

پارامترهای موثر در الکتروسیسندگی پلیمرها:

پارامترهایی که در اثر تبدیل محلولهای پلیمری به نانوفیبرها از طریق الکتروسیسندگی مؤثر هستند و مورفولوژی سطح نانوفیبر و قطر و سایر مشخصات آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند را می‌توان به دو دسته پارامترهای مرتبط با محلول پلیمری و پارامترهای فرایندی تقسیم کرد. پارامترهای مرتبط با محلول پلیمری عبارتند از: ویسکوزیته، الاستیسیته، هدایت، کشش سطحی، غلظت، دمای محلول، ثابت دی‌الکتریک، فراریت حلال، دانسیته بار خالص، اثر افزایش نمک، وزن مولکولی پلیمر و ... از جمله پارامترهای فرایندی می‌توان به ولتاژ اعمال شده، میزان رطوبت محیط، سرعت هوا در اتاقک الکتروسیسندگی، پتانسیل الکتریکی در نوک لوله موئین، دمای محیط، فاصله بین نوک لوله با صفحه جمع‌کننده، نوع صفحه جمع‌کننده، سرعت خروج محلول از نازل، سرعت چرخش جمع‌کننده، سرعت رویش نازلها و... اشاره کرد. توانایی لیف شدن انواع پلیمرها تحت تأثیر هر کدام از پارامترهای نامبرده قرار می‌گیرد بطوریکه اگر شرایط بهینه ایجاد نشود هیچ نوع لیفی بدست نمی‌آید یا الیاف بدست آمده از نظر مورفولوژی ناهنجار خواهند بود. در زیر بطور مختصر پارامترهای مهم فرایندی بررسی می‌شوند:

فاصله بین نوک نازل تا جمع‌کننده:

فاصله بین نوک نازل تا هدف (وسیله جمع‌کننده) را فاصله کاری یا فاصله الکتروسیسندگی می‌گویند که تنظیم این فاصله نیز نقش مهمی را در تولید الیاف دارد. تغییر این فاصله روی مورفولوژی الیاف تشکیل شده مؤثر است. افزایش فاصله منجر به کاهش دانسیته بار در هر سانتی متر از میدان می‌گردد.

سرعت جریان جت:

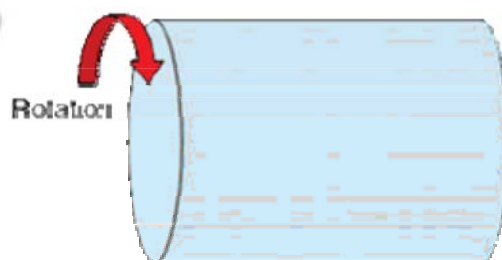
عموماً زمان لازم برای حرکت محلول پلیمری (جت) از نازل به سمت جمع‌کننده و تشکیل الیاف جامد کمتر از یک دهم ثانیه ($0.1/s$) است. طبق بررسی انجام شده بر روی محلول PS، تغییر سرعت پمپ و از اینرو سرعت جریان محلول بر روی اندازه فیبر و مورفولوژی سطح آن مؤثر است. از آنجا که در این فرایند، سرعت تزریق محلول باید بسیار آرام باشد معمولاً در مطالعات و تحقیقات از دستگاه پمپ سرنگی استفاده می‌شود؛ زمانی که سرعت جریان $1/0 \text{ ml/min}$ و بیشتر می‌شود تشکیل گره مشاهده می‌شود، اندازه آنها از $20 \mu\text{m}$ افزایش یافته و در سطح آن منافذ در مقیاس نانو تشکیل می‌شود. اندازه این منافذ از $150 \mu\text{m}$ تا $90 \mu\text{m}$ با افزایش فلوید جریان افزایش می‌یابد.

تهیه نانوالیاف یکنواخت:

بطور کلی برای اینکه بتوانیم یک نتیجه مطلوب و دلخواه را از فرایند الکتروسیسندگی بدست آوریم (نانوالیاف یکنواخت) هر کدام از این پارامترهای مهم را با در نظر گرفتن شرایط آزمایش و نوع محلول پلیمری باید بررسی کنیم و با تغییر دادن هر کدام از این پارامترها و سایر پارامترهایی که از اهمیت کمتری برخوردار هستند، بتوانیم شرایط آزمایش را بهینه کنیم. لازم به یادآوری است که هر کدام از این پارامترها برای هر آزمایشی متغیر بوده و برای هر آزمایش (محلول پلیمری) باید مقدار بهینه آنها را بدست آوریم.

