เส้นใยนาโนเซรามิก

Ceramic Nanofibers

ชนิศา นวนิล[1,2] และ นราธิป วิทยากร[1,2,3*]

Chanisa Nawanil and Naratip Vittayakorn

[1]วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

[2]ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ 328 ถนน ศรีอยุธยา กรุงเทพ 10400

[3] สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

เส้นใยนาโนเซรามิกเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายด้วยสมบัติที่ขึ้นกับพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นและขนาดที่เล็กลงของวัสดุ นอกจากนี้เส้นใยนาโนยังมีสมบัติพิเศษทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ตัวอย่างเช่น การนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการพื้นที่ผิวสัมผัสสูง เช่น แผ่นกรอง (filter) ตัวตรวจจับ (sensor) ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ตัวดูดซับ (adsorbent) ใช้ในการแยกสาร(separation) และในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับวิธีและสารที่นำมาสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์เซรามิกที่มีโครงสร้างในระดับนาโนเพื่อการค้านั้น จะต้องมีการควบคุมขนาดที่แน่นอน ทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงนับว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพที่สามารถประดิษฐ์เส้นใยนาโนในระดับอุตสาหกรรมได้ โดยเป็นเทคนิคที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตในการผลิตเส้นใยที่มีความต่อเนื่อง มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ดี มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง จึงได้มีการปรับปรุงกระบวนการนี้ในการประดิษฐ์เส้นใยนาโนเซรามิก ด้วยการนำเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงและโซล-เจลมาใช้ร่วมกันในการประดิษฐ์เส้นใยนาโนเซรามิกที่มีความแตกต่างของขนาด สัดส่วน และรูปแบบโครงสร้าง จากนั้นจึงทำการแคลไซน์ (calcination) และการซินเตอร์ (sintering) เพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นเซรามิกที่ต้องการ

คำสำคัญ : เส้นใยนาโนเซรามิก; อิเล็กโตรสปินนิง; โซล-เจล

---

* E-mail address : naratipcmu@yahoo.com

Abstract

Ceramic nanofiber is an attractive material for various applications because its property depends on a rising surface area and diminishing particle size. Furthermore, ceramic nanofibers also have special physical, chemical and biological properties such as filters, sensors, catalysts, absorbents, and separation and tissue engineering for high surface area applications. However, each application needs a specific method and preparation precursor in order to perform efficiently. Although the precise shape of ceramic nanofibers is formed and controlled using the synthesis method for commercial purposes, this technique is limited by the need for special conditions. Thus, electrospinning is the best technique for nanofiber synthesis in the industrial world, due to its continuous fiber processing, good homogeneity, high specific surface area and high length-to-diameter ratio. Therefore, ceramic nanofibers can be synthesized and developed using the electrospinning technique combined with the sol-gel method. The size, shape and structure of these nanofibers can be controlled by various processing conditions. Calcination and sintering processes are applied to precursors in order to obtain dense ceramic nanofiber.

Keywords : Ceramic nanofibers; Electrospining; Sol gel

1. บทนำ

กระบวนการเตรียมเซรามิกในระดับนาโนเมตรได้รับความสนใจในกลุ่มของวัสดุศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์อย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การเตรียมเซรามิก 1 มิติ ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ เส้นใย (fiber) ลวด (wire) แท่ง (rod) สาย (belt) ท่อ (tube) เกลียว (spiral) และวงแหวน (ring) ได้มีการนำไปใช้งานในเทคโนโลยีที่สำคัญ เช่น ทางไฟฟ้า (electronics) ทางแสง (photonics) และทางกล (mechanics) โดยสมบัติใหม่ที่เพิ่มขึ้นของวัสดุนาโนจากการที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงเมื่อขนาดอนุภาคลดลงในระดับนาโนเมตรนั้น จะเกิดการแยกของพันธะภายในเนื้อวัสดุ ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นผิวให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น การที่วัสดุนาโนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงวิซิเบิล (visible light) ทำให้มีการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ออพโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic) อีกทั้งสมบัติการสะท้อน การหักเห และสมบัติการคายแสง (light emission) ยังสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการควบคุมขนาดอนุภาค จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อาทิ ใช้เป็นตัวขยายการมองเห็น (optical amplifiers) ตัวส่งสัญญาณ

(signal processing) เลเซอร์ (lasers) เป็นต้น นอกจากนี้ถ้าอนุภาคขนาดนาโนเป็นธาตุที่ว่องไว การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจะเป็นผลทำให้เกิดการส่งออกของความร้อนอย่างรวดเร็วในเลเซอร์ จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกำลังที่ให้ออกมา ปรากฏการณ์นี้จึงเป็นแนวคิดในการประดิษฐ์เลเซอร์ที่เป็นเส้นใย (fiber lasers) ขึ้น

ซึ่งบทความนี้จะกล่าวถึงเส้นใยนาโนเซรามิก โดยพบว่าเส้นใยนาโนเซรามิกสามารถใช้ในการทดสอบแนวคิดทางกลศาสตร์ควอนตัมและยังมีบทบาทสำคัญสำหรับการนำไปใช้งานต่างๆ เช่น ทางแสง (photonics) นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) และการเก็บข้อมูล (data storage) นอกจากนี้เส้นใยนาโนเซรามิกยังมีสมบัติที่โดดเด่นอีกมากมาย ได้แก่ มีความเหนียวเชิงกล (mechanical toughness) และประสิทธิภาพในการเปล่งแสง (luminescence efficiency) ที่สูง อีกทั้งยังมีค่าเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) ที่เพิ่มขึ้น โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่สำคัญสำหรับการประดิษฐ์เส้นใยนาโน ตัวอย่างเช่น การประดิษฐ์เส้นใยอะลูมินาขนาดนาโน (~2-4 nm) ในระดับอุตสาหกรรมสำหรับการใช้งานทางไฟฟ้า เช่น การใช้เป็นวัสดุรองรับในวงจรไฮบริด (hybrid) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric generator) โดยใช้แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanorods) ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลได้ถึงประมาณ 30 % และใช้ลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanowires) ในการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ (field-effect transistors) ไดโอด (diodes) และตัวตรวจจับแกสขนาดนาโนที่มีความไวสูง (ultrasensitive nanosize gas sensors) โดยอัตราส่วนของความกว้างต่อความยาว (aspect ratio) ที่สูงของเส้นใยนาโนและแท่งนาโนเซรามิกนั้น ทำให้วัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุที่มีความต้องการสูงสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

