

Effect of Nanoclay on the Electrospinning of Poly(ϵ -caprolactone)

Mahsa Rostamloo, Mehdi Nouri*, and Javad Mokhtari

Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan,
P.O. Box: 3756, Rasht, Iran

Received 9 March 2011, accepted 7 September 2011

ABSTRACT

Nanofiber mats of poly(ϵ -caprolactone)/nanoclay nanocomposites were fabricated by electrospinning. The effects of the solution concentration and the nanoclay content of nanocomposite materials on the final nanofiber structure were investigated. Morphology and diameter of the nanofibers were studied using optical and scanning electron microscope. It was observed that the poly(ϵ -caprolactone) at concentration of 5% to 8% could be electrospun into the fibrous structure. The results showed that the presence of the nanoclay promoted the creation of fibrous structures in comparison with the poly(ϵ -caprolactone) without nanoclay. On the other hand, increasing the nanoclay content resulted in a lower average fiber diameter. Shear viscosity and conductivity of the solutions were also reported. The presence of nanoclay increased conductivity and shear viscosity of the solutions. Formation of the nanofibers and decrease in their diameters are discussed on the basis of shear viscosity and conductivity of electrospun solution. This electrospun nanofiber could be used for tissue engineering application.

Key Words:

poly(ϵ -caprolactone),
nanoclay,
electrospinning,
nanofiber, scaffold

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mnouri69@guilan.ac.ir

اثر استفاده از نانوخاک رس در الکتروریسی پلی اتاکاپرولاکتون

مهسا رستمی، مهدی نوری*، جواد مختاری

رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده فنی، گروه مهندسی نساجی، صندوق پستی ۳۷۵۶

دریافت: ۸۹/۱۲/۱۸، پذیرش: ۹۰/۶/۱۶

چکیده

نانوکامپوزیت لیفی شکل از مخلوط پلی اتاکاپرولاکتون و نانوخاک رس کلویزیت 30B به کمک فرایند الکتروریسی تهیه شد. پس از تهیه لایه‌های نانولیفی از پلی اتاکاپرولاکتون خالص و نانوکامپوزیت پلی اتاکاپرولاکتون نانوخاک رس، اثر غلظت محلول پلیمری و درصد وزنی نانوخاک رس مورد استفاده، بر ساختار نهایی نانوالیاف تشکیل شده بررسی شد. شکل‌شناسی و قطر نانوالیاف حاصل به وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی پویشی مطالعه شد. مشاهده شد، محلول ۴٪ وزنی پلی اتاکاپرولاکتون خالص افشانده شده و طی فرایند الکتروریسی هیچ لیفی در محدوده ولتاژ اعمال شده تولید نشده است. این در حالی است که در غلظت‌های بیش از ۸٪ امکان الکتروریسی وجود نداشت. همچنین نتایج نشان داد، وجود پرکننده‌های معدنی نانوخاک رس، سبب تشکیل الیاف با نقص ساختاری کمتر شده است. در ساختار الیاف الکتروریسی شده پلی کاپرولاکتون خالص دانه‌هایی وجود دارد. اما، با افزودن نانوخاک رس دانه‌های کمتر و ساختار لیفی بسیار بهتری در محتوای رسی ۱، ۳ و ۵٪ وزنی در نانوکامپوزیت‌ها تشکیل می‌شود، به طوری که ساختار یکنواخت‌تری در محتوای رسی ۹ و ۱۵٪ وزنی مشاهده شد. از طرف دیگر، وجود نانوخاک رس سبب شده است که میانگین قطری نانوالیاف کاهش یابد. گرانیوی و رسانایی محلول‌های تهیه شده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، با افزایش غلظت پلی کاپرولاکتون و مقدار نانوخاک رس، گرانیوی محلول پلی کاپرولاکتون افزایش می‌یابد. این در حالی است که وجود نانوخاک رس سبب افزایش رسانایی محلول می‌شود که کشیدگی محلول را حین ریسندگی افزایش داده و الیاف یکنواخت‌تر با دانه کمتر را در یک فرایند الکتروریسی نتیجه می‌دهد. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری گرانیوی و رسانایی محلول‌های ریسندگی، دلیل تغییر در شکل و قطر نانوالیاف تشکیل شده توضیح داده شده است. این نانوالیاف می‌تواند کاربرد گسترده‌ای در مهندسی بافت داشته باشند.

واژه‌های کلیدی

پلی اتاکاپرولاکتون،
نانوخاک رس،
الکتروریسی،
نانوالیاف، داربست

مقدمه

مهندسی بافت زمینه‌ای جدید و روشی نویدبخش برای بازسازی بافت‌های آسیب دیده ارایه کرده است. هدف عمده مهندسی بافت گرفتن سلول از یک نمونه کوچک بافت و رشد و توسعه آن در خارج بدن و در نهایت انتقال آن به داخل بدن است [۱،۲]. با توجه به این که اندازه بیشتر اجزای موجود در ماتریس خارج سلولی مانند حفره‌ها و قطر الیاف تشکیل دهنده آنها در حد نانومتر است، در سال‌های اخیر کاربرد نانوالیاف در مهندسی بافت بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۳،۴]. برای تولید الیاف در مقیاس نانو روش‌های متعددی از قبیل سنتز در قالب، کشش، جداسازی فاز، خوداتصال و الکتروریسی برای تولید وب نانوالیاف وجود دارد. در میان این روش‌ها، الکتروریسی به دلیل کنترل پذیری و نیز تکرارپذیری و مقرون به صرفه بودن اهمیت بیشتری دارد [۵].

یکی دیگر از مزایای روش الکتروریسی این است که قطر الیاف و نحوه قرارگیری و آرایش الیاف به مقدار زیادی قابل کنترل است و با تغییر مشخصه‌ها، فرایند کنترل می‌شود [۶]. فرایند الکتروریسی، نحوه تشکیل الیاف در این فرایند و اثر عوامل مؤثر بر تشکیل الیاف توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده که به برخی از آنها در مراجع اشاره شده است [۹-۵].

