

## บทความวิชาการ

### การผลิตเส้นใยนาโนจากวัสดุชีวภาพด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต Production of Nanofibers from Biomaterials Using Electrospinning Technique

กอบศักดิ์ กาญจนางค์กุล\*  
Kobsak Kanjanapongkul\*

#### บทนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายทั้งจากวงการอุตสาหกรรมและในวงการศึกษา ครอบคลุมทั้งในระดับองค์กรไปจนถึงระดับบุคคลทั่วไป คำว่านาโนเทคโนโลยีเป็นศาสตร์ที่รวมถึงการศึกษาและพัฒนาวัสดุที่มีโครงสร้างที่มีขนาดประมาณ 100 นาโนเมตรลงไป [1] โดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ผลิตวัสดุนาโนที่มีโครงสร้างเป็นเส้นยาว [2] จุดเด่นที่ทำให้เทคนิคนี้ได้รับความสนใจมีอยู่หลายประการ เช่น ความสะดวกในการผลิตเนื่องจากใช้อุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน ความยืดหยุ่นในการเลือกใช้วัตถุดิบตั้งต้น และที่สำคัญต้นทุนพลังงานต่ำ เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการผลิตเส้นใยโดยตรง (คิดเฉพาะที่ใช้ในชุดผลิตเส้นใยเท่านั้น) มีขนาดปกติอยู่ในช่วง 5-50 วัตต์เท่านั้น บทความนี้จะได้กล่าวถึงหลักการของการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะช่วยให้ผู้อ่านเข้าใจพื้นฐานของการเกิดเส้นใยนาโน จากนั้นจะนำเสนอตัวอย่างวัสดุชีวภาพที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเส้นใยนาโน และท้ายที่สุดจะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนและทิศทางการพัฒนาของเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต อย่างสั้นๆ โดยผู้อ่านที่สนใจในรายละเอียดอาจทำการสืบค้นข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่ให้ไว้ในตอนท้ายก็จะช่วยให้มีความเข้าใจมากขึ้นได้

#### การผลิตเส้นใยนาโนโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ความจริงแล้วเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ได้ถูกคิดค้นเป็นเวลานานกว่า 100 ปีแล้ว [2] แต่การศึกษาวิจัยเรื่องการผลิตเส้นใยนาโนในระยะนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร ต่างกับปัจจุบันที่เทคนิคนี้ได้ถูกศึกษาอย่างกว้างขวาง ทั้งในเรื่องทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับ

ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อลักษณะเส้นใย การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [3] และการทดลองประยุกต์ใช้ฟิล์มที่ผลิตจากเส้นใยนาโนในด้านต่างๆ สาเหตุอาจจะเป็นเพราะสมบัติพิเศษของเส้นใยนาโนที่ผลิตได้ เช่น การมีความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะต่อปริมาตรสูง ความยืดหยุ่นและความหลากหลายของวัตถุดิบที่นำมาใช้ [1] รวมทั้งการใช้ต้นทุนพลังงานในการผลิตเส้นใยที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้รับความสนใจเป็นอย่างมากไม่เฉพาะจากคนในวงการศึกษาและวิจัยเท่านั้น [4] แต่ยังรวมไปถึงบริษัทยักษ์ใหญ่ในวงการอาหาร เช่น บริษัท PepsiCo ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้ให้ทุนวิจัยแก่ผู้เขียนในการวิจัยเรื่องการทำปฏิกิริยาเคมีในเส้นใยนาโนเพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติวัสดุในอาหาร และอยู่ในระหว่างการดำเนินการจดสิทธิบัตร (รายละเอียดไม่สามารถเปิดเผยได้) ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเส้นใยนาโนรวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดเส้นใยเพื่อความเข้าใจ