2. นาโนเทคโนโลยีและเส้นใยนาโน [1]

2.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีคือ เทคโนโลยีประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้าง การสังเคราะห์วัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากในระดับอนุภาคของอะตอมหรือโมเลกุล โดยทั่วไปกำหนดว่าต้องมีขนาด 0.1 นาโนเมตร ถึง 100 นาโนเมตร ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรือสสารมีสมบัติพิเศษเพิ่มขึ้น ทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางชีวภาพ ทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปใช้งาน

2.2 เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโนคือเส้นใยสังเคราะห์ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร [1] (โดยทั่วไปมีขนาด 50-500 นาโนเมตร) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ เป็นเส้นใยที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก (เช่น เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ

ประมาณ 1000 ตารางเมตรต่อกรัม) มีขนาดของรูพรุนที่เล็ก โครงสร้างมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น มีความแข็งแรงตามแนวแกนสูง ยืดหยุ่น และน้ำหนักเบา ด้วยสมบัตินี้จึงทำให้มีผู้สนใจศึกษาวิธีการผลิตเส้นใยที่มีขนาดนาโนเมตร ในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ เช่น ตัวกรอง (filter) วัสดุตรวจจับ (sensor) ชุดเกราะป้องกันสารเคมี (chemical protective armor) วัสดุปิดแผล (wound dressing) เป็นต้น (รูปที่ 1) นอกจากนี้เส้นใยนาโนยังมีสมบัติพิเศษทั้งทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ทั้งนี้ขึ้นกับวิธีและสารที่นำมาใช้สังเคราะห์ โดยมีหลายวิธีที่ใช้ในการผลิตเส้นใยระดับนาโน เช่น การดึงยืด (drawing) การสังเคราะห์แบบเทมเพลต (template synthesis) การแยกเฟส (phase separation) และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตหรืออิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning) ฯลฯ

ตัวกรอง วัสดุตรวจจับ วัสดุปิดแผล ชุดป้องกันสารเคมี

รูปที่ 1. แสดงการประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโน

3. เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

อิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคในการเตรียมวัสดุที่มีโครงสร้างนาโนแบบ 1 มิติ [2-3] โดยการฉีดลำของสารละลายหนืดหรือหลอมเหลวจากท่อออกมาเป็นเส้นใยบาง ซึ่งต่างจากกระบวนการฉีดเส้นใยแบบดั้งเดิมตรงที่ใช้อันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิตเป็นแรงขับดันแทนการดึงยืดเชิงกล โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะใช้ในการฉีดเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร

เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงได้มีขึ้นเมื่อ 70 ปีมาแล้ว โดยใช้ในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ [2] ซึ่งเส้นใยที่ได้ถูกนำไปใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ตัวตรวจจับ วัสดุกรอง ตัวเร่งปฏิกิริยา ชุดป้องกันสารเคมี วัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น [1] ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมาเตรียมเส้นใยเซรามิกและท่อระดับนาโน โดยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงได้รับการพัฒนาและขยายไปสู่การสังเคราะห์เส้นใยนาโนเซรามิกและคอมโพสิตหลายชนิด เช่น การสังเคราะห์วานาเดียมเพนทอกไซด์ (vanadiumpentoxide; V_2O_5) ไททาเนีย (titania; TiO_2) เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT) เป็นต้น [4] เนื่องจากวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเป็นวิธีที่ง่าย และสังเคราะห์เส้นใยได้หลากหลาย

การประดิษฐ์เส้นใยนาโนเซรามิกได้รับความสนใจมากขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 2002 [5] ซึ่งวิธีใหม่ที่ใช้ในการประดิษฐ์เส้นใยนาโนเซรามิกกันอย่างกว้างขวางนั้นทำได้โดยการใช้เทคนิคแบบดั้งเดิม 2 เทคนิคร่วมกัน ได้แก่ เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง และเทคนิคโซล-เจล โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงเป็นกระบวนการในการผลิตเส้นใยนาโนต่อเนื่องที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ในกระบวนการนี้สารละลายจะถูกฉีดจากเข็มโลหะโดยการให้สนามไฟฟ้า หลังจากนั้นจะเกิดการระเหยของตัวทำละลายและเกิดการโค้งงอของลำสารละลายแล้วเกิดเป็นเส้นใยนาโนบนผิววัสดุรองรับ ส่วนเทคนิคโซล-เจลนั้นเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมวัสดุนาโนเซรามิก (ซึ่งได้อธิบายหลักการไว้ในหัวข้อที่ 4.3) โดยพบว่าเทคนิคนี้มีประโยชน์อย่างมากในการเตรียมอนุภาคนาโนเซรามิกสำหรับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ฟิล์มบาง (thin film) วัสดุเคลือบผิว (coating) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) ตัวตรวจจับ (sensor) เป็นต้น