مواد مورد استفاده در تهیه لایه نانوالیاف مناسب برای مهندسی بافت می‌توانند طبیعی یا مصنوعی باشند. در این راستا پلی‌لاکتیداسید [۱۰،۱۱]، پلی‌گلیکولیک‌اسید و کopolymerهای آن [۱۲]، پلی‌هیدروکسی بوتیرات [۱۳] و پلی‌کاپرولاکتون [۱۴] و هم‌چنین الکتروریسی زیست‌پلیمرهای طبیعی مانند ابریشم [۱۵]، سلولوز [۱۶]، کیتین [۱۷] و کلاژن [۱۸] بررسی شده است.

مواد مصنوعی استفاده شده در داربست‌ها شامل پلیمرهای تخریب‌پذیر به وسیله بدن و ژل‌ها هستند. این مواد مصنوعی مزایای زیادی از قبیل خواص مکانیکی خوب، تخریب‌پذیری در محیط‌های زیستی و زیست‌سازگاری را در این محیط‌ها دارند. در این میان پلی‌اتاکپرولاکتون به علت خواص فیزیکی عالی، در دسترس بودن و زیست‌سازگاری، به عنوان ماده‌ای مناسب برای مصارف پزشکی مورد توجه بوده است [۹،۱۴]. پلی‌کاپرولاکتون پلی‌استری آلیفاتیک، نیمه بلوری و آب‌گریز است که به وسیله ریز موجودات به آرامی در محیط تخریب می‌شود. از جمله ترکیباتی که می‌تواند در بهبود خواص این پلیمر استفاده شود، نانوخاک رس‌ها هستند [۱۹].

پلی‌استرهای زیست‌تخریب‌پذیر، از جمله پلی‌کاپرولاکتون و نانوکامپوزیت‌های آن با نانوخاک رس در مقاله‌ای مروری بررسی شده و به عنوان ترکیبات زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر

برای کاربردهای پزشکی معرفی شده‌اند [۲۰]. نانوخاک رس‌ها، سیلیکات‌های لایه‌ای اصلاح شده‌ای هستند که در ساختار پلیمرها و مونومرها استفاده می‌شوند. متداول‌ترین سیلیکات لایه‌ای مونت‌موریلونیت با شبکه بلوری دوبعدی است که از لایه‌هایی با ضخامت ۱ nm تشکیل شده است [۲۱]. این لایه‌ها شامل دو صفحه چهاروجهی سیلیکای پیوندخورده به یک صفحه میانی هشت‌وجهی آلومینا هستند. تاکنون سیلیکات‌های لایه‌ای اصلاح شده بسیاری تولید شده‌اند که با شرکت در ساختار مواد بهبود خواصی چون سختی، استحکام کششی و مدول کششی را موجب شده‌اند [۲۳-۲۰].

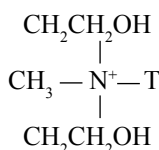
الکتروریسی پلی‌کاپرولاکتون و نانوخاک رس [۱۹] و هم‌چنین نانوکامپوزیت‌هایی از این آمیخته تاکنون گزارش شده است [۱۹،۲۴]. الیاف بدون نقص تهیه شده به روش الکتروریسی از مخلوط پلی‌کاپرولاکتون و نانوخاک رس [۱۹] دارای میانگین قطر بیش از ۵۰۰ nm بوده است که به سختی می‌توان آن را به عنوان نانوالیاف شناخت.

در این مقاله با استفاده از گونه‌ای متفاوت از نانوخاک رس و غلظت متفاوتی از پلیمر، ضمن مطالعه رفتار محلول الکتروریسی، امکان تهیه الیاف ظریف‌تر بررسی و گزارش شده است.

تجربی

مواد

پلی‌اتاکپرولاکتون با وزن مولکولی متوسط عددی ۷۰-۹۰ kDa از شرکت Aldrich تهیه شده است. حلال مورد استفاده دی‌کلرومتان با خلوص بیش از ۹۹/۹٪ از شرکت Merck خریداری شده است. مونت‌موریلونیت اصلاح شده آلی مورد استفاده، کلویزیت 30B (Cloisite 30B) از شرکت Southern Clay، دارای یون اصلاح کننده، methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium با غلظت ۹۰ meq/۱۰۰ g clay است. طرح ۱ ساختار مولکولی یون



T = Tallow (~۶۵ C18, ~۳۰ C16, ~۵ C14)

طرح ۱ - ساختار مولکولی یون اصلاح کننده کلویزیت 30B [۲۵].

Microphot FAX ساخت شرکت Nikon ژاپن مجهز به دوربین رقمی Nikon استفاده شد. دستگاه SEM مدل XL30 ساخت شرکت Philips هلند، برای مشاهده شکل نانوالیاف و تعیین میانگین قطری آنها استفاده شده است.