#### หลักการของการเกิดเส้นใยนาโน

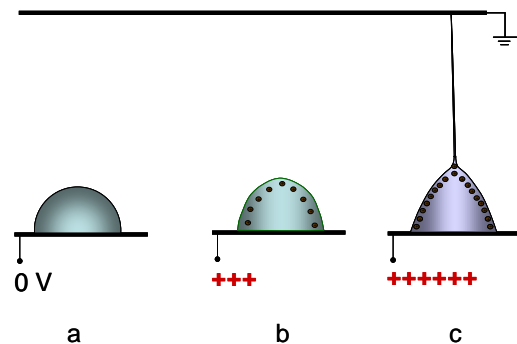


Figure 1 Taylor cone formation during electrospinning

การเกิดเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ต้องอาศัยแรงไฟฟ้าสถิตที่อยู่ภายในสารละลาย โดยสามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายๆ ตาม Figure 1 ดังนี้ สมมติว่าในระบบที่เราสนใจประกอบด้วยแผ่นโลหะสองแผ่น แผ่นแรกวางบนพื้นราบและแผ่นที่สองอยู่เหนือแผ่นแรก หากเราทดลองหยดสารละลายโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งลงไปบนแผ่นโลหะที่วางบนพื้นในแนวราบ โดยปกติผลของน้ำหนักของหยดสารละลายมีน้อยกว่าแรงดึงดูดผิวมากๆ หยดสารละลายจะมีลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลมตามแสดงใน Figure 1a

แต่หากเราทำให้ศักย์ไฟฟ้าของแผ่นโลหะสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าของแผ่นโลหะแผ่นที่สอง หยดสารละลายจะค่อยๆ เปลี่ยนรูปเป็นลักษณะคล้ายกรวยกลมที่มีปลายชี้ขึ้นไปทางแผ่นโลหะแผ่นที่สอง (Figure 1b) สาเหตุที่หยดสารละลายมีการเปลี่ยนรูปร่างก็เนื่องมาจากแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าที่มีขั้วเหมือนกันภายในหยดสารละลายนั่นเอง

เมื่อเราเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าของแผ่นโลหะขึ้นไปเรื่อยๆ ปลายแหลมของรูกรวยกลมจะชัดเจนขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งซึ่งแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดึงดูดผิวของสารละลาย ที่จุดนี้หยดของสารละลายจะกลายเป็นรูปทรงที่รู้จักกันดีในชื่อ Taylor cone [2, 5] และจะเกิดสายของสารละลายโพลิเมอร์ซึ่งนิยมเรียกว่า Polymer jet พุ่งขึ้นไปยังแผ่นโลหะแผ่นที่สอง (Figure 1c) ในระหว่างที่ Polymer jet ลอยอยู่ในอากาศ แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในสารละลายก็จะทำให้ polymer jet ถูกยืดออกจนมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรภายในระยะเวลาไม่กี่มิลลิวินาทีเท่านั้น โดยการยืดของเส้นใยจะเกิดได้เฉพาะในช่วงเวลาที่ Polymer jet อยู่ในอากาศเท่านั้น (นิยมเรียกว่า Flying time) ในระยะแรก Polymer jet จะพุ่งจากปลายหัวฉีดไปยังแผ่นเก็บเส้นใยในแนวเส้นตรง (เรียกช่วงนี้ว่า Stable jet) แต่หลังจากนั้นจะมีการแกว่งเป็นวงรอบด้วยความเร็วสูง (เรียกช่วงนี้ว่า Whipping jet) [6,7] ด้วยการแกว่งนี้เอง ทำให้ Polymer jet มี Flying time มากขึ้นและมีขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็ว ตัวทำละลายที่อยู่ใน polymer jet

เหล่านี้จะระเหยอย่างรวดเร็วระหว่างที่อยู่ในอากาศ ทำให้ polymer jet แห้งกลายเป็นเส้นใยเก็บอยู่บนแผ่นโลหะที่ 2 หากกระบวนการนี้เกิดต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนานพอสมควร จะเกิดการสะสมทับกันของเส้นใย จนกลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใยนาโนนั่นเอง โดยปกติเราจะเรียกฟิล์มที่ผลิตโดยเทคนิคนี้ว่า Electrospun film หรือ Electrospun mat

### อุปกรณ์ที่จำเป็นและการทำงาน

Figure 2 แสดงถึงอุปกรณ์อย่างง่ายที่ใช้ในการผลิตเส้นใยโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยมีลำดับขั้นตอนในการผลิตเส้นใยดังนี้