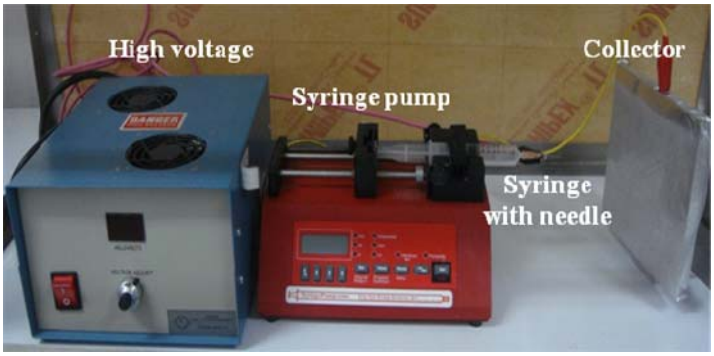
โดยทั่วไปเส้นใยนาโนเซรามิกที่ผลิตโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะเตรียมได้จากสารตั้งต้นเซรามิกในพอลิเมอร์ และทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง โดยการเตรียมสารตั้งต้นจะต้องมีการควบคุมเป็นพิเศษ เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ได้แก่ ความสามารถในการระเหยของตัวทำละลาย ความหนืด แรงตึงผิว การนำไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และอื่นๆ ซึ่งจะต้องมีความเหมาะสมกับระบบ บางครั้งอาจมีการเติมตัวทำละลายร่วมหรือสารเพิ่มเสถียรภาพลงไป (stabilizer) เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการฉีดสารละลาย [5]

3.1 หลักการทำงานของระบบอิเล็กโตรสปินนิง [2, 7-11]

การติดตั้งเครื่องอิเล็กโตรสปินนิงประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน [2] ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูง หัวฉีด และวัสดุรองรับที่นำไฟฟ้า โดยเข็มโลหะจะทำหน้าที่เป็นหัวฉีด และอลูมิเนียมฟอยล์ทำหน้าที่เป็นวัสดุรองรับ ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีความซับซ้อน ค่าใช้จ่ายน้อยและใช้งานได้สะดวก ทั้งนี้ในระบบที่มีการพัฒนาอาจจะเพิ่มอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของสารละลาย (syringe pump) ซึ่งจะทำให้อัตราการป้อนสารละลายคงที่ ทำให้การสังเคราะห์เส้นใยมีประสิทธิภาพโดยสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากขึ้น โดยมีวิธีการคือ จะบรรจุสารละลายที่ต้องการฉีดลงในหลอดฉีดยาพลาสติกที่ต่อกับเข็มโลหะ สำหรับการทดลองโดยเฉพาะการฉีดเส้นใยนาโนเซรามิกนั้นการติดตั้งเครื่องมือจะต้องทำในระบบปิด เนื่องจากอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและบรรยากาศได้ ส่วนวัสดุรองรับที่ใช้นั้นสามารถใช้วัสดุและรูปร่างได้หลากหลาย

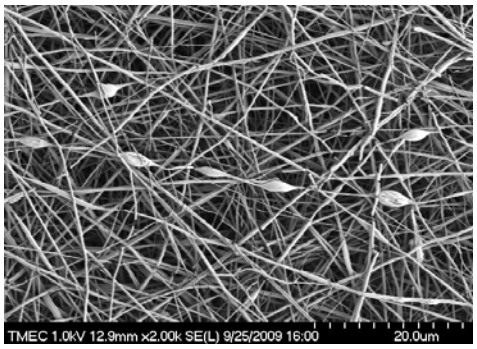
อิเล็กโตรสปินนิงเป็นเทคนิคที่ใช้พื้นฐานทางไฟฟ้าสถิต เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่ปลายเข็ม และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่ง แรงทางไฟฟ้าสถิตจะมากกว่าแรงตึงผิวและเกิดแรงขับลำสารละลายออกจากเข็ม โดยลำของสารละลายจะพุ่งและเกิดการบิดโค้งอย่างรวดเร็วออกมาเป็นลำยาวอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นเส้นใยบาง และสม่ำเสมอ เมื่อสารละลายเกิดการ

ระเหยอย่างรวดเร็วขณะกระบวนการฉีด เส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดลดลง ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็ก สุดท้ายเส้นใยจะไปเกาะบนวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงของนาโนเมตรถึงไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของสารละลายและปัจจัยในการฉีดอื่นๆ โดยการฉีดเส้นใยสามารถทำได้ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารตัวอย่างที่ใช้ [7-8]



รูปที่ 2. แสดงการติดตั้งเครื่องอิเล็กโตรสปินนิง

อย่างไรก็ตามการสร้างเส้นใยที่มีคุณภาพสูงนั้นจะต้องไม่เกิดปัญหาหลัก คือ การเกิดปม (bead) บนเส้นใย ดังรูปที่ 3 โดยเฉพาะเมื่อประดิษฐ์เส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งการกำจัดปมดังกล่าวกระทำได้ยาก โดยปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของเส้นใยได้แก่ ความหนืด แรงตึงผิว และความหนาแน่นของประจุสุทธิของสารละลาย โดยแรงตึงผิวนั้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนลำของเหลวให้กลายเป็นหยด ซึ่งจะลดพลังงานที่พื้นผิวลง ในทางกลับกันแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุพื้นผิวของลำสารละลายจะมีผลทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นลำบางๆมากกว่าการเกิดเป็นปม และแรงยืดหยุ่นเหนียวหนืด (viscoelastic) จะเป็นตัวต้านการคงรูปอย่างรวดเร็ว ซึ่งแรงหลักทั้ง 3 แรงนี้ จะเป็นตัวบอกถึงรูปแบบของผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยความเข้มสัมพัทธ์ของแรงนี้อาจเปลี่ยนขณะกระบวนการฉีดได้ เนื่องจากผลของการยืดตัวตามยาวของลำสารละลายและการระเหยของตัวทำละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อลำของสารละลายเบาบางลง แรงตึงผิวอาจชัดเจนมากกว่าแรงอื่นเป็นผลทำให้แรงตึงผิวมีอิทธิพลมากขึ้นในกระบวนการฉีด ทำให้เกิดเป็นปมขึ้นบนเส้นใย นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงสมบัติที่แตกต่างกันของสารละลายที่ใช้เมื่อนำเทคนิคนี้ไปใช้กับการเตรียมเส้นใยนาโนเซรามิก เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) มีผลต่อลำสารละลายและกระบวนการฉีด



