برهم‌کنش‌های الکتروستاتیک به سمت جمع‌کننده کشیده می‌شود. برخلاف روش الکتروریسی مذاب، که حفظ ساختار جت فقط با کاهش دمای الیاف در طول مسیر ریسندگی انجام می‌شود، جت‌های حاصل از الکتروریسی محلول، افزون بر کاهش دما، به تبخیر حلال نیز نیاز دارند [۳،۳۳].

دسته الیافی که از الکتروریسی محلول حاصل می‌شوند، مدول و مقاومت کششی کمتری نسبت به الیاف حاصل از روش مذاب دارند. افزون بر ویژگی‌های ذاتی، این خواص مکانیکی ضعیف را می‌توان به دو دلیل نسبت داد. برخلاف الیاف به دست آمده از روش مذاب که طول و قطر یکسانی دارند، قطر و طول الیافی که در روش محلول در جمع‌کننده جمع می‌شوند، یکسان نیست. زمانی که نمدها حاصل از این روش با آزمون کشش بررسی می‌شوند، ممکن است برخی از الیاف زودتر شکسته شوند. دلیل دوم، قرارگیری نامنظم الیاف در دسته الیاف جمع‌شده در روش محلول نسبت به روش مذاب است [۷،۳۱].

مقاله منتشر شده توسط Reneker و همکاران در باره بررسی اثر فاصله جمع‌کننده از نازل بر الگوی پخش الیاف در الکتروریسی محلول نشان داد، الگوی جمع‌آوری الیاف الکتروریسی شده در مقیاس‌های طولی متفاوت، از الگوهای جمع‌شده با گرانش مایعات گرانیروکشسان پیروی می‌کند. سیال گرانیروکشسان سطح را تحت فشار قرار می‌دهد. بنابراین، نیروی فشاری در سیال در جهت مخالف حرکت، القا می‌شود. این پدیده، احتمالاً از دلایلی است که قطر الیاف به دست آمده از الکتروریسی مذاب از الیاف به دست آمده از روش محلول همتای آن‌ها بیشتر است. افزون بر این، الیاف پلیمری حاصل از روش الکتروریسی مذاب به خاطر رسانش کم، دست‌خوش ناپایداری‌های خمیدگی قرار نمی‌گیرند. همچنین به نظر می‌رسد، از دو روش الکتروریسی مذاب و محلول می‌توان در کنار هم نیز استفاده کرد [۳].

اثر عوامل مختلف بر قطر الیاف

عواملی نظیر گرانیروی، دما، فشار، شاخص جریان مذاب، میدان الکتریکی، ولتاژ، فاصله تا جمع‌کننده، آرایش‌مندی پلیمر و وزن مولکولی بر قطر الیاف به دست آمده از الکتروریسی مذاب اثر می‌گذارند که وزن مولکولی در این بین، برجسته‌ترین عامل

بسیار مناسب‌ترند [۳،۲۲]. Karchin و همکاران با بررسی کشت و مقدار زنده‌مانی سلول‌های فیروبللاست روی داربست پلی‌یورتانی حاصل از الکتروریسی مذاب به خوبی این مطلب را نشان داده‌اند [۶]. از سوی دیگر، الیاف پلیمری حاصل از روش الکتروریسی مذاب به دلیل نبود حلال در این روش، سطحی کاملاً صاف و صیقلی و ساختار محکم‌تری نیز دارند [۸،۱۱]. صاف بودن سطح الیاف به دست آمده از الکتروریسی مذاب را می‌توان به سرد شدن سریع الیاف نسبت داد [۷]. قابل ذکر است، سطح الیاف در روش الکتروریسی محلول به علت تبخیر حلال، ناهمگون می‌شود [۸].

تفاوت‌های الکتروریسی مذاب و محلول

در دو دهه اخیر، بیشتر مطالعات الکتروریسی روی روش محلول متمرکز بوده است که مهم‌ترین دلایل آن را می‌توان، به امکان انحلال‌پذیری بیشتر پلیمرها در حلال‌های آبی و آلی، تنوع حلال‌های استفاده شده و امکان تولید الیافی با قطر کمتر از ۵۰۰ nm نسبت داد [۱۸،۲۸،۲۹]. با این وجود، برای برخی از پلیمرهای پرمصرف مانند پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن، حلال مناسب در دمای معمولی وجود ندارد. به همین خاطر، برخی از پژوهشگران به سمت الکتروریسی مذاب این پلیمرها سوق پیدا کردند. قطر الیاف حاصل از روش الکتروریسی مذاب معمولاً ۱۰ برابر قطر الیاف پلیمر مشابه آن با روش محلول است. در این راستا، پژوهشگران با روش‌های گوناگونی، مانند افزایش درجه جهت‌گیری الیاف، سعی در کاهش قطر این الیاف داشته‌اند [۲۸،۳۰].