روش‌ها

تهیه محلول ریستدگی

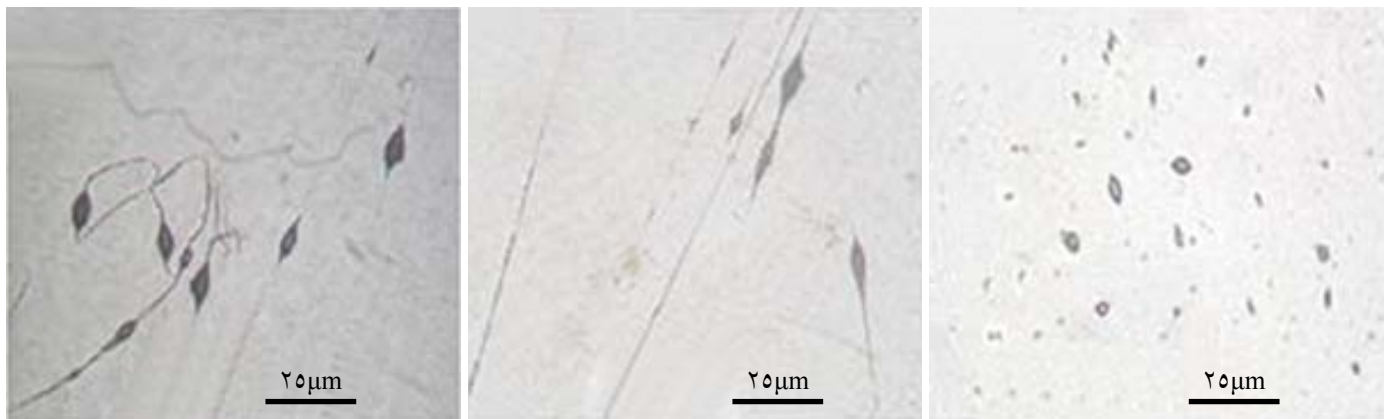
دو دسته محلول در فرایند الکتروریسی استفاده شدند: دسته ۱- محلول‌هایی با غلظت‌های ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴٪ (w/w) پلی اتاکاپرولاکتون در دی کلرومتان تهیه شد. این محلول‌ها خالص و فاقد نانوخاک رس بودند. دسته ۲- به محلول با غلظت ۵٪ پلی اتاکاپرولاکتون، نانوخاک رس با نسبت ۱، ۳، ۵، ۹ و ۱۵٪ (w/w) افزوده شد. به این منظور ابتدا نانوخاک رس با درصد مشخص در دی کلرومتان با استفاده از دستگاه

اصلاح کننده نانوخاک رس مورد استفاده را نشان می‌دهد.

دستگاه‌ها

دستگاه الکتروریسی استفاده شده متشکل از منبع تولید ولتاژ زیاد Gamma High Voltage Research (USA) و پمپ تزریق Pump systems New Era (USA) است. گرانیوی محلول‌های حاصل به وسیله گرانیوی سنج Brookfield مدل DV II programable ساخت کشور آمریکا اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری رسانایی محلول از دستگاه Sartorius مدل PP 20 و سلول مخصوص رسانایی استفاده شده است. دستگاه فراصوت همگن‌ساز مدل Sonopuls ساخت شرکت Bandelin (Germany) مجهز به کاونده سرامیکی با قدرت ۱۰/۰۷ kJ و بسامد ۶۰/۵۰ Hz برای پراکنش نانوخاک رس در حلال به کار گرفته شده است.

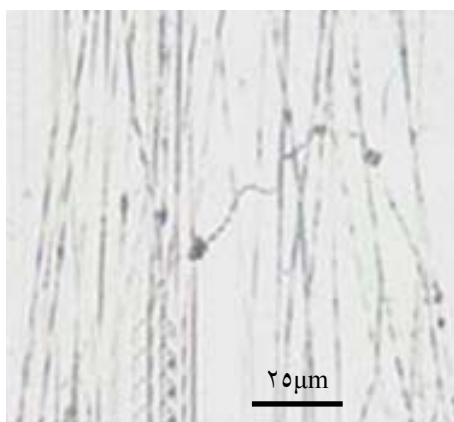
برای بررسی تشکیل الیاف از میکروسکوپ نوری، مدل



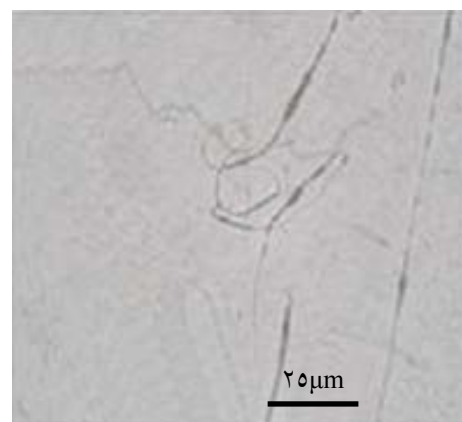
(ج)

(ب)

(الف)



(د)



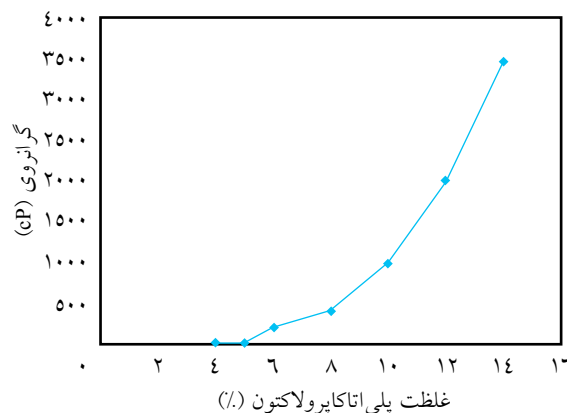
(ه)

شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ نوری از قطره‌های پراکنده شده و الیاف الکتروریسی شده (ولتاژ الکتروریسی ۱۵ kV بوده است) پلی اتاکاپرولاکتون با غلظت‌های مختلف: (الف) ۴٪، (ب) ۵٪، (ج) ۶٪، (د) ۷٪ و (ه) ۸٪.