1. สารละลายโพลิเมอร์ที่เตรียมไว้สำหรับผลิตเป็นเส้นใยจะถูกบรรจุในกระบอกฉีดที่ทำจากแก้วหรือพลาสติก (ขนาดที่ใช้โดยปกติมีขนาดตั้งแต่ 5-30 ซีซี) บั๊มจะทำหน้าที่จ่ายสารละลายผ่านท่อส่งสารละลายไปยังหัวฉีดในอัตราการไหลที่เหมาะสม (ปกติมีค่าประมาณ 5-40 ไมโครลิตรต่อนาที)
2. ปลายหัวฉีดจะถูกต่อเข้ากับสายไฟฟ้าแรงสูงของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงเพื่อทำให้สารละลายโพลิเมอร์ที่อยู่ในหัวฉีดมีศักย์ไฟฟ้าแรงสูงด้วย ทั้งนี้ตัวหัวฉีดมักจะมีสองส่วนหลักคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนตัวเชื่อมทำหน้าที่เป็นโครงสร้างเชื่อมต่อระหว่างท่อส่งสารละลายกับหัวฉีด และส่วนที่สองคือส่วนหัวฉีดจริงๆ ซึ่งมักทำจากวัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเล็กทำจากวัสดุนำไฟฟ้าเช่น เซม stainless ขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร เป็นต้น
3. ที่ด้านตรงกันข้ามกับหัวฉีดจะมีแผ่นเก็บเส้นใยวางอยู่ ศักย์ไฟฟ้าของแผ่นเก็บเส้นใยนี้จะถูกทำให้เป็นศูนย์เมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าของหัวฉีดโดยการเชื่อมต่อแผ่นเก็บเส้นใยกับสายดินของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง
4. เมื่อเปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง หยดสารละลายโพลิเมอร์ที่ถูกขับออกมาที่ปลายหัวฉีดโดยบั๊ม จะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นเก็บเส้นใย ทำให้เกิดการเปลี่ยน

รูปร่างเป็น Taylor cone และเกิดเป็น Polymer jet ตามลำดับดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.1 แล้ว