استفاده از جمع‌کننده چرخان:

از جمله روشهای مناسب جهت یکنواختی نانوفیبرهای پلیمری استفاده از جمع‌کننده چرخان می‌باشد که در شکل به صورت شماتیک نشان داده شده است. از جمله مزایای این روش راحتی ساخت دستگاه، امکان دستیابی به یکنواختی بالا و امکان تنظیم میزان آرایش نانوفیبرها با تنظیم سرعت چرخش درام می‌باشد. البته در کنار این موضوع معایب آن نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد که مهمترین آنها عدم امکان پوشش‌دهی به صورت پیوسته است. از جمله معایب دیگر این روش امکان پارگی نانوفیبرها در سرعت چرخش بالا می‌باشد که باعث محدودیت سرعت چرخش می‌گردد. بنابراین سرعت چرخش درام از جمله مهمترین پارامترها در این روش می‌باشد.



استفاده از چند نازل:

در روش الکتروسیسندگی امکان استفاده از چند نازل به جای یک نازل وجود دارد که باعث کاهش قابل توجه زمان تولید نانوفیبرها می‌گردد. باید توجه شود که طرز چیدمان نازلها در این روش بسیار مهم می‌باشد و نازلها بایستی به نحوی مرتب شوند که با همدیگر برهمکنش نداشته باشند. علاوه بر این، کنترل سرعت باید به نحوی انجام گیرد که سرعت تزریق محلول در تمام نازلها یکسان باشد. به همین دلیل، جهت بهینه‌سازی اولیه پارامترها، استفاده از یک نازل ترجیح داده می‌شود تا اثر برهمکنش جت‌های پلیمری بر هم از بین برود.



اثر روبش نازل:

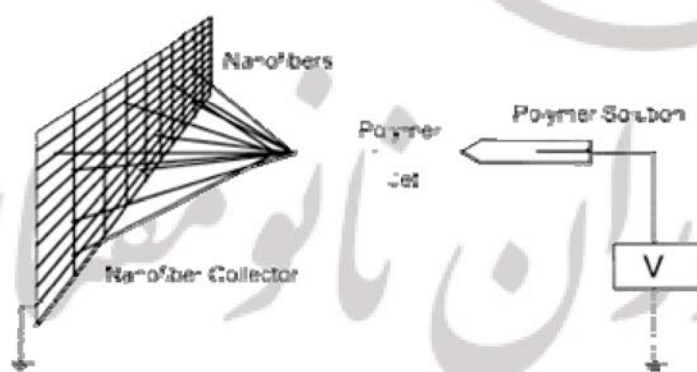
برای دستیابی به مت یکنواخت، لازم است نازل یا نازلها نیز حرکت رفت و برگشت یکنواختی داشته باشند تا از انباشتگی نانوفیبرها در یک منطقه از درام جلوگیری گردد. میزان سرعت رفت و برگشت نازل نیز تاثیر زیادی بر نحوه آرایش نانوفیبرها و خواص فیلتر خواهد داشت. بنابراین بررسی میزان تاثیر سرعت نازل بر خواص نانوفیبرها و بهینه‌سازی آن باید مورد توجه قرار گیرد.

تشکیل نانوفیبر روی جمع‌کننده:

زمانی که بین نازل و درام به عنوان جمع‌کننده میدان الکتریکی اعمال می‌گردد، فرآیند الکتروسیسندگی انجام می‌گیرد. قطره تشکیل شده در نوک نازل به وسیله میدان الکتریکی اعمال شده به شکل مخروط تبدیل می‌شود. وقتی که ولتاژ اعمال شده به مقدار حد آستانه می‌رسد، نیروی الکترواستاتیکی در سطح مخروط به کشش سطحی قطره غلبه کرده و یک جت از مخروط پرتاب خواهد شد. این مخروط به نام مخروط تیلور (Taylor) نامیده می‌شود که برای سیستم‌های پلیمر - حلال معین، انشعاب جت به رشته‌های یکنواخت قابل مشاهده است. سپس جت به درام جمع‌کننده برخورد کرده و روی آن انباشته می‌شود.

تجهیزات و Set up دستگاه قابل برنامه ریزی کامپیوتری الکتروسیسندگی شرکت فناوران نانومقیاس (الکتروسیس)

همانطور که از دستگاه الکتروسیسندگی در شکل زیر مشخص است چهار مجموعه در این دستگاه حائز اهمیت است که عبارتند از: سیستم تزریق محلول، سیستم تامین اختلاف پتانسیل، سیستم جمع‌کننده (کالکتور) و سیستم نازل.