۵، ۶، ۷ و ۸٪ امکان پذیر است. محلول ۴٪ وزنی افزایش شده و طی فرایند الکتروریسی هیچ نوع لیفی تولید نمی شود. این در حالی است که در غلظت های بیش از ۸٪ امکان الکتروریسی وجود نداشت. تشکیل الیاف در فرایند الکتروریسی به ویژگی های محلول ارتباط دارد [۵]. برای بررسی این موضوع گرانروی و رسانایی محلول های الکتروریسی در دمای ۲۲°C اندازه گیری شد. نتایج حاصل برای اندازه گیری گرانروی و رسانایی به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۲، با افزایش غلظت، گرانروی محلول پلی کاپرولاکتون افزایش می یابد. یکی از شرایط لازم برای الکتروریسی گرانروی مناسب محلول است. در گرانروی های کم، مولکول های حلال بیشتر از مولکول های پلیمر است، در نتیجه درگیری های زنجیری کمتر و امکان تشکیل جریان شتاب دار پیوسته فراهم نمی شود. زیرا، وقتی جریان باریک و پرشتاب پلیمری از نوک سوزن خارج می شود، به طور هم زمان کشیده می شود. در حین کشش محلول پلیمری، درهم رفتگی زنجیرهای مولکولی از قطع شدن جریان پلیمری جلوگیری می کند که در گرانروی کم این اتفاق روی نمی دهد [۵]. بنابراین، عدم تشکیل نانوالیاف در غلظت ۴٪ به دلیل کم بودن گرانروی است. در غلظت های زیاد محلول الکتروریسی (۱۰ و ۱۲٪) که گرانروی افزایش قابل توجهی دارد (شکل ۲)، امکان الکتروریسی در محدوده ولتاژ اعمال شده فراهم نشد. با افزایش غلظت محلول پلیمر، نیروی لازم برای جدا شدن جت سیال از قطره ایجاد شده در نوک سوزن افزایش می یابد. از این رو به نظر می رسد، به منظور انجام الکتروریسی ولتاژ ۱۵ kV کافی نیست و باید ولتاژهای بیشتری را اعمال کرد. این در حالی است که به دلیل سرعت زیاد تبخیر حلال، جدول ۱- رسانایی محلول های خالص با غلظت های مختلف پلی اتاکاپرولاکتون.

رسانایی ($\mu\text{s/cm}$)	غلظت (%)
0.453 ± 0.014	۴
0.509 ± 0.08	۵
0.523 ± 0.02	۶
0.540 ± 0.03	۸
0.537 ± 0.01	۱۰
0.592 ± 0.005	۱۲
0.636 ± 0.07	۱۴



شکل ۲- گرانروی محلول های پلی کاپرولاکتون در غلظت های مختلف (اندازه گیری گرانروی با استفاده از spindle 4 با سرعت ۶۰ rpm انجام شده است).

فراصوت به مدت ۸ min پراکنده شد تا تعلیق پایدار ایجاد شود. این تعلیق به محلول ۵٪ پلی اتاکاپرولاکتون در حلال دی کلرومتان اضافه شد و پس از اختلاط اولیه به مدت ۸ min به وسیله دستگاه فراصوت به طور کامل مخلوط شد. بدین ترتیب محلول هایی با مقادیر متفاوتی نانو خاک رس تهیه شد.

الکتروریسی

دستگاه الکتروریسی شامل یک پمپ سرنگی برای تزریق محلول پلیمر و یک منبع تولید ولتاژ قوی بین صفحه جمع کننده و پمپ تغذیه است. محلول الکتروریسی در سرنگ ۵ mL، دارای سوزنی از جنس فولاد ضدزنگ با قطر داخلی ۰/۷ mm (۲۲ G) قرار گرفت. سوزن سرنگ به جریان ولتاژ وصل شد و الکتروود بعدی به سطح ورقه آلومینیمی متصل شد. سرعت تزریق محلول برابر ۵/۵ $\mu\text{L/min}$ تنظیم و بین سوزن و جمع کننده یک ولتاژ قوی ۱۵ kV ایجاد شد. نانوالیاف تشکیل شده، روی ورق آلومینیمی جمع آوری شد که در فاصله ۱۰ cm از نوک سوزن قرار داشت. الکتروریسی در محیط آزمایشگاه با دمای حدود ۲۲°C انجام شد.

نتایج و بحث

ابتدا الکتروریسی محلول های تهیه شده از ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۱۰ و ۱۲٪ پلی اتاکاپرولاکتون خالص بررسی شد. شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی نوری حاصل نتیجه الکتروریسی را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، تنها الکتروریسی محلول هایی با غلظت های