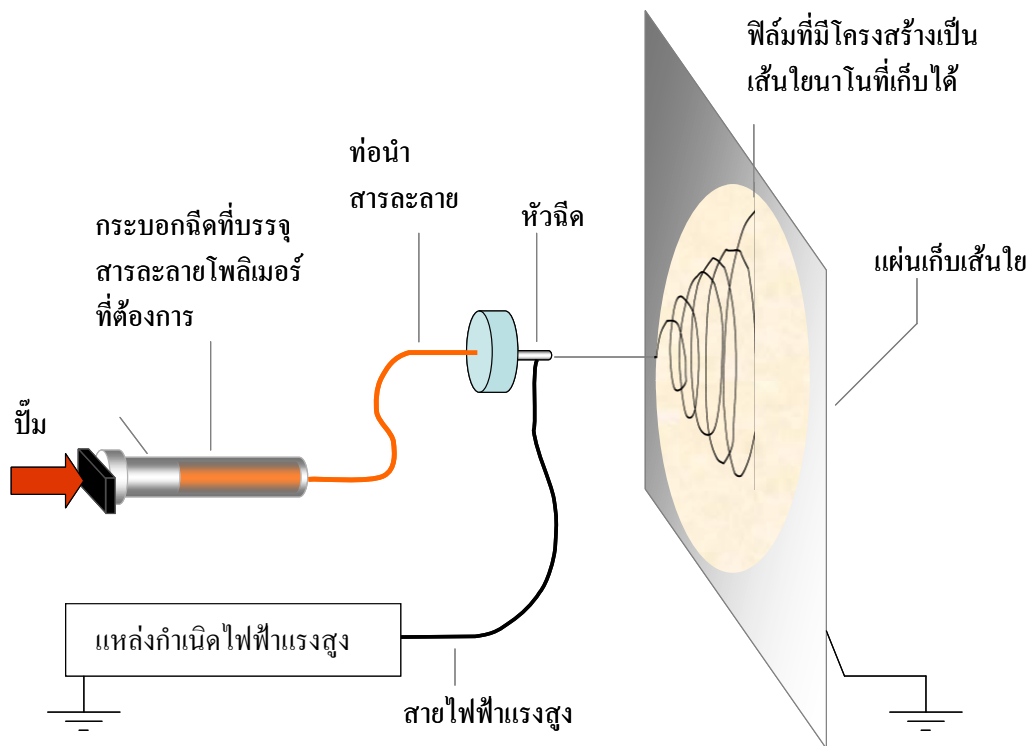


Figure 2 General equipments used in electrospinning

### ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเส้นใย

แม้กระบวนการผลิตเส้นใยโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จะใช้อุปกรณ์ง่ายๆ เพียงไม่กี่ชิ้นตามที่ได้ อธิบายไปแล้ว แต่กลไกการเกิดเส้นใยนั้นมีความซับซ้อน เพราะการสร้างเส้นใยให้มีลักษณะที่สมบูรณ์ตาม ต้องการต้องอาศัยความสมดุลระหว่างแรงทางไฟฟ้า แรงตึงผิวและแรงต้านจากความหนืดของสารละลาย อัตราการระเหยของตัวทำละลาย ในส่วนย่อยนี้จะได้ อธิบายถึงปัจจัยหลักที่มีผลสำคัญต่อลักษณะของเส้นใย นาโนที่ผลิตโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

#### 1. ความเข้มข้นของโพลิเมอร์

เราสามารถกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นของ โพลิเมอร์ในสารละลายมีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ต่อ ลักษณะเส้นใย[8] ทั้งในเรื่องของขนาด และสัณฐานของ เส้นใย ความเข้มข้นของโพลิเมอร์ในสารละลายมีผล

โดยตรงต่อความหนืดของสารละลาย และความหนืดนี้เองที่จะเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อลักษณะเส้นใย ตามที่ ได้ อธิบายแล้วว่า ในขณะที่ Polymer jet อยู่ในอากาศ จะมีแรงทางไฟฟ้าที่ยึดสาย Polymer jet ออกให้มี ขนาดเล็กกลง หากสารละลายมีความหนืดที่ต่ำเกินไป แรงทางไฟฟ้าอาจจะทำให้สาย Polymer jet แยกออกจากกันกลายเป็นหยดเล็กๆ แทนที่จะเป็นสาย ต่อเนื่องกันก็เป็นได้ ในทางตรงกันข้าม หากความหนืด ของสารละลายมากเกินไป ความหนืดจะต้านไม่ให้ Polymer jet ถูกยืดออกได้ง่ายนัก ผลก็คืออาจได้เส้นใย ที่มีขนาดใหญ่เกินไป ดังนั้น การเตรียมสารละลายที่ ความหนืดที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะ ต่อเนื่องไม่ขาดและมีขนาดที่ต้องการ แต่คำถามที่สำคัญ ก็คือ แล้วจะเตรียมสารละลายให้มีความหนืดเท่าไรจึง จะเหมาะสม

เพื่อตอบคำถามนี้ เราจำเป็นต้องเข้าใจถึงความหมายของคำว่า Polymer chain entanglement (PCE) ซึ่งแปลตรงๆ ได้ว่าการเกี่ยวพันกันของสายโพลิเมอร์ ปรากฏการณ์ PCE เป็นปรากฏการณ์ที่สายโพลิเมอร์ในสารละลายมีการเกี่ยวพันกันทางกายภาพทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความหนืดอย่างรวดเร็ว ซึ่ง PCE จะเกิดก็ต่อเมื่อความเข้มข้นของโพลิเมอร์ในสารละลายมีค่าสูงเกินค่าๆ หนึ่งเท่านั้น ตัวอย่างที่ผู้เขียนมักใช้เพื่ออธิบายให้เห็นถึงผลของ PCE อย่างง่ายๆ คือ ให้อลองนิกถึงแก้วที่มีน้ำเชื่อมที่มีปริมาณเส้นเชือกต่างกันไป ในตอนเริ่มต้นมีเส้นเชือกอยู่เล็กน้อยมากๆ ประมาณ 3-4 เส้น หากเอาหลอดคาแฟคนในจะพบว่าแทบจะไม่มีแรงต้านทานเลย สารละลายที่มีสภาพเช่นนี้เรียกว่าสารละลายเจือจาง (Dilute solution) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นเข้าไปเรื่อยๆ จะพบว่าคนหลอดได้ยากขึ้นเนื่องจากเส้นเชือกเริ่มต้านการเคลื่อนที่มากขึ้น แต่ยังไม่พบว่าเส้นเชือกมีการเกี่ยวพันกันเนื่องจากปริมาณเส้นน้อยเกินไป สารละลายที่มีสภาพเช่นนี้เรียกว่าสารละลายกึ่งเจือจางชนิดไม่