محلول رقیق پلیمر، حاوی زنجیره‌هایی است که از یکدیگر به طور کامل مجزا بوده و نحوه پخش آن‌ها مستقل از وزن مولکولی است. درحالی‌که وضعیت این زنجیرها در مذاب پلیمر کاملاً متفاوت است و زنجیرها، گره‌خوردگی‌های شدیدی دارند. اگر گروه‌های کوچک زنجیرها به طور جدا باشند، الیاف نانومتری به دست می‌آید [۲۸،۲۹]. ولی گره‌خوردگی‌های زیاد موجود در پلیمر مذاب، این امکان را فراهم نمی‌کند [۲۸].

اگر شار جریان پلیمر به اندازه کافی زیاد بوده و ناپایداری در آن وجود نداشته باشد، سیال بدون ولتاژ اعمالی و میدان الکتریکی نیز می‌تواند جت پایدار تشکیل دهد. جت پلیمر در الکتروریسی محلول، به دلیل ناپایداری و کشیده شدن، دراز و نازک می‌شود و در نهایت می‌تواند به رشته‌های کوچکتری تبدیل شود. اگرچه قطر الیاف به دست آمده از روش محلول کمتر از الیاف حاصل از روش مذاب است، اما محدوده تغییرات قطر نیز به همان اندازه بزرگ‌تر است [۷]. از سوی دیگر، در طول فرایند الکتروریسی

محسوب می‌شود [۳۸،۱۸].

بررسی قطر الیاف به دست آمده از الکتروریسی مذاب تنها با تغییر یکی از عوامل، چالشی است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال، زمانی که همراه با پلی‌پروپیلن، از عامل شکست زنجیر استفاده می‌شود، قطر الیاف از $36 \mu\text{m}$ به 840 nm کاهش می‌یابد. از آنجا که فناوری نانو در بسیاری از کاربردها، به ویژه در نساجی و تصفیه، توجه زیادی را به خود جلب کرده است، یافتن روش مناسبی برای به دست آوردن الیافی در این مقیاس، ضروری است. ساخت نانوالیاف با روش الکتروریسی مذاب در آزمایشگاه‌های مختلف گزارش شده است. در این راستا، تهیه نانوالیافی با قطر $292 \pm 38 \text{ nm}$ و $270 \pm 100 \text{ nm}$ به ترتیب از یک جمع‌کننده تک‌نازلی و دونازلی، از جمله موفقیت‌های اخیر در زمینه تهیه نانوالیاف با روش مذاب محسوب می‌شود [۳].

مطالعات نشان می‌دهد، جمع‌آوری و تکرارپذیری الیاف به دست آمده از الکتروریسی مذاب، دارای ثبات زیادی است. با پایدارسازی سرعت جریان و برقراری تعادل دمایی در سامانه الکتروریسی مذاب میان منبع گرما، نازل و دمای هوایی که جت پلیمر از میان آن عبور می‌کند، الیاف یکنواختی تولید می‌شود. با این وجود، این موضوع به مذاب پلیمر همگن بدون حباب هوا یا حلال باقی‌مانده و توزیع یکنواخت مذاب به نازل نیاز دارد. همچنین مذاب پلیمر، به دلیل ماهیت گرانبوی برای پایدار شدن سرعت جریان به زمان کافی نیاز دارد، به ویژه زمانی که از یک نازل با قطر کوچک یا طول بلند استفاده شود [۳]. از این رو، هرچه قطر الیاف کاهش یابد، خواص مکانیکی آن‌ها به طور نمایی افزایش می‌یابد [۲۸].