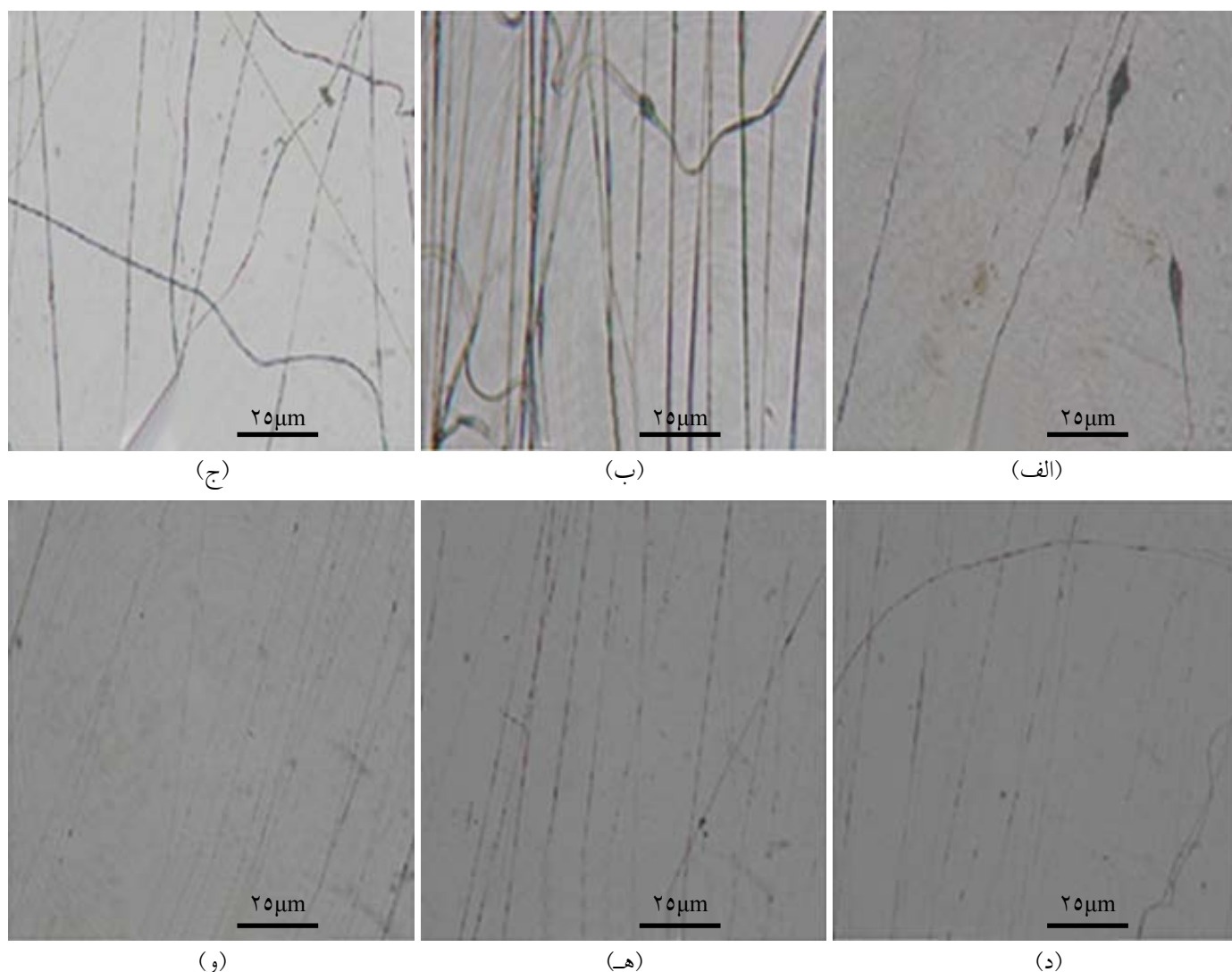
نانویالیف، غلظت ۰.۵٪ پلی کاپرولاکتون است. با توجه به این که غلظت کمتر محلول (به واسطه گرانی کمتر آن) منجر به تشکیل یالیف ظریف تر می شود، کمترین غلظت پلی اتاکاپرولاکتون که امکان تولید یالیف را فراهم می کند (غلظت ۰.۵٪) به عنوان محلول مادر برای افزودن نانوخاک رس منظور، منظور، نانوخاک رس با نسبت های ۱، ۳، ۵، ۹ و ۱۵٪ به محلول پلی اتاکاپرولاکتون افزوده و الکتروریسی انجام شده است.

تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از این نمونه های الکتروریسی شده در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد، در ساختار یالیف الکتروریسی شده پلی کاپرولاکتون خالص دانه هایی وجود دارد. اما، با افزودن نانوخاک رس دانه های کمتر و ساختار

پس از مدتی انسداد روزنه خروج محلول در نوک سوزن مشاهده می شود.

شکل ۱ نشان می دهد، با افزایش غلظت محلول امکان تشکیل یالیف با نقص کمتر فراهم می شود. با توجه به نتایج اندازه گیری رسانایی (جدول ۱) مشاهده می شود که افزایش غلظت پلیمر در محدوده الکتروریسی شده (۸٪-۴)، افزایش نسبی در رسانایی محلول را به همراه دارد. این افزایش در رسانایی می تواند باعث اعمال نیروی بیشتر به جت خارج شده از نوک سوزن و جلوگیری از ایجاد شکل غیرلیفی (نظیر دانه تسبیحی) در یالیف الکتروریسی شده شود.

این نوع مشاهدات در مقالات دیگر هم گزارش شده است [۲۶]. نتایج نشان داد، کمترین غلظت قابل ریسندگی برای تشکیل



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری یالیف الکتروریسی شده (ولتاژ الکتروریسی ۱۵ kV بوده است) از محلول ۰.۵٪ پلی کاپرولاکتون حاوی نانوخاک رس با نسبت های مختلف: (الف) ۰٪، (ب) ۱٪، (ج) ۳٪، (د) ۵٪، (ه) ۹٪ و (و) ۱۵٪.

هر چند در گزارش‌های گذشته [۲۸] عنوان شده که افزایش گرانی‌ری مانع تشکیل قطره کوچک می‌شود. اما در این جا مشاهده می‌شود، وجود نانوخاک رس ضمن افزایش گرانی‌ری (شکل ۴) ایجاد بیدهای کمتر را در ساختار نانوالیاف حاصل فراهم می‌آورد که این امر شاید به دلیل تغییرات کم گرانی‌ری (از ۲۵cP برای محلول بدون نانوخاک رس تا ۹۰cP برای محلول دارای ۱۵٪ نانوخاک رس) در اثر افزایش نانوخاک رس به محلول باشد.

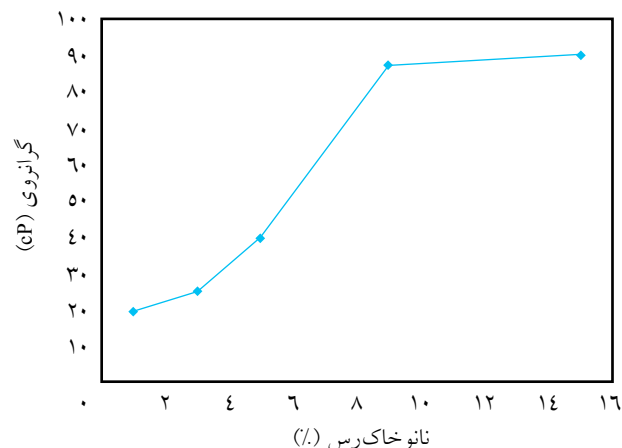
بررسی قطر و شکل الیاف به وسیله SEM

به منظور بررسی بیشتر شکل الیاف الکتروریسی شده در مجاورت نانوخاک رس تصاویر میکروسکوپ الکترونی برخی از نمونه‌ها تهیه شد. این تصاویر در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. این الیاف از محلول پلی‌کاپرولاکتون ۵ درصد حاوی ۵ و ۱۵ درصد نانوخاک رس در ولتاژ ۱۵ kV تهیه شده‌اند. همان‌طور که در بررسی به وسیله میکروسکوپ نوری مشخص شد، وجود نانوخاک رس و مقدار آن دو عامل مهم و تعیین‌کننده در شکل و قطر نانوالیاف الکتروریسی شده است.