รูปที่ 3. ลักษณะปมที่เกิดขึ้นบนเส้นใย

3.2 ขั้นตอนของกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

จะเห็นได้ว่าอิเล็กโตรสปินนิงเป็นวิธีสำหรับสังเคราะห์เส้นใยนาโนที่ง่ายและสะดวก แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างที่เส้นใยนาโนเกิดขึ้นนั้น มีปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องหลายปรากฏการณ์ โดยเฉพาะการบิดโค้งที่ไม่มีเสถียรภาพ (bending instability) ซึ่งส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร [9-10] ในปี ค.ศ. 2001 Koombhongse และคณะ [11] ได้สรุปให้เห็นถึงขั้นตอนสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงดังนี้

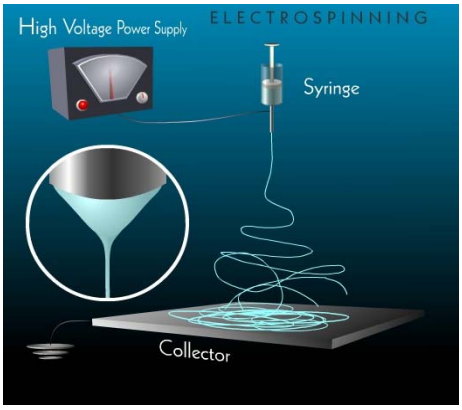
(1) การเกิดลำสารละลาย (jet initiation) ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเป็นลำดับแรก ภายหลังการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ ผิวของสารละลายจะถูกดึงเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ส่งผลให้สารละลายที่ปลายเข็มโลหะเปลี่ยนรูปร่างจากครึ่งทรงกลมเป็นรูปกรวยที่เรียกว่า “กรวยของเทเลอร์” (Taylor’s cone) ดังรูปที่ 4 และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นจนกระทั่งแรงทางไฟฟ้าสถิตมีค่ามากกว่าแรงตึงผิว จะทำให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (jet) จากปลายเข็ม ซึ่งถือว่าเป็นการเริ่มต้นของกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

(2) บริเวณโคน (base region) ในบริเวณโคนภายหลังการเกิดขึ้นของลำสารละลาย จะเกิดแรงทางไฟฟ้าเนื่องมาจากประจุ ส่งผลให้สารละลายมีการยืดออกโดยจะมีรูปร่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นกับลักษณะของการไหล รวมทั้งขึ้นกับระยะเวลา ซึ่งจะมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นกับสมบัติด้านความยืดหยุ่น (elasticity) ของสารละลาย

(3) ความไม่เสถียรของการบิดโค้ง (bending instability) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดภายหลังจากที่ลำของสารละลายได้ยืดออกมาห่างจากจุดเริ่มต้นระยะหนึ่งแล้ว จากรูปที่ 4 จะพบว่าสารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลาย และด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็ม

ถึงวัสดุรองรับ จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวจึงเกิดแรงที่ไม่สมดุล ทำให้ลำสารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อน ส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมาก และยิ่งรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็กลงและเกิดการระเหยของตัวทำละลายมากขึ้น ในที่สุดจึงเกิดเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร

(4) บริเวณวัสดุรองรับ (collection region) ในบริเวณนี้ลำของสารละลายจะไม่มีการยืดออกและเส้นใยที่เกิดขึ้นจะติดอยู่บนวัสดุรองรับ โดยเส้นใยอาจจะถูกรองรับด้วยแผ่นโลหะหรือถูกม้วนเก็บอย่างเป็นระเบียบ หรืออาจจะถูกรองรับด้วยน้ำหรือของเหลวอื่น แต่โดยทั่วไปจะนิยมใช้วัสดุที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า



รูปที่ 4. วิธีการสังเคราะห์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง [12]

4. การเตรียมเส้นใยนาโนเซรามิกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

4.1 กระบวนการทั่วไป [2,13]

การเตรียมเส้นใยนาโนเซรามิกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงจะเตรียมได้จากสารตั้งต้นทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการเตรียมเส้นใยเซรามิกแบบดั้งเดิม ซึ่งกระบวนการเตรียมประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่

(1) การเตรียมสารละลายที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ผสมเข้ากับเกลืออัลคอกไซด์ (alkoxide salt) หรือสารตั้งต้นเซรามิก

(2) การฉีดสารละลายให้เกิดเป็นเส้นใยนาโนคอมโพสิต ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ เมทริกซ์และสารตั้งต้น โดยการฉีดจะทำที่อุณหภูมิห้องที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมอย่างดี

(3) การแคลไซน์ การซินเตอร์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารตั้งต้นไปเป็นเซรามิกที่ต้องการที่อุณหภูมิสูง และนำสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดออกจากเส้นใย

4.2 ชนิดของสารตั้งต้น [2]