به طور کلی، قطر الیاف به دست آمده از الکتروریسی مذاب خیلی بیشتر از قطر الیاف حاصل از روش الکتروریسی محلول است که دلیل آن را می‌توان به تفاوت در رسانایی مذاب، گرانبوی و نبود حلال نسبت داد. برای مثال، وقتی در محلول پلیمری شامل ۱ تا ۱۰ درصد وزنی پلیمر و ۹۰ تا ۹۹ درصد حلال، این مقدار زیاد حلال تبخیر می‌شود، اثر بسزایی روی قطر الیاف دارد. در حالی که در روش الکتروریسی مذاب ۱۰۰ درصد موادی که از نازل خارج می‌شوند، به جمع‌کننده می‌رسند [۲۶].

کاربردها

نانوالیاف ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر نسبت سطح به حجم زیاد، خواص مکانیکی مطلوب و انعطاف‌پذیری در گروه‌های سطحی دارند. این ویژگی‌ها موجب می‌شود، از آن‌ها در حمل مواد دارویی، غشاهای جداکننده و نوری، لباس‌های محافظ و مواد

تقویت‌کننده استفاده شود [۷،۲۷].

پژوهشگران در تلاش‌اند تا با توسعه روش‌هایی کارا تر از الکتروریسی ساده، نه تنها محدودیت‌های فعلی این روش را مرتفع سازند، بلکه به سامانه‌های عاری از حلال دست یابند تا هزینه‌ها را کاهش دهند. زیرا در این حالت، افزون بر حذف حلال گران‌قیمت، به ابزارهای تهویه نیز نیازی نیست. همان‌طور که اشاره شد، روش الکتروریسی مذاب، به علت نبود حلال سمی در این سامانه، مورد توجه کاربردهای زیست‌پزشکی قرار گرفته است. با این وجود برخی از پلیمرها، به ویژه پلیمرهای استخراجی از منابع زیستی، که دمای ذوب کم دارند و با افزایش دما، امکان تخریب آن‌ها وجود دارد، در حالت خالص برای الکتروریسی مذاب قابل استفاده نیستند. بیشترین دمایی که تاکنون در الکتروریسی مذاب گزارش شده است، 410°C برای پلی‌پروپیلن بوده است [۳].

صنایع نساجی

از کاربردهای تجاری الیاف الکتروریسی شده، منسوجات تنفس‌پذیر است. در این نوع منسوجات، بخار آب از پارچه عبور می‌کند، در حالی که مانع از عبور آب در حالت مایع می‌شود. این پدیده، به ویژه از سوی کارگرانی که به محافظت از مواد شیمیایی نیاز دارند، مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، Li و همکاران به پارچه‌های پلی‌پروپیلنی با قابلیت سدگری زیاد دست یافتند که پیش از آن با سایر روش‌های فراورش به دست نیامده بودند. نانوالیاف ساخته شده با این روش، به دلیل افزایش مساحت سطح به همراه انعطاف‌پذیری و مقاومت جهت‌دار بسیار زیاد، در صنایع گوناگون از جمله البسه، تقویت‌کننده‌های ساختارهای هوافضایی و غیره، کاربردهای متنوعی یافته‌اند [۳،۲۷].

دانش زیست‌پزشکی

روش الکتروریسی به دلیل قابلیت تقلید هندسه و توپولوژی ساختار ماتریس بین سلولی، برای ساخت نمدهای مهندسی بافت استفاده شده است. هدف ابتدایی در مهندسی بافت، ترکیب یک نم‌د با سلول‌های زنده یا مولکول‌های فعال زیستی برای بازسازی بافت است. ساختارهایی که برای بازسازی بافت استفاده می‌شوند، می‌توانند به چسبندگی، ازدیاد و مهاجرت سلولی کمک کنند [۳،۱۱،۲۲].

قطر الیاف حاصل از الکتروریسی بر ویژگی‌های فیزیکی یک نم‌د، مانند مقدار و اندازه تخلخل و مساحت سطح الیاف اثر می‌گذارد [۹،۳۴،۳۵]. برای کاربردهای مهندسی بافت، معمولاً

مواد آبرگیز به خوبی بررسی شده است. الکتروریسی پلی پروپیلن که ماهیتی آبرگیز دارد، روش تک مرحله‌ای و ساده برای تولید سطوح بسیار آبرگیز است [۳۷]. گروهی از پژوهشگران، ویژگی فوق‌آبرگری پلی (استیرن-بلوک-دی‌متیل سیلوکسان) را مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند، این ویژگی می‌تواند به آثار ترکیبی سطح غنی-شده از سیلوکسان و زبری سطح شبکه لیفی نسبت داده شود [۳۸،۳۹]. گروه دیگری نیز روش‌های الکتروریسی و رسوب‌گیری اولیه بخار شیمیایی را ترکیب کردند تا سطح ابرآبرگیز پلی‌کاپرولاکتون پوشش یافته با پرفلوئوروآلکیل متاکریلات پلیمر شده تولید کنند [۴۰].