شکل ۵ نشان می‌دهد، مخلوطی که فاقد نانوخاک رس است، محصولی با ساختار لیفی نایکناخت روی صفحه جمع‌کننده ایجاد کرده است. اندازه‌گیری قطر نانوالیاف تشکیل شده در این حالت میانگین ۳۲۳ nm را نتیجه داد. در مخلوط حاوی ۵٪ نانوخاک رس، الیاف با ساختار یکنواخت تر حاصل شده و نقاط غیرلیفی کمتری در سطح نانوالیاف مشاهده می‌شود. میانگین قطر الیاف تشکیل شده در این حالت ۲۱۲ nm بوده است. با افزایش مقدار نانوخاک رس در مخلوط تا ۱۵٪ میانگین قطری نانوالیاف به ۱۲۶ nm کاهش می‌یابد. افزایش نانوخاک رس باعث افزایش گرانی‌ری و هم‌چنین رسانایی

جدول ۲- رسانایی برای درصد‌های مختلف نانوخاک رس در ۵٪ محلول پلیمر.

مقدار نانوخاک رس (%)	رسانایی ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
۰	$۰/۵۰۹ \pm ۰/۰۸$
۱	$۰/۵۷۱ \pm ۰/۱$
۳	$۰/۶۲۳ \pm ۰/۰۷$
۵	$۰/۶۳۲ \pm ۰/۱۱$
۹	$۰/۶۴ \pm ۰/۱۴$
۱۵	$۰/۶۵۱ \pm ۰/۱۱$

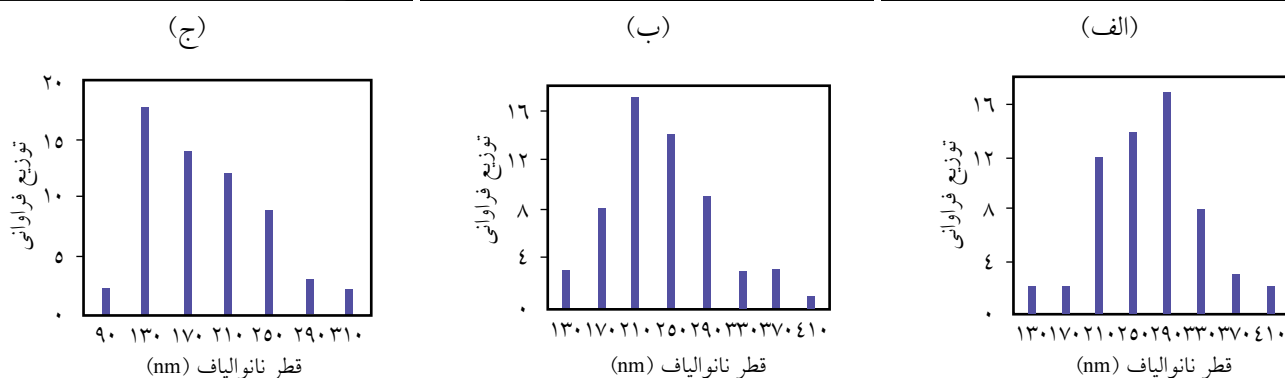
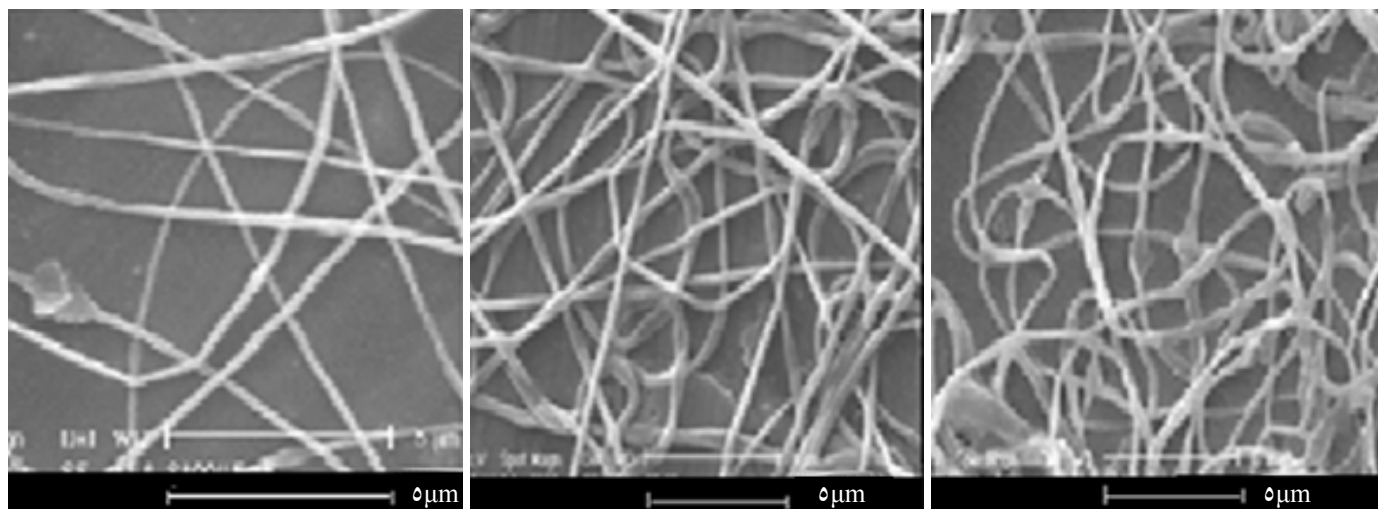


شکل ۴- گرانی‌ری بر حسب درصد‌های مختلف نانوخاک رس برای غلظت ۵٪ پلیمر.