การเตรียมสารละลายตั้งต้นที่เหมาะสมนั้น สมบัติของสารเป็นกุญแจสำคัญในการเตรียมสำหรับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยมีสารตั้งต้นจำพวกออกไซด์หลากหลายชนิดที่นำมาใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโน ซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน Dan และคณะ [2] ได้ทำการเตรียมสารละลายอนินทรีย์ ด้วยการควบคุมความหนืดโดยอาศัยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่นของโลหะอัลคอกไซด์ ซึ่งใช้สำหรับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงได้โดยตรง โดยสามารถเตรียมเส้นใยจากไททาเนียม-ซิลิกอนไดออกไซด์ (TiO_2/SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($PbZr_xTi_{1-x}O_3$) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ได้สำเร็จด้วยวิธีการนี้ [2]

ถึงแม้ว่าเส้นใยของสารละลายอนินทรีย์จะค่อนข้างต่อเนื่องกันและสามารถเตรียมเส้นใยเซรามิกจากออกไซด์ได้หลากหลาย แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้มักจะมากกว่าหลายร้อยนาโนเมตร นอกจากนี้ความสามารถในการควบคุมขนาดและรูปแบบของเส้นใยนาโนยังค่อนข้างจำกัด เพราะการควบคุมสมบัติของสารละลายให้ถูกต้องแม่นยำและคงที่นั้นทำได้ยาก เนื่องจากสารละลายอนินทรีย์เป็นระบบที่ไม่เสถียรในการควบคุมความร้อน โดยความหนืดของสารละลายจะเปลี่ยนตามระยะเวลาในการแช่ (aging) ซึ่งเป็นการยากในการฉีดเส้นใยให้ออกมาเป็นรูปแบบเดียวกันอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังอาจต้องใช้เวลานาน (หลายวันหรือเป็นสัปดาห์) ในการเตรียมสารละลายสำหรับการฉีด

นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาปรับปรุงวิธีการฉีดเส้นใยนาโนเซรามิกที่ต่อเนื่องกันด้วยการควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยในการเตรียมสารละลายสำหรับฉีดจะมีการเติมพอลิเมอร์ลงไปเพื่อควบคุมสมบัติของสารละลาย โดยพอลิเมอร์ที่ใช้จะสามารถละลายได้ทั้งในอัลกอฮอล์และน้ำ เช่น พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ซึ่งจะทำให้มีความสะดวกมากขึ้นในการเตรียมสารละลายเนื่องจากสารตั้งต้นและพอลิเมอร์สามารถละลายร่วมกันได้ในอัลกอฮอล์ ที่สำคัญไปกว่านั้นยังมีความเสถียรพอที่จะสามารถผลิตเส้นใยนาโนได้อย่างต่อเนื่องจากชั่วโมงเป็นวันได้

นอกจากพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) แล้วยังสามารถใช้พอลิไวนิลอัลกอฮอล์ (PVA) พอลิไวนิลอะซิเตท (PVAc) และพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ได้อีกด้วย โดยทั้งหมดนี้จะทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ของสารตั้งต้นอนินทรีย์พวกโลหะออกไซด์

เนื่องจากความสามารถในการฉีดของสารละลายจะถูกกำหนดโดยพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในกระบวนการเตรียมออกไซด์ต่างชนิดกันไปเป็นเส้นใยนาโน แต่พบปัญหาคือโลหะอัลคอกไซด์หรือเกลือบางชนิดไม่เข้ากันกับพอลิเมอร์ โดยขณะผสมจะเกิดการตกตะกอนออกมาจากสารละลาย ซึ่งปัญหานี้

สามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนอัลคอกไซด์หรือเติมสารตัวเติมที่เหมาะสมลงในสารละลาย เช่น เมื่อเติมอะซิติลอะซิโตน (acetylacetone) และกรดอะซิติก (acetic acid) ปริมาณเล็กน้อยลงไปจะสามารถเตรียมสารละลายให้ใสได้ ซึ่งสามารถใช้วิธีนี้ในการเตรียมเส้นใยนาโนของออกไซด์ต่างๆได้หลากหลาย โดยมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้นำวิธีการนี้มาปรับใช้ในการผลิตเส้นใย นาโนสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ และยังได้มีการศึกษาการใช้สารตั้งต้นที่เป็นเกลือทั่วไปแทนเกลืออัลคอกไซด์ที่มีราคาแพงในการเตรียมเซรามิกอีกด้วย

โดยงานส่วนใหญ่ของการเตรียมเส้นใยเซรามิกด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงนั้นจะเน้นการเตรียมจากออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมเส้นใยนาโนเซรามิกที่ไม่ใช่ออกไซด์ก็สามารถทำได้ ถ้ามีสารตั้งต้นและบรรยากาศในการเผาแคลไซน์ที่เหมาะสม

4.3 กระบวนการโซล-เจล [2]

กระบวนการเตรียมแบบโซล-เจล (sol-gel) เป็นกระบวนการเตรียมเชิงเคมีประเภทหนึ่งที่ได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพ และนอกจากนี้ยังสามารถนำไปดัดแปลงประยุกต์ใช้งานในการผลิตวัสดุได้หลายรูปแบบ โดยการผลิตวัสดุนาโนจากวิธีโซล-เจล ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตเซรามิกทั่วไป และได้ถูกพัฒนาสำหรับการเตรียมเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำในรูปของการเคลือบผิว (coating) ฟิล์มบาง (thin film) และเส้นใย (fiber) ในการนำไปใช้งานต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) แบตเตอรี่ (battery) ตัวตรวจจับ (sensor) อุปกรณ์ไฟฟ้า (electronics) และอุปกรณ์ทางแสง (optic) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคโซล-เจลได้ถูกนำมาใช้ควบคู่กับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงในการผลิตเส้นใยนาโนเซรามิกและท่อนาโนที่มีการควบคุมสัดส่วน ขนาด และรูปร่างได้