سیستم تزریق محلول:

از آنجا که در این فرایند، سرعت تزریق محلول باید بسیار آرام باشد معمولاً در مطالعات و تحقیقات از دستگاه پمپ سرنگی استفاده می‌شود؛ سیستم بکار رفته در این پژوهش پمپ سرنگی محصول شرکت فناوران نانومقیاس است که می‌تواند با دقت ۱ میکرولیتر بر ساعت تزریق کند و دارای قابلیت برنامه ریزی و کنترل از راه دور توسط کامپیوتر می‌باشد. این دستگاه با الگوبرداری از بهترین دستگاه‌های تزریق ساخته شده است و از آنجا که سرعت تزریق در فرایند الکتروسیسندگی مهم است صحت و دقت آزمایشات را از این نظر تضمین خواهد کرد.

سیستم تامین کننده ولتاژ ولتاژ:

دستگاه تولید کننده ولتاژ بالا (High Voltage Supplier) با حداکثر ولتاژ ۳۰ کیلوولت، ساخت شرکت فناوری نانو مقیاس است. بیش از ۹۵ درصد پژوهشهای الکترویسندگی در ولتاژ زیر ۳۰ کیلوولت انجام می‌گیرد، بنابراین جهت جلوگیری از افزایش بی‌دلیل هزینه ساخت دستگاه الکترویس، این سیستم جهت بکارگیری در دستگاه انتخاب شده است. (در موارد خاص امکان طراحی سیستم ولتاژ بالا به میزان مورد نیاز کاربر وجود دارد).

سیستم جمع‌کننده (کالکتور):

سیستم جمع‌کننده در این آزمایشات یک درام پلاستیکی با محیط ۲۵ و طول ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد. به دلیل عدم رسانا بودن درام، یک فویل آلومینیومی سخت به صورت کامل بر روی آن قرار گرفته و به زمین متصل شده است. فویل آلومینیوم باید با دقت و بسیار صاف بر روی درام قرار گیرد تا میدان یکنواختی بین نازل و جمع‌کننده برقرار گردد. درام به موتور با امکان تنظیم دور موتور توسط کامپیوتر متصل گردیده است که قادر است درام را با سرعت دلخواه بچرخاند.

سیستم تنظیم فاصله الکترویسندگی:

در دستگاه الکترویس فاصله الکترویسندگی (فاصله نوک نازل تا صفحه جمع‌کننده) به راحتی توسط نرم قابل کنترل است. نرم افزار طوری طراحی شده است که با فشردن دکمه START ابتدا این فاصله را تنظیم می‌نماید. این فاصله معمولاً بین ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که با توجه به ولتاژ اعمال شده، غلظت محلول، کشش سطحی و ... مقدار بهینه آن متغیر است. به سفارش کاربر این شرکت آمادگی دارد حداقل و حداکثر این فاصله را طراحی و تولید نماید.

سیستم روبش نازل ها:

همانطور که گفته شد، برای دستیابی به مت یکنواخت، لازم است نازل یا نازلها حرکت رفت و برگشت یکنواختی داشته باشند تا از انباشتگی نانوفیبرها در یک منطقه از درام جلوگیری گردد. در این دستگاه امکان روبش هر نقطه از درام از ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر با سرعت دلخواه میسر شده است. جهت عدم حرکت نازل کفایت ابتدا و انتهای نقطه اسکن یک عدد ثابت وارد نمود، در آن صورت نازل به نقطه مورد نظر رفته و بی حرکت خواهد ماند. به سفارش کاربر این محدوده نیز می‌تواند به دلخواه طراحی و تولید گردد.

مزایای استفاده از سیستم قابل برنامه ریزی کامپیوتری (الکترویس):

مثال ۱: جمع آوری نانوالیاف با شرایط مشخص

استفاده از دستگاه جهت تولید نانوفیبر در تمام سطح درام (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) با فاصله الکترویسندگی ۵۰ میلی‌متر، سرعت درام ۲۰ دور در دقیقه، سرعت تزریق ۱ میلی‌لیتر در ساعت و به مدت ۲ دقیقه:

	Injection	Scan Stepper	Rotate Stepper	Disance					
	Delay Duration (min)	Time Duration (min)	Injection Rate (ml/h)	Start Position (mm)	End Position (mm)	Scan Rate (mm/sec)	Rotate Rate (rpm)	Rotate Dir (cw/ccw)	Distance (mm)
▶	0	2	1	0	300	30	20	<input type="checkbox"/>	50
*								<input type="checkbox"/>	

مثال ۲: بررسی اثر فاصله الکترویسندگی:

پلیمر مورد نظر در سرنگ ریخته شده و در پمپ قرار می‌گیرد. جهت بررسی اثر فاصله الکترویسندگی، بایستی سایر پارامترها ثابت نگه داشته شوند. (سرعت درام ۱۰ دور در دقیقه، سرعت تزریق ۱ میلی لیتر در ساعت و زمان الکترویسندگی ۱ دقیقه)

حال دستورات به گونه ای برنامه ریزی می‌شوند که سطح درام به ۵ منطقه تقسیم شوند. با فشردن دکمه شروع، نقطه اول درام (از ۰ تا ۴۰ میلی متر) با فاصله الکترویسندگی ۵۰ میلی متر، نقطه دوم درام (از ۶۰ تا ۱۰۰ میلی متر) با فاصله الکترویسندگی ۹۰ میلی متر، نقطه سوم درام (از ۱۲۰ تا ۱۶۰ میلی متر) با فاصله الکترویسندگی ۱۳۰ میلی متر، نقطه چهارم درام (از ۱۸۰ تا ۲۲۰ میلی متر) با فاصله الکترویسندگی ۱۷۰ میلی متر و نقطه پنجم درام (از ۲۴۰ تا ۳۰۰ میلی متر) با فاصله الکترویسندگی ۲۰۰ میلی متر رویش خواهد شد.

زمان تاخیر ۰,۱ دقیقه (۶ ثانیه) بین دستورات منجر به توقف کوتاه بین اجرای دستورات خواهد شد.

پس از اجرای برنامه به راحتی تاثیر میزان فاصله بر ابعاد و مورفولوژی نانوفیبرها مشخص خواهد گردید.

بدیهی است تعداد ناحیه و مقادیر مربوط به هر یک به راحتی توسط نرم افزار قابل تغییر است. بایستی توجه شود ماهیت تشکیل نانوفیبرها به نحوی است که یک سطح را پوشش می‌دهند، بنابراین انتخاب بیش از ۵ ناحیه در سطح درام ۳۰۰ میلیمتری توصیه نمی‌شود.

	Injection		Scan Stepper			Rotate Stepper		Disance	
	Delay Duration (min)	Time Duration (min)	Injection Rate (ml/h)	Start Position (mm)	End Position (mm)	Scan Rate (mm/sec)	Rotate Rate (rpm)	Rotate Dir (cw/ccw)	Distance (mm)
▶	0.1	1	1	0	40	20	10	<input type="checkbox"/>	50
	0.1	1	1	60	100	20	10	<input type="checkbox"/>	90
	0.1	1	1	120	160	20	10	<input type="checkbox"/>	130
	0.1	1	1	180	220	20	10	<input type="checkbox"/>	170
	0.1	1	1	240	300	20	10	<input type="checkbox"/>	200

توجه: در صورت عدم نیاز به رویش می‌توان نقاط شروع و پایان را یکسان در نظر گرفت، در این صورت نازل به نقطه مورد نظر رفته و ثابت باقی خواهد ماند.

Injection		Scan Stepper	
Injection Rate (ml/h)	Start Position (mm)	End Position (mm)	Scan Rate (mm/sec)
1	20	20	20
1	80	80	20
1	120	120	20
1	160	160	20
1	200	200	20

مثال ۲: استفاده از روشهای طراحی آزمایش جهت بهینه سازی:

بر عکس روش سنتی بررسی تاثیر پارامترها که نیاز به تعداد زیادی از آزمایشها دارد، در روش طراحی آزمایش به صورت آماری تعداد آزمایشها به مقدار زیادی کاهش خواهد یافت. در این صورت به جای تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، امکان تغییر چندین پارامتر در یک لحظه وجود داشته و با تحلیل نتایج تاثیر تک تک پارامترها مشخص خواهد گردید.

Name	Role	Values	
<input checked="" type="checkbox"/> Injection Rate	Continuous	0.5	2
<input checked="" type="checkbox"/> Scan Rate	Continuous	5	20
<input checked="" type="checkbox"/> Rotate Rate	Continuous	10	20
<input checked="" type="checkbox"/> Distance	Continuous	5	20

در روش Design Central Composite، بررسی این شرایط نیاز به اجرای ۲۶ آزمایش دارد که با حدود ۵ بار اجرای برنامه و تحلیل آماری، به راحتی پارامترهای مورد نظر بهینه خواهد گردید.

سایر مزایای استفاده از سیستم قابل برنامه ریزی کامپیوتری (الکترونیس):

- امکان گزارش گیری شرایط الکترونیسندگی
- امکان ذخیره شرایط و بازیابی آن

فناوران نانومقیاس