لیفی بسیار بهتری در محتوای رسی ۱، ۳ و ۵٪ در نانوکامپوزیت‌ها تشکیل می‌شود و حتی ساختار یکنواخت‌تری در محتوای رسی ۹ و ۱۵٪ مشاهده می‌شود. در عمل نیز این محلول‌ها فرایند الکتروریسی راحت‌تری نشان دادند.

به عبارت دیگر، افزایش محتوای رسی در مواد نانوکامپوزیتی، ساختار لیفی بسیار مطلوب‌تری را به همراه می‌آورد. افزایش قابلیت الکتروریسی محلول‌های دارای نانوخاک رس و هم‌چنین تشکیل ساختار لیفی با نقص کمتر به ویژگی‌های محلول ریسندگی ارتباط خواهد داشت. مشاهده شکل الیاف الکتروریسی شده (شکل ۳)، بهبود خواص محلول الکتروریسی از جمله رسانایی و گرانی‌ری را به دلیل وجود ذرات نانوخاک رس نشان می‌دهد. شکل ۴ و جدول ۲، به ترتیب نتایج اندازه‌گیری گرانی‌ری و رسانایی محلول‌ها را پیش از الکتروریسی نشان می‌دهند. نتایج اندازه‌گیری گرانی‌ری و رسانایی محلول‌ها نشان دهنده افزایش نسبی گرانی‌ری و رسانایی در اثر افزایش مقدار نانوخاک رس در محلول‌هاست.

چگالی زیاد شارژ الکتریکی در سطح جت تشکیل شده، باعث تشکیل الیاف خوب با دانه‌های کمتر می‌شود [۲۶]. Zong و همکاران [۲۷] گزارش کردند که وجود مقدار بسیار اندکی نمک، الکتروریسی را به سوی تولید نانوالیافی با دانه‌های کمتر هدایت می‌کند. بنابراین، نتایج به دست آمده در این مقاله نیز دور از انتظار نیست. چرا که، با توجه به نتایج رسانایی محلول‌ها در جدول ۲، وجود نانوخاک رس سبب افزایش رسانایی محلول می‌شود که کشیدگی محلول را حین ریسندگی افزایش داده و الیاف یکنواخت‌تر با دانه کمتر را در فرایند الکتروریسی نتیجه می‌دهد. هم‌چنین می‌توان انتظار داشت، افزایش کشش محلول طی الکتروریسی سبب تولید الیاف ظریف‌تر می‌شود.



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوالیاف الکتروریسی شده از مخلوط پلی اتاکاپرولاکتون ۵٪ و نانوخاک رس در ولتاژ ۱۵ kV و فاصله ریسندگی ۱۰ cm: (الف) بدون نانوخاک رس، (ب) ۵٪ نانوخاک رس و (ج) ۱۵٪ نانوخاک رس

نتیجه گیری

الکتروریسی نانوکامپوزیت های پلی اتاکاپرولاکتون - نانوخاک رس و تهیه الیاف با قطر کمتر از ۳۰۰ nm با موفقیت انجام شد. الکتروریسی محلول پلی اتاکاپرولاکتون فاقد نانوخاک رس در محدوده غلظت ۵ تا ۸٪ امکان پذیر است که عامل مؤثر بر آن گرانیوی محلول است. وجود نانوخاک رس سبب افزایش رسانایی و گرانیوی محلول می شود. افزایش رسانایی الکتریکی محلول حین الکتروریسی، سبب اعمال کشش بیشتر در جت پلیمری می شود. این عامل سبب می شود تا امکان الکتروریسی الیاف با نقص های ساختاری کمتری فراهم شود. از طرف دیگر، با وجود نانوخاک رس و افزایش رسانایی محلول، کاهش میانگین قطری با افزایش مقدار نانوخاک رس مشاهده می شود. این نانوالیاف می تواند کاربرد گسترده ای در مهندسی بافت داشته باشند که نیازمند بررسی دقیق تر است.

محلول پلی کاپرولاکتون می شود (شکل ۴ و جدول ۲). افزایش گرانیوی و رسانایی محلول اثر متفاوتی بر شکل و قطر نانوالیاف حاصل از الکتروریسی دارد. از طرفی، افزایش گرانیوی شرایط را برای تشکیل الیاف با قطر بیشتر فراهم می کند [۵]. از طرف دیگر، افزایش رسانایی محلول باعث اعمال کشش بیشتر به جت جدا شده از سوزن می شود که نتیجه آن کاهش قطر الیاف الکتروریسی شده خواهد بود [۲۶، ۲۷].

نتایج اندازه گیری قطر نانوالیاف نشان دهنده روند کاهشی در قطر نانوالیاف با افزایش محتوای نانوخاک رس است. این نتیجه نشان می دهد، در فرایند الکتروریسی پلی کاپرولاکتون نانوخاک رس افزایش رسانایی محلول، اثر بیشتری بر نیروی وارد شده به جت تشکیل شده در الکتروریسی دارد. به نظر می رسد، توضیح این پدیده نیاز به بررسی بیشتر داشته باشد.