تصفیه

برای کاربردهای تصفیه، به بستری با مقاومت مکانیکی زیاد نیاز است که با تولید لیاف با قطر کم و تهیه ورقه‌های غشای نازک به دست می‌آید. در این زمینه، مهم‌ترین چالش‌ها متوجه تولید انبوه نانوالیاف و صرفه اقتصادی آن از یک سو و مسئولیت سنگین محیط‌زیست برای کاهش آلاینده‌ها از سوی دیگر است [۳]. تصفیه هوا در کارخانه‌های صنعتی، اداره‌ها و اتاق عمل برای محافظت افراد، امری ضروری است. تصفیه به منظور پاک‌سازی هوا از ذرات جامد (ویروس، گرد و غبار) و مایع (دود، بخار آب و حلال‌های شیمیایی) استفاده می‌شود. لیاف الکتروریسی شده با روش مذاب به عنوان میکروفیلترها کاربرد گسترده‌ای دارند [۲۹،۳۰]. از سایر کاربردهای زیست‌محیطی، می‌توان به استفاده در حسگرهای زیستی و شیمیایی، حذف فلزات سنگین، غشاهای تبادل یون و جاذب‌های صدا اشاره کرد [۲۷،۲۹].

کاربردهای کامپوزیتی

استفاده از میکروالیاف پلیمری به عنوان جزء تقویت‌کننده در صنعت کامپوزیت از دیرباز مورد توجه بوده است. نقش این لیاف، تحمل بار و افزایش خواص مکانیکی نظیر مدول و استحکام کششی است. به دلیل مساحت سطح ویژه بسیار زیاد، کاربرد ویژه‌ای از نانوالیاف در صنعت کامپوزیت انتظار می‌رود. با این وجود، مطالعات چندانی در این زمینه انجام نشده است. دلایل متعددی برای این موضوع می‌توان ذکر کرد. در درجه نخست، نمی‌توان مقدار کافی از نانوالیاف پیوسته و تک‌جهتی تولید کرد. از این رو، نمدهای بافته‌نشده با آرایش تصادفی لیاف که با فرایند الکتروریسی به دست می‌آیند، نمی‌توانند خواص مکانیکی را به طور قابل ملاحظه‌ای تقویت کنند. به عنوان دلیل دوم می‌توان به این نکته اشاره کرد،

شبکه‌های سه‌بعدی از پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر تهیه می‌شود و پس از بارگذاری سلول، عامل رشد یا سایر ترکیبات زیستی مد نظر، داربست نهایی مورد بررسی‌های بیشتر قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی داربست، می‌تواند بسته به محل استفاده، در طیف وسیعی تغییر یابد. ابعاد بهینه لیف نیز بسته به نظر پژوهشگران می‌تواند در محدوده ۳۰۰ nm تا ۵۰ μm تنظیم شود [۳].

از دیگر کاربردهای لیاف حاصل از الکتروریسی در علم پزشکی، می‌توان به ره‌ایش دارو اشاره کرد. امروزه، مسیر دهانی از پرمصرف‌ترین مسیرهای دارورسانی تلقی می‌شود. اگرچه پس از بلع، مقداری از دارو به نواحی آسیب‌دیده می‌رسد، با این وجود به دلیل توزیع دارو بین نواحی سالم و آسیب‌دیده، دارو به مقدار کافی به ناحیه آسیب‌دیده نمی‌رسد. از این رو، بیمار باید مقدار بیشتری از دارو را مصرف کند که این موضوع می‌تواند آثار جانبی متعددی به همراه داشته باشد. با توجه به جذب کارا تر و هدمندتر دارو به حالت موضعی، سامانه‌های انتقال دارو از داربست‌های نانو و میکروالیاف پلیمری در سالیان اخیر اهمیت زیادی یافته‌اند. بر این اساس، دارو و ماده پلیمری حامل می‌توانند با یکدیگر مخلوط شوند و با الکتروریسی، نانو ساختارهای هوشمند دارویی را ایجاد کنند [۱۹،۳۶].