เกี่ยวพัน (Semi-dilute unentangled solution) หากยังเพิ่มเส้นเชือกต่อไปอีก จะเริ่มสังเกตเห็นว่าเส้นเชือกเกี่ยวพันกันจนคนได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เปรียบเสมือนสารละลายที่มีโพลิเมอร์เข้มข้นมากเพียงพอจนเกิด PCE ซึ่งสารละลายที่มีสภาพเช่นนี้เรียกว่าสารละลายกึ่งเจือจางชนิดเกี่ยวพัน (Semi-dilute entangled solution) แต่หากยังคงเพิ่มปริมาณเส้นต่อไป เส้นเชือกจะเกี่ยวพันกันจนกลายเป็นก้อนใหญ่ ทำให้น้ำเชื่อมทั้งหมด (รวมเส้นด้วย) มีความหนืดมากจนใช้หลอดคนได้ยากขึ้น ซึ่งในจุดนี้เปรียบเสมือนการเกิดก้อนเจลในสารละลายที่มีความเข้มข้นมากเกินไประยะทางเท่ากับ  $\delta$

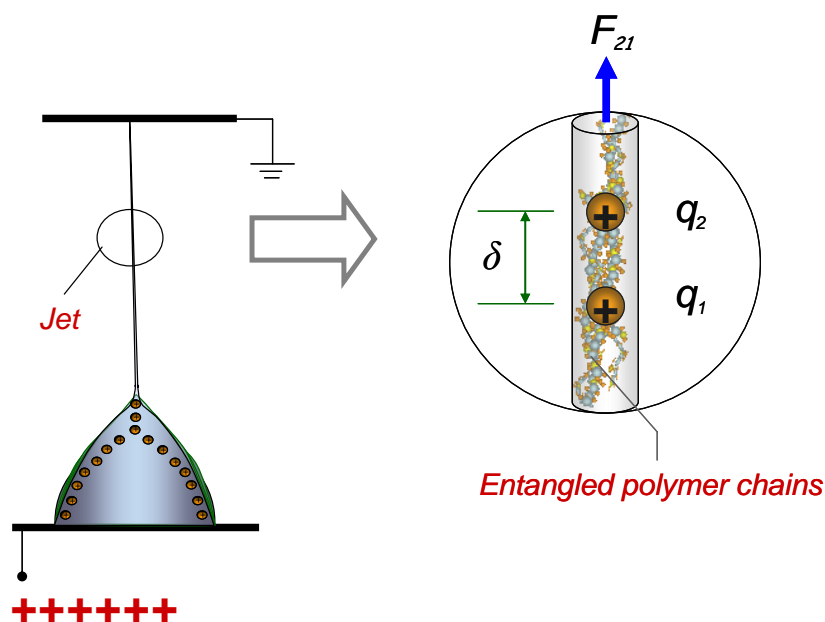
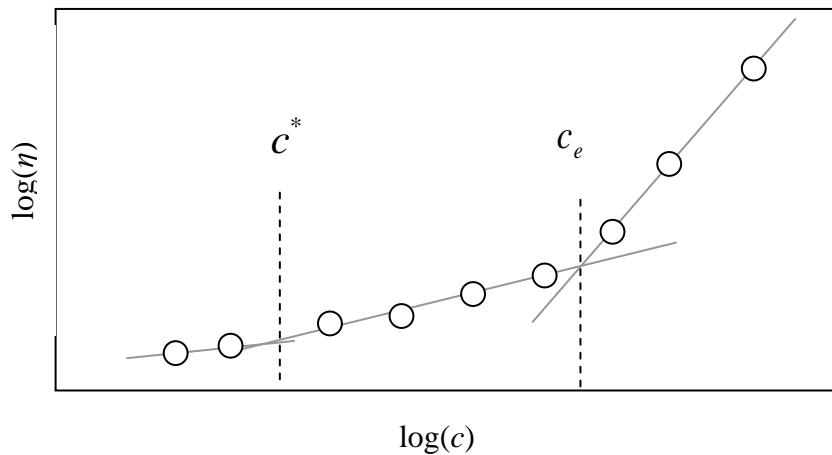