مراجع

- Shoufeng Y., Leong K.F., Du Z., and Chua C.K., The Design of Scaffolds for Use in Tissue Engineering. Part I. Traditional Factors, *Tissue Eng.*, **7**, 679-689, 2001.
- Ma P.X., Scaffolds for Tissue Fabrication, *Mater. Today*, **7**, 30-40, 2004.
- Venugopal J., Low S.H., Choon A.T., and Ramakrish S., Interaction of Cells and Nanofiber Scaffolds in Tissue Engineering, *J. Biomed. Mater. Res. Part B: Appl. Biomater.*, **84B**, 34-48, 2008.
- Barnes C., Sell S., Boland E., Simpson D., and Bowlin G., Nanofiber Technology: Designing the Next Generation of Tissue Engineering Scaffolds, *Adv. Drug Deliv. Rev.*, **59**, 1413-1433, 2007.
- Ramakrishna S., Fujihara K., Teo W.E., Lim T.C., and Ma Z., *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, World Scientific National University of Singapore, Chap. 1-3, 1-139, 2005.
- Huang Z.M., Zhang Y.Z., Kotak M., and Ramakrishna S., A Review on Polymer Nanofiber by Electrospinning and their Applications in Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 2223-2253, 2003.
- Yarni A.L., Koombhongse S., and Reneker D.H., Bending Instability in Electrospinning of Nanofibers, *J. Appl. Phys.*, **89**, 4836-4846, 2001.
- Reneker D.H., Yarni A.L., Fong H.F., and Koombhongse S., Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning, *J. Appl. Phys.*, **87**, 4531-4547, 2000.
- Bognitzki M., Czado W., Frese T., Schaper A., Hellwing M., Steinhart M., Greiner A., and Wendorff J.H., Nano Structured Fibers via Electrospinning, *Adv. Mater.*, **13**, 70-72, 2001.
- Nakayama A., Kawasaki N., Maeda Y., Arvanitoyannis I., Ariba S., and Yamamoto N., Study of Biodegradability of Poly(ϵ -valerolactone-co-L-lactide)s, *J. Appl. Sci. Polym.*, **66**, 741-748, 1997.
- Tokiwa Y. and Jarerat A., Biodegradation of Poly(L-lactide), *Biotechnol. Lett.*, **26**, 771-777, 2004.
- Munirah S., Kim S.H., Ruzzymah B.H.I., and Khang G., The Use of Fibrin and Poly(lactic-co-glycolic acid) Hybrid Scaffold for Particular Cartilage Tissue Engineering: An In Vivo Analysis, *Eur. Cells. Mater.*, **15**, 41-52, 2008.
- Sombatmankhong K., Sanchavanakit N., Pavasant P., and Supaphol P., Bone Scaffolds from Electrospun Fiber Mats of Poly(3-hydroxybutyrate), Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and their Blend, *Polymer*, **48**, 1419-1427, 2007.
- Lee K.H., Kim H.Y., Khil M.S., Ra Y.M., and Lee D.R., Characterization of Nano-structured Poly(ϵ -caprolactone) Nonwoven Mats via Electrospinning, *Polymer*, **44**, 1287-1294, 2003.
- Jin H.J., Chen J.S., Karageorgiou V., Altman G.H., and Kaplan D.L., Human Bone Marrow Stromal Cell Response on Electrospun Silk Fibroin Mats, *Biomaterials*, **25**, 1039-1047, 2004.
- Kim C.W., Kim D.S., Kang S.Y., Marques M., and Joo Y.L., Structural Studies of Electrospun Cellulose Nanofibers, *Polymer*, **47**, 5097-5107, 2006.
- Noh H.K., Lee S.W., Kim J.M., Oh J.E., Kim K.H., and Chung Ch.P., Electrospinning of Chitin Nanofibers: Degradation Behavior and Cellular Response to Normal Human Keratinocytes and Fibroblasts, *Biomaterials*, **27**, 3934-3944, 2006.
- Zhong S.P., Teo W.E., Zhu X., Beuertnan R., Ramakrishna S., and Yung L.Y.L., Development of a Novel Collagen GAG Nanofibrous Scaffolds via Electrospinning, *Mater. Sci. Eng. C*, **27**, 262-266, 2007.
- Marras S.I., Kladi K.P., Tsivintzelis I., Zuburtikudis I., and Panayiotou C., Biodegradable Polymer Nanocomposites: The Role of Nanoclays on the Thermomechanical Characteristics and the Electrospun Fibrous Structure, *Acta Biomater.*, **4**, 756-765, 2008.
- Bordes P., Pollet E., and Averous L., Nano-Biocomposites: Biodegradable Polyester/Nanoclay Systems, *Prog. Polym. Sci.*, **34**, 125-155, 2009.
- Sinha R.S. and Okamoto M., Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: A Review from Preparation to Processing, *Prog. Polym. Sci.*, **28**, 1539-1641, 2003.
- Alexandre M. and Dubois P., Polymer/layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties and Uses of a New Class of Materials, *Mater. Sci. Eng.*, **28**, 1-63, 2000.
- Mohan T.P., Kuriakose J., and Kanny K., Effect of Nanoclay Reinforcement on Structure, Thermal and Mechanical Properties of Natural Rubber-Styrene Butadiene Rubber (NR-SBR), *Indust. Eng. Chem.*, **17**, 264-270, 2011.

24. Labidi S., Azema N., Pernin D., and Lopez Caesta J.M., Organo Modified Montmorillonite/Poly(ϵ -caprolactone) Nanocomposites Prepared by Melt Intercalation in a Twin Screw Extruder, *Polym. Degrad. Stab.*, **95**, 382-388, 2010.
25. Hong J.H., Jeong E.H., Lee H.S., Baik D.H., Seo S.W., and Youk J.H., Electrospinning of Polyurethane/Organically Modified Montmorillonite Nanocomposites, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **43**, 3171-1377, 2005.
26. Fong H., Chun I., and Reneker D.H., Beaded Nanofibers Formed during Electrospinning, *Polymer*, **40**, 4585-4592, 1999.
27. Zong X.H., Kim K., Fang D.F., Ran S.F., Hsiao B.S., and Chu B., Structure and Process Relationship of Electrospun Bioabsorbable Nanofiber Membranes, *Polymer*, **43**, 4403-4412, 2002.
28. Subbiah T., Bhat G.S., Tock R.W., Pararneswaran S., and Ramkumar S.S., Electrospinning of Nanofibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 557-569, 2005.