همچنین از داربست‌های حاصل از الکتروریسی مذاب برای کشت سلول استفاده می‌شود. اخیراً سلول‌های بنیادی جنینی (embryonic stem cells) روی داربست حاصل از الکتروریسی مذاب پلی‌کاپرولاکتون کشت شده‌اند. با تغییر عوامل مربوط به فرایند الکتروریسی، امکان دست‌یابی به خواص مکانیکی متفاوت و پایداری طولانی‌مدت در محیط بدن فراهم شده است [۱۵]. از سایر کاربردهای بهداشتی این لیاف می‌توان به استفاده در زخم‌پوش‌ها، سامانه‌های کنترل‌شده ره‌ایش و تحویل دارو، فیلترها، تجهیزات و کاشتنی‌های پزشکی، ماسک‌های بهداشتی و ابرجاذب‌ها اشاره کرد [۸].

سطوح بسیار آب‌گریز

قابلیت ترشوندگی یک فیلم با توجه به نظریه زبری، به انرژی سطحی و زبری سطح بستگی دارد. ویژگی فوق‌آبرگری می‌تواند با ایجاد زبری در مقیاس میکرومتر یا کمتر از آن روی سطوح ذاتاً آبرگیز، حاصل شود. الکتروریسی می‌تواند زبری مطلوب را در این مقیاس تکرار کند، بنابراین روش مطلوبی را برای ایجاد این ویژگی در مواد مختلف مهیا سازد. در مقایسه با روش ساده الکتروریسی، روش‌های پیچیده‌ای وجود دارند که شامل تهیه مواد آبرگیز یا ایجاد پوشش‌های آبرگیزند. ترکیب روش‌های الکتروریسی و پوشش‌دهی

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تاریخچه پیدایش روش الکتروریسی مذاب و تفاوت‌های آن با الکتروریسی محلول به همراه کاربردهای اصلی الکتروریسی مذاب بیان شد. با وجود برخی معایب روش الکتروریسی مذاب از دیدگاه فرایندی باید بیان داشت، در کاربردهایی که تجمع حلال (مانند کاربردهای صنعتی) یا سمیت (مثل سامانه‌های زیستی) مشکل جدی به حساب می‌آیند، روش مذاب می‌تواند به عنوان روشی مؤثر استفاده شود. افزون بر این، از روش الکتروریسی مذاب پلیمر در برخی موارد می‌تواند الیافی با کیفیت بهتر از الیاف روش الکتروریسی محلول حاصل شود.

پلیمرهایی که برای تولید نانوالیاف استفاده می‌شوند، ذاتاً خواص مناسبی برای بهبود کامپوزیت ندارند. از این رو، مطالعات در این زمینه کاری ضروری است [۲۹].

کاربردهای الیاف الکتروریسی شده به موارد یاد شده محدود نمی‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از این الیاف در صنایع مختلف نظامی، دفاعی، امنیتی و تولید و ذخیره انرژی مانند پیل‌های خورشیدی و سوختی، ذخیره‌سازی هیدروژن، باتری‌های پلیمری و ابرخازن‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۱۱، ۱۴، ۲۷]. افزون بر پوشش‌های محافظ، الیاف پلی‌پروپیلن الکتروریسی شده به علت نسبت سطح به حجم زیاد و منفذهای ریز ایجاد شده با الیاف، ممکن است در کاربردهای دیگری نظیر تفکیک‌کننده باتری نیز استفاده شوند [۳۷].