Figure 3 Role of chain entanglement on continuity of nanofibers

สำหรับหลักการสำหรับการพิจารณาว่า สารละลายอยู่ในสถานะใดนั้น สามารถทำได้โดยการหาความหนืดของสารละลายที่ความเข้มข้นโพลิเมอร์ระดับต่างๆ ตามตัวอย่างที่แสดงใน Figure 4 โดยความหนืดของสารละลาย ( $\eta$ ) กับความเข้มข้นของโพลิเมอร์ ( $c$ ) จะมีความสัมพันธ์การตามสมการ (2-1)

$$\eta \sim c^n \quad (2-1)$$



**Figure 4** Dependencies of solution's viscosity ( $\eta$ ) on polymer concentration ( $c$ ) of dilute solution ( $c < c^*$ ), semi-dilute unentangled solution ( $c^* < c < c_e$ ) and semi-dilute entangled solution ( $c > c_e$ )

กรณีที่สารละลายที่มีความเข้มข้นโพลิเมอร์สูงไปหรือสารละลายถูกเตรียมในตัวทำละลายที่ระเหยง่ายนั้น อาจทำให้เกิดปัญหาที่เรียกว่า Clogging ซึ่งหมายถึงการอุดตันของสารละลายที่ปลายหัวฉีดเมื่อทำการผลิตเส้นใยไประยะเวลาหนึ่ง ทำให้ไม่สามารถทำการผลิตต่อไปได้จนกว่าจะทำความสะอาดบริเวณที่เกิดการอุดตันก่อน ปัญหานี้อาจแก้ได้โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า Solvent coating [10] ซึ่งเป็นการจ่ายตัวทำละลายเพิ่มเติมที่บริเวณปลายหัวฉีดเพื่อชดเชยกับปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียจากการระเหยออกไปนั่นเอง หากปริมาณที่ชดเชยเข้ามามีความเหมาะสม จะทำให้การผลิตเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการอุดตัน

## 2. แรงดันไฟฟ้า

โดยปกติ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนจะมีค่าประมาณ 6-20 กิโลโวลต์ การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดผลที่เป็นไปได้สองประการคือ

โดยดัชนี  $n$  หาได้จากความชันของกราฟใน Figure 4 และมีค่าประมาณ 1, 1.25 และ 4 สำหรับสารละลายเจือจาง (dilute solution) กึ่งเจือจางชนิดไม่เกี่ยวพัน (semi-dilute unentangled solution) และกึ่งเจือจางชนิดเกี่ยวพัน (semi-dilute entangled solution) ตามลำดับ [9]

1. การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าใน Polymer jet ซึ่งจะทำให้เกิดแรงผลักรันของประจุไฟฟ้า สูงขึ้น (หรือแรงคูลอมบ์) ทำให้ Polymer jet ถูกยืดออกมากขึ้น เป็นผลให้เส้นใยนาโนที่ผลิตได้จึงมักมีขนาดเล็กลง

2. การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าในบริเวณระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บเส้นใย ทำให้ Polymer jet พุ่งไปที่แผ่นเก็บเส้นใยด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้เวลาลอยตัวในอากาศ (Flying time) สั้นลง จึงทำให้โอกาสในการยึดตัวของเส้นใยมีน้อยลง เส้นใยนาโนที่ผลิตได้จึงอาจมีขนาดใหญ่ขึ้น