ในการเลือกใช้สารละลายนั้น ส่วนใหญ่มักจะใช้สารละลายของสารประกอบโลหะอินทรีย์ เช่น โลหะอัลคอกไซด์ ที่อยู่ในแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยโลหะอัลคอกไซด์เหล่านี้มีสูตรทั่วไปว่า $M(OR)_x$ ซึ่งอาจจะได้มาจากไฮดรอกไซด์ของโลหะ $M(OH)_x$ หรือจากแอลกอฮอล์ (ROH) ที่มี R เป็นสารในกลุ่มแอลคีนและมีโลหะ M เข้าไปอยู่แทนที่ไฮดรอกซิลโปรตอน

โดยอาศัยการกวนให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องเพียงเล็กน้อย (ปกติจะใช้อุณหภูมิประมาณ 50-90 °C) ซึ่งจะต้องมีความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา และค่า พีเอชของสารละลายที่เหมาะสม จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการควบแน่น (condensation) แล้วได้สายโซ่พอลิเมอร์ออกมา

ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ใช้โลหะที่มีเวเลนต์อิเล็กตรอนเท่ากับสี่ (M^{4+}) อาจจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นดังนี้

ไฮโดรไลซิส: $M(OR)_4 + H_2O \longrightarrow M(OR)_3O + ROH$ (1)

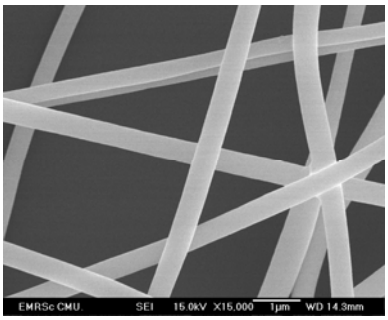
การควบแน่น: $M(OR)_3OH + M(OR)_4 \longrightarrow (OR)_3\text{-}O\text{-}M\text{-}(OR)_2 + ROH$ (2)

การเกิดเป็นพอลิเมอร์โดยอาศัยกลไกการแยกสลายด้วยน้ำและการควบแน่น แล้วเกิดมีการเชื่อมต่อข้ามสายจนเกิดการพันกันเป็นโครงข่ายสามมิติ จะทำให้สารผสมมีความหนืดสูงมากขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาพที่เรียกว่า เจล

ในกระบวนการเตรียมโซล-เจลนั้น การเตรียมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันและเกิดเป็นโซลหรือเจลที่เสถียรนั้นทำได้ยาก เนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และการควบแน่น (condensation) ของโลหะหรือเกลืออัลคอกไซด์ (alkoxide salt) ถ้าสารตั้งต้นตั้งแต่ 2 ชนิด มีอัตราการเกิดปฏิริยาไฮโดรไลซิสที่ต่างกันจะทำให้การควบคุมความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) ของโซลทำได้ยาก โดยจะเกิดการแยกเฟส (phase) ในระบบขึ้น ซึ่งปัญหานี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงนั้น ปฏิกิริยาของโซล-เจลได้แก่ ไฮโดร ไลซิส (hydrolysis) การควบแน่น(condensation) และการเกิดเจล (gelation) จะถูกจำกัดในบริเวณเล็กๆ (บนลำของสารและเส้นใยนาโน) อีกทั้งเนื่องจากการโค้งงออย่างรวดเร็วและการดึงยืดของ ลำสารละลาย ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายในลำสารละลายระเหยอย่างรวดเร็ว และองค์ประกอบอื่นๆจะแข็งตัวแล้วคงอยู่ในเส้นใย ซึ่งสามารถป้องกันหรือลดการแยกเฟสขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้

4.4 การควบคุมกระบวนการฉีดสาร [2]

การทำงานพื้นฐานในการเตรียมอิเล็กโตรสปินนิงของสารละลายตั้งต้นเซรามิกและสารละลายพอลิเมอร์นั้นมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาบางชนิด เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาควบแน่น และการเกิดเจล ของสารตั้งต้นเซรามิกมักมีผลต่อกระบวนการฉีด จึงต้องมีการควบคุมเป็นพิเศษเพื่อให้กระบวนการเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ปัญหาหนึ่งที่พบในการฉีดเส้นใยได้แก่ การอุดตันของหัวฉีด และเส้นใยที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งปัญหานี้มักเกิดจากการควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราในการเกิดเจลของสารตั้งต้น เซรามิกได้ไม่ดี ถ้าการเกิดเจลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะฉีดสารละลายจะทำให้ลำของสารละลายสามารถดึงยืดได้น้อย ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่หนาหรือเกิดการอุดตันของหัวฉีดขึ้นได้ ซึ่งมี 2 วิธีที่จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ วิธีแรกคือการเปลี่ยนสารตั้งต้นหรือการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในสารละลาย เพื่อควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราในการเกิดเจล อีกวิธีคือการควบคุมสภาพแวดล้อมรอบๆ ลำสารละลาย โดยบรรยากาศที่มีความชื้นน้อยหรืออิ่มด้วยไอของตัวทำละลายจะสามารถลดอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และอัตราเร็วในการเกิดเจลได้ และยังทำให้การฉีดสารละลายทำได้ต่อเนื่องง่ายขึ้น



รูปที่ 5. แสดงโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย (PZ/PEO) ที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

5. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง [14-17]

เส้นใยที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง มีลักษณะได้หลายรูปแบบ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตลอดจนความต่อเนื่องของเส้นใยแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ในปี ค.ศ. 2005 Ramakrishna และ Fujihara [14] ได้แบ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อลักษณะเส้นใยออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

5.1 สมบัติของสารละลาย

5.1.1 มวลโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย (molecular weight and solution viscosity)

พอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีมวลโมเลกุลสูงพอ และสารละลายต้องมีความหนืดมากพอด้วย ซึ่งมวลโมเลกุลที่สูงจะทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่มากขึ้น ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามสารละลายที่มีความหนืดมากเกินไปจะควบคุมการไหลได้ยาก และอาจเกิดปัญหาการแห้งตัวอย่างรวดเร็วที่ปลายเข็มโลหะ

5.1.2 แรงตึงผิว (surface tension)

ในขณะที่สารละลายยืดออกเป็นเส้นใยอาจพบปมเกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงตึงผิวได้ ในกรณีที่สารละลายมีความหนืดน้อยโมเลกุลของตัวทำละลายที่ไม่ได้จับกับโมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้จับตัวกันเป็นก้อนทรงกลมเนื่องจากแรงตึงผิว

5.1.3 สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity)

ถ้าสารละลายมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีจะส่งผลให้มีประจุเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าอาจทำได้โดยการเติมไอออน (ion) ดังนั้นหากเติมเกลืออิเล็กโตรไลต์ลงในสารละลายจะทำให้สารละลายยืดออกได้ดีขึ้น ซึ่งสามารถลดการเกิดปมในเส้นใยลงได้ อีกทั้งยังทำให้ขนาดของเส้นใยลดลงได้อีกด้วย

5.1.4 ค่าไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

ถ้าสารละลายมีสมบัติไดอิเล็กทริกสูงจะช่วยลดการเกิดปมและขนาดของเส้นใยลงได้ ดังนั้นอาจเติมตัวทำละลายที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงลงในสารละลาย แต่อย่างไรก็ตามการเติมตัวทำละลายที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูงในสารละลายต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้หรือสมบัติการละลายด้วย

5.2 ตัวแปรในระบบ

5.2.1 ศักย์ไฟฟ้า (voltage)

หากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามาก จะส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง อีกทั้งยังทำให้สารละลายระเหยได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการเกิดปม โดยปมจะเปลี่ยนรูปร่างจากทรงคล้ายลูกรักบี้ (spindle-like) เป็นรูปทรงกลมและมีจำนวนมากขึ้น

5.2.2 อัตราการไหลของสารละลาย (flow rate)

ถ้าอัตราการไหลมีค่ามากจะทำให้เส้นใยและปมมีขนาดใหญ่มากขึ้น อีกทั้งการเพิ่มอัตราการไหลที่มากเกินไปปริมาณสารละลายจะออกมามาก ส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยออกไม่ทัน ทำให้เส้นใยหลอมรวมกันเป็นแผ่น

5.2.3 อุณหภูมิของสารละลาย

ถ้าอุณหภูมิของสารละลายสูงจะเพิ่มอัตราการระเหยให้สูงขึ้น แต่จะลดความหนืดให้น้อยลง เมื่อสารละลายมีความหนืดน้อยผลของแรงคูลอมบ์จะมากขึ้น ทำให้ขนาดของเส้นใยลดลง

5.2.4 วัสดุรองรับ (collector)

วัสดุรองรับควรมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แผ่นอะลูมินัมฟอยล์ (aluminum foil) หากวัสดุรองรับเป็นฉนวนไฟฟ้า ประจุบนลำของสารละลายจะสะสมบนวัสดุรองรับทำให้เกิดเส้นใยบนวัสดุรองรับน้อยลง นอกจากนี้หากวัสดุรองรับถูกทำให้เคลื่อนที่ได้จะทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และยังช่วยให้ตัวทำละลายระเหยได้ดียิ่งขึ้น

5.2.5 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ (distance between tip and collector)

ในกรณีที่ระยะห่างมีค่าน้อยเส้นใยจะเชื่อมต่อกันเนื่องจากตัวทำละลายระเหยออกไม่ทัน และยังพบปมเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากผลของสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากขึ้นเนื่องจากวัสดุรองรับอยู่ใกล้ปลายเข็ม และในกรณีที่ระยะห่างมีค่ามากขึ้นเส้นใยจะมีขนาดเล็กลงเนื่องจากลำของสารละลายมีเวลาในการยืดออกนานขึ้น

5.2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ (diameter of needle)

เข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูภายในเล็กจะช่วยลดการอุดตันที่ปลายเข็ม เนื่องจากสารละลายสัมผัสกับอากาศน้อยกว่าเข็มที่มีรูขนาดใหญ่ อีกทั้งยังช่วยให้ปริมาณปมลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ตามเข็มที่มีขนาดเล็กเกินไปอาจไม่สามารถทำให้สารละลายไหลออกมาได้

5.3 สภาพแวดล้อม

5.3.1 ความชื้น (humidity)

ปริมาณความชื้นในอากาศอาจส่งผลต่อเส้นใยได้ [17] ในกรณีที่มีความชื้นสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับมีการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้ลักษณะของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลง และเกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณมากขึ้น ในทางตรงข้ามหากระบบมีความชื้นต่ำจะส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยเร็วขึ้น ในบางครั้งสารละลายอาจแข็งตัวอย่างรวดเร็วและอุดตันอยู่ภายในเข็มโลหะ

5.3.2 ชนิดของบรรยากาศ (type of atmosphere)

ส่วนประกอบของอากาศภายในระบบส่งผลต่อกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง โดยแกสต่างชนิดกันจะมีพฤติกรรมต่างกันออกไป ภายใต้สภาวะที่มีสนามไฟฟ้าสูง ตัวอย่างเช่น แกสฮีเลียมจะแตกตัวภายใต้สภาวะสนามไฟฟ้าสูงส่งผลให้กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงไม่เกิดขึ้น แต่ถ้าใช้ก๊าซที่แตกตัวได้ยากขึ้น เช่น ฟรีออน 12 (freon®-12) พบว่ากระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงสามารถเกิดขึ้นได้ โดยเส้นใยจะมีขนาดใหญ่ขึ้น 2 เท่า เมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ในสภาวะอากาศปกติ