مراجع

- Pimenta A.F.R., Baptista A.C., Carvalho T., Brogueira P., Lourenço N.M.T., Afonso C.A.M., Barreiros S., Vidinha P., and Borges J.P., Electrospinning of Ion Jelly Fibers, *Mater. Lett.*, **83**, 161-164, 2012.
- Larrondo L. and St John Manley R., Electrostatic Fiber Spinning from Polymer Melts. I. Experimental Observations on Fiber Formation and Properties, *J. Polym. Sci., Pol. Phys.*, **19**, 909-920, 1981.
- Hutmacher D.W. and Dalton P.D., Melt Electrospinning, *Chem. Asian J.*, **6**, 44-56, 2011.
- Lee S. and Obendorf S.K., Developing Protective Textile Materials as Barriers to Liquid Penetration Using Melt-Electrospinning, *J. Appl. Polym. Sci.*, **102**, 3430-3437, 2006.
- Ko J., Kan D., and Jun M.B., Combining Melt Electrospinning and Particulate Leaching for Fabrication of Porous Microfibers, *Manuf. Lett.*, **3**, 5-8, 2015.
- Karchin A., Simonovsky F.I., Ratner B.D., and Sanders J.E., Melt Electrospinning of Biodegradable Polyurethane Scaffolds, *Acta Biomater.*, **7**, 3277-3284, 2011.
- Hochleitner G., Jüngst T., Brown T.D., Hahn K., Moseke C., Jakob F., Dalton P.D., and Groll J., Additive Manufacturing of Scaffolds with Sub-Micron Filaments via Melt Electrospinning Writing, *Biofabrication*, **7**, 35002, 2015.
- Lyons J., Li C., and Ko F., Melt-Electrospinning Part I: Processing Parameters and Geometric Properties, *Polymer*, **45**, 7597-7603, 2004.
- Olivas-Armendariz I., García-Casillas P., Estrada A.M., Martínez-Villafañe A., de la Rosa L.A.A., and Martínez-Pérez C.A., In Vitro Evaluation of Polyurethane-Chitosan Scaffolds for Tissue Engineering, *J. Biomat. Nanobiotech.*, **3**, 440-445, 2012.
- Tully-Dartez S., Cardenas H.E., and Sit P.F.S., Pore Characteristics of Chitosan Scaffolds Studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy, *Tissue Eng. Part C: Methods*, **16**, 339-345, 2009.
- Zhong S., Zhang Y. and Lim C.T., Fabrication of Large Pores in Electrospun Nanofibrous Scaffolds for Cellular Infiltration: A Review, *Tissue Eng. Part B: Rev.*, **18**, 77-87, 2011.
- Panzavolta S., Gioffrè M., Focarete L.M., Gualandi C., Foroni L., and Bigi A., Electrospun Gelatin Nanofibers: Optimization of Genipin Cross-Linking to Preserve Fiber Morphology after Exposure to Water, *Acta Biomater.*, **7**, 1702-1709, 2011.
- Jayakumar R., Prabakaran M., Sudheesh Kumar P.T., Nair S.V., and Tamura H., Biomaterials Based on Chitin and Chitosan in Wound Dressing Applications, *Biotech. Adv.*, **29**, 322-337, 2011.
- Boateng J.S., Matthews K.H., Stevens H.N., and Eccleston G.M., Wound Healing Dressings and Drug Delivery Systems: A Review, *J. Pharm. Sci.*, **97**, 2892-2923, 2008.
- Ko J., Khadem Mohtaram N., Ahmed F., Montgomery A.,