เนื่องจากผลที่ตรงกันข้ามกันที่เกิดขึ้นในเวลาพร้อมๆ กันทั้งสองประการข้างต้น จึงเป็นการยากที่จะสรุปว่า การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลให้ขนาดเส้นใยเล็กหรือใหญ่ขึ้น หากผลของแรงดันไฟฟ้าต่อการยึดตัวของเส้นใยมีมากกว่าผลต่อความเร็วในการพุ่งตัวของ

Polymer jet เส้นใยก็จะมีขนาดเล็กลง หรือในทางกลับกัน หากเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นก็แสดงว่าผลของแรงดันไฟฟ้าต่อการลดเวลา Flying time มีมากกว่านั่นเอง

ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงเกินไป อาจทำให้เกิดผลอย่างน้อย 4 ประการ คือ ประการแรก แรงดันไฟฟ้าอาจมีค่าสูงมากกว่าแรงหนืดของสารละลายที่พยายามฉีด Polymer jet เอาไว้ ทำให้ Polymer jet เกิดการขาดแยกเป็นเส้นใยสั้นๆ หรือเป็นหยดเกิดที่แผ่นเก็บเส้นใย รวมทั้งอาจทำให้เส้นใยมีการกระจายขนาดที่กว้างขึ้นกว่าปกติ ประการที่สองคือ แรงดันไฟฟ้าที่สูงไปอาจทำให้อัตราการไหลของมวลของสารละลายที่พุ่งออกเป็น Polymer jet มีค่ามากกว่าอัตราการไหลของมวลสารละลายที่ป้อนส่งมาที่ปลายหัวฉีด ซึ่งทำให้ Taylor cone ค่อยๆ เล็กลงจนแห้งไปทำให้การผลิตไม่เสถียร ประการที่สามคือ แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นอาจเร่งให้ตัวทำละลายระเหยเร็วขึ้นเนื่องจากผลของ Joule heating จนอาจเกิดการอุดตันที่ปลายหัวฉีดได้ในที่สุด [11] และประการสุดท้าย Polymer jet อาจถูกเร่งด้วยความเร็วสูงไปที่แผ่นเก็บเส้นใยทำให้ Flying time มีน้อยจนตัวทำละลายไม่สามารถระเหยออกจาก Polymer jet ได้ทันก่อนที่จะกระทบแผ่นเก็บเส้นใย ผลคือทำให้เกิดลักษณะที่ไม่พึงประสงค์คือเส้นใยเปียกชื้นเกาะกันเป็นจุดๆ แบบสุ่มซึ่งจะเห็นได้ชัดด้วยภาพที่ได้จากกล้อง SEM ทำให้ฟิล์มมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ พร้อมกับการลดลงของความพรุน และการเก็บฟิล์มทำได้ลำบากเพราะจุดที่ชื้นจะเป็นเสมือนกาวยึดฟิล์มให้ติดแน่นกับแผ่นเก็บเส้นใย

### 3. อัตราการไหลของสารละลาย และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บเส้นใย

แม้ผลของอัตราการไหลของสารละลาย และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บเส้นใยต่อลักษณะเส้นใยที่มีผลจะไม่เด่นชัดเท่ากับผลของแรงดันไฟฟ้า อย่างไรก็ตามผู้ที่ทำการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ก็ไม่ควรมองข้ามผลของปัจจัยทั้งสอง โดยการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายมีผลให้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าต่อปริมาตรต่อ

เวลาลดลง จึงทำให้แรงผลักทางไฟฟ้าของคุลอมบ์มีขนาดน้อยลง จึงมักทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ส่วนการลดของระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับแผ่นเก็บเส้นใยก็ทำให้ความเข้มข้นของไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งจะให้ผลคล้ายกับการเพิ่มของแรงดันไฟฟ้านั่นเอง