5.3.3 ความดัน (pressure)

การสังเคราะห์เส้นใยที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะส่งผลให้สารละลายไหลออกจากหลอดบรรจุสารมากขึ้น ทำให้ลำสารละลายที่พุ่งออกมาไม่เสถียร และหากความดันในระบบต่ำมากๆ จะไม่เกิดกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงขึ้น เนื่องจากประจุไฟฟ้ามีการคายประจุโดยตรงภายในระบบ

6. การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโนที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงนั้นมีความหลากหลาย เนื่องจากได้รับการศึกษาและพัฒนาจากกลุ่มวิจัยทั่วโลก ซึ่งครอบคลุมทั้งเส้นใยพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากปิโตรเคมีและธรรมชาติ และเส้นใยที่เป็นเซรามิกหรือคอมโพสิต ทำให้การนำเส้นใยเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ขยายวงกว้างสู่เทคโนโลยีด้านต่างๆ โดยในปี ค.ศ. 2003 Huang และคณะ [18] ได้ทำการรวบรวมตัวอย่างการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนไว้ โดยแบ่งเป็น

- ด้านการแพทย์และสุขภาพ เช่น อวัยวะเทียม (medical prostheses) โครงร่างรองรับของเนื้อเยื่อ (tissue template) วัสดุปิดแผล (wound dressing) เวชภัณฑ์ เป็นต้น
- ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น นำมาใช้สร้างระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูง นำมาทำระบบบำบัดน้ำเสียที่มีพิษได้ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น
- ด้านวัสดุศาสตร์ เช่น การนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ได้แก่ เส้นใยนาโนคาร์บอน เป็นต้น
- ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน เช่น ตัวตรวจจับก๊าซ (gas sensor) ตัวตรวจจับความร้อน (thermal sensor) ส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไวต่อสีย้อม (dye-sensitized solar cell) เป็นต้น
- การประยุกต์ใช้ทางการทหาร เช่น ชุดปกป้องร่างกายจากเชื้อโรคหรือก๊าซพิษ

เอกสารอ้างอิง

[1] Chronakis, I.S., 2005. Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process – A review. *J. Mater. Proc. Technol.,* 167, 283-293.

[2] Dan, L., Jesse, T. M. and Younan, X., 2006. Electrospinning: A simple and versatile technique for producing ceramic nanofibers and nanotubes. *J. Am. Ceram. Soc.,* 89(6), 1861-1869.

[3] Yuh, J., Perez, L.W., Sigmund, M.J. and Nino, C., 2007. Sol-gel based synthesis of complex oxide nanofibers. *J. Sol-Gel Sci. Technol.,* 42, 323-329.

[4] Maensiri, S., Nuansing, W., Klinkaewnarong, J., Laokul, P. and Khemprasit, J., 2006. Nanofibers of barium strontium titanate (BST) by sol-gel processing and electrospinning. *J. Colliod Interface Sci.,* 297, 578-583.

[5] Ramaseshan, R., Sundarrajan, S. and Jose, R., 2007. Applied physics reviews–focused review. *J. Appl. Phys.,* 102, 111101.

[6] Ju, Y.-W., Park, J.-H., Jung, H.-R., Cho, S.-J. and Lee, W.-J., 2008. Fabrication and characterization of cobalt ferrite ($CoFe_2O_3$) nanofibers by electrospinning. *Mater. Sci. Eng.,* B147, 7-12.

[7] Gupta, P. and Wilkes., G.L., 2003. Some investigations on the fiber formation by utilizing a side-by-side bicomponent electrospinning approach. *Polymer,* 2003, 44, 6353-6359.

[8] Teo, W. E. and Ramakishna, S., 2006. A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. *Nanotechnology,* 17, R89-R106.

[9] Leslie, Y.Y. and James, R.F., 2006. Electrospinning carbon nanotube polymer composite nanofibers. *J. Experimental Nanosci.,* 1(2), 177-209.

[10] Rutledge, G.-C. and Fridrikh, S.-V., 2007. Formation of fibers by electrospinning. *Adv. Drug Delivery Reviews,* 59, 1384-1391.

[11] Koombhongse, S. Liu, W. and Reneker, D.-H., 2001. Flat polymer ribbons and other shapes by electrospinning. *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.,* 39, 2598-2606.

[12] Available at: http://www.nano.mtu.edu/electrospinning_start.html.

[13] Wolfgang, S., Juhan, Y., Hyun, P., Vasana, M., Georgios, P., Amit, D., Joshua, T. and Juan, C.N., Processing and structure relationships in electrospinning of ceramic fiber systems. *J. Am. Ceram. Soc.,* 89(2), 395-407.

[14] Ramakrishna, S. and Fujihara, K., 2005. An introduction to electrospinning and nanofibers. Singapore, 44.

[15] Subbiah, T., Bhat, G.-S., Tock, R.-W., Parameswaran, S. and Ramkumar, S.-S., 2005. Electrospinning of nanofibers. *J. Appl. Polym. Sci.,* 96, 557-569.

[16] Lagoudas. N. Electrospinning of continuous piezoelectric yarns for composite application, thesis, Aerospace Engineering, Taxas A&M University.

[17] Xi-Wen., Z., 2008. Fabrication of crystalline bismuth-substituted yttrium iron garnet nanofibers via sol-gel and calcinations-assised electrospinning. *J. Cryst. Growth,* 310, 3235-3239.

[18] Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M. and Ramakrishna, S., 2003. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Compos. Sci. Technol.,* 63, 2223-2253.