- Carlson M., Lee P.C.D., Willerth S.M., and Jun M.B.G., Fabrication of Poly(ϵ -Caprolactone) Microfiber Scaffolds with Varying Topography and Mechanical Properties for Stem Cell-Based Tissue Engineering Applications, *J. Biomater. Sci., Polym. Ed.*, **25**, 1-17, 2014.
16. Reneker D.H. and Yarin A.L., Electrospinning Jets and Polymer Nanofibers, *Polymer*, **49**, 2387-2425, 2008.
17. Rutledge G.C. and Fridrikh S.V., Formation of Fibers by Electrospinning, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, **59**, 1384-1391, 2007.
18. Hochleitner G., Hümmer J.F., Luxenhofer R., and Groll J., High Definition Fibrous Poly(2-Ethyl-2-Oxazoline) Scaffolds through Melt Electrospinning Writing, *Polymer*, **55**, 5017-5023, 2014.
19. Ratner B.D., Hoffman A.S., Schoen F.J., and Lemons J.E., *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*, 2nd ed., Academic, 2004.
20. Dalton P.D., Grafahrend D., Klinkhammer K., Klee D., and Möller M., Electrospinning of Polymer Melts: Phenomenological Observations, *Polymer*, **48**, 6823-6833, 2007.
21. Lyons J. and Ko F., Melt Electrospinning of Polymers: A Review, *Polym. News*, **30**, 170-178, 2005.
22. Kong C.S., Jo K.J., Jo N.K., and Kim H.S., *Effects of The Spin Line Temperature Profile and Melt Index of Poly(Propylene) on Melt-Electrospinning*, Technical Report, 2009.
23. Reneker D., Kataphinana W., Theron A., Zussman E., and Yarin A.L., Nanofiber Garlands of Polycaprolactone by Electrospinning, *Polymer*, **43**, 6785-6794, 2002.
24. Li X., Liu H., Wang J., and Li C., Preparation and Characterization of Poly(ϵ -Caprolactone) Nonwoven Mats via Melt Electrospinning, *Polymer*, **53**, 248-253, 2012.
25. Muerza-Cascante M.L., Haylock D., Hutmacher D.W., and Dalton P.D., Melt Electrospinning and Its Technologization in Tissue Engineering, *Tissue Eng., Part B: Rev.*, **21**, 187-202, 2014.
26. Detta N. et al., Melt Electrospinning of Polycaprolactone and Its Blends with Poly(ethylene glycol), *Polym. Int.*, **59**, 1558-1562, 2010.
27. Li X., Wang Z., Wang J., Liu J., and Li C., Preparation and Properties of TPU Micro/Nanofibers by A Laser Melt-Electrospinning System, *Polym. Eng. Sci.*, **54**, 1412-1417, 2014.
28. Lyons J.M., *Melt-Electrospinning of Thermoplastic Polymers: An Experimental and Theoretical Analysis*, Ph.D. Thesis, Drexel University, October 2004.
29. Bhardwaj N. and Kundu S.C., Electrospinning: A Fascinating Fiber Fabrication Technique, *Biotech. Adv.*, **28**, 325-347, 2010.
30. Li X., Zhang Y., Li H., Chen H., Ding Y., and Yang W., Effect of Oriented Fiber Membrane Fabricated via Needleless Melt Electrospinning on Water Filtration Efficiency, *Desalination*, **344**, 266-273, 2014.
31. Zhou H., Green T.B., and Joo Y.L., The Thermal Effects on Electrospinning of Polylactic Acid Melts, *Polymer*, **47**, 7497-7505, 2006.
32. McCann J.T., Marquez M., and Xia Y., Melt Coaxial Electrospinning: A Versatile Method for The Encapsulation of Solid Materials and Fabrication of Phase Change Nanofibers, *Nano Lett.*, **6**, 2868-2872, 2006.
33. Dalton P.D., Joergensen N.T., Groll J., and Moeller M., Patterned Melt Electrospun Substrates for Tissue Engineering, *Biomed. Mater.*, **3**, 1-11, 2008.
34. Li X., Liu H., Wang J., and Li C., Preparation and Characterization of PLLA/nHA Nonwoven Mats via Laser Melt Electrospinning, *Mater. Lett.*, **73**, 103-106, 2012.
35. Dutta P.K., Dutta J., and Tripathi V., Chitin and Chitosan: Chemistry, Properties and Applications, *J. Sci. Ind. Res.*, **63**, 20-31, 2004.
36. Sill T.J. and von Recum H.A., Electrospinning: Applications in Drug Delivery and Tissue Engineering, *Biomaterials*, **29**, 1989-2006, 2008.
37. Cho D., Zhou H., Cho Y., Audus D., and Joo Y.L., Structural Properties and Superhydrophobicity of Electrospun Polypropylene Fibers from Solution and Melt, *Polymer*, **51**, 6005-6012, 2010.
38. Ma M., Hill R.M., Lowery J.L., Fridrikh S.V., and Rutledge G.C., Electrospun Poly(Styrene-Block-Dimethylsiloxane) Block Copolymer Fibers Exhibiting Superhydrophobicity, *Langmuir*, **21**, 5549-5554, 2005.
39. Singh A., Steely L., and Allcock H.R., Poly[Bis(2,2,2-Trifluoroethoxy) Phosphazene] Superhydrophobic Nanofibers, *Langmuir*, **21**, 11604-11607, 2005.
40. Ma M., Mao Y., Gupta M., Gleason K.K., and Rutledge G.C., Superhydrophobic Fabrics Produced by Electrospinning and Chemical Vapor Deposition, *Macromolecules*, **38**, 9742-9748, 2005.