### 4. ปัจจัยอื่นๆ

ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อลักษณะเส้นใยนอกจากปัจจัยที่ได้กล่าวถึงแล้วในข้างต้น เช่น ชนิดของตัวทำละลาย วัสดุที่ใช้ทำแผ่นเก็บเส้นใย รวมไปถึงลักษณะและรูปทรงของแผ่นเก็บเส้นใย ความชื้นและอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม เงื่อนไขและวิธีการที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย เป็นต้น ตัวอย่างที่น่าสนใจที่จะกล่าวในที่นี้คือ การใช้แผ่นเก็บเส้นใยที่มีรูปทรงกระบอกแบบหมุนได้ (Rotatable cylindrical collector) จะช่วยให้ชั้นของเส้นใยมีลักษณะการเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นตามแนวการหมุน ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มในแนวการหมุนด้วย หรืออีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตเส้นใยจากสารละลายที่มีความหนืดสูงคือการติดแผ่นทำความร้อนไว้ที่กระบอกฉีดเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายเพื่อให้ความหนืดของสารละลายลดลงจนถึงค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตเส้นใย

### วัสดุชีวภาพที่นิยมนำมาผลิตเส้นใยนาโน

จุดเด่นอีกอย่างหนึ่งของเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต คือ ความยืดหยุ่นในการเลือกใช้วัสดุในการผลิตเส้นใย ในระยะเริ่มต้น นักวิจัยนิยมนำวัสดุสังเคราะห์เช่น Poly (ethylene oxide) หรือ Poly (vinyl alcohol) มาใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคนี้ เนื่องด้วยเหตุผลหลายประการ เช่น ความสะดวกในการเตรียมสารละลาย ความหลากหลายในแง่ของขนาดโมเลกุลและความพร้อมของวัตถุดิบที่มีอยู่ในตลาด รวมไปถึงความเสถียรต่อความชื้นและสมบัติทางกลที่ดีของฟิล์มที่ผลิตได้ เป็นต้น จึงเป็นเหตุให้นักวิจัยเลือกใช้วัสดุสังเคราะห์เหล่านี้มาใช้เพื่อทำความเข้าใจเรื่องทฤษฎีพื้นฐานของเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต อย่างไรก็ตามในการวิจัยเกี่ยวกับการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ใน

ระยะหลังนั้น นักวิจัยเริ่มให้ความสนใจนำ Electrospun fiber มาใช้เป็นวัสดุทางด้านวิศวกรรมชีวภาพ ด้านวิศวกรรมการแพทย์ รวมทั้งด้านวิศวกรรมอาหารมากขึ้น ดังนั้นความสนใจที่จะใช้วัสดุผสมระหว่างวัสดุสังเคราะห์กับวัสดุชีวภาพ หรือแม้แต่ใช้วัสดุชีวภาพเพียงอย่างเดียวในการผลิตเส้นใยนาโนจึงมีมากขึ้นเนื่องจากวัสดุชีวภาพมีความปลอดภัย มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และได้รับการยอมรับมากกว่า

กลุ่มของวัสดุชีวภาพที่มักถูกนำมาใช้ในงานการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่กลุ่มของโพลีแซคคาไรด์ เช่น เซลลูโลสและโคโตซาน และกลุ่มของโปรตีน เช่น เวย์โปรตีน และเคซีน (โปรตีนจากข้าวโพด) ซึ่งวัสดุชีวภาพทั้งสองกลุ่มนี้จัดเป็นโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ หากสามารถหาตัวทำละลายที่เหมาะสม ก็จะสามารถเตรียมสารละลายที่มีระดับของ Polymer chain entanglement ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้

### 1. กลุ่มเซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส

จุดเด่นที่สำคัญของเซลลูโลสคือเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มากในธรรมชาติและเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากในของเสียทางการเกษตร เซลลูโลสมีคุณสมบัติทางกลที่ดี มีความเสถียรต่อความชื้น และไม่เป็นพิษ โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์สายยาวทำให้เหมาะต่อกับเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นอย่างมาก แต่ปัญหาที่สำคัญที่สุดในการใช้เซลลูโลส คือ การหาตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อเตรียมสารละลายเซลลูโลสสำหรับการผลิตเส้นใย ด้วยเหตุผลนี้ เซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate-CA) จึงเป็นหนึ่งในอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต [12-14] เนื่องจากสามารถละลายในกรดเข้มข้น โดยปกติการเตรียมสารละลาย CA จะใช้เวลาค่อนข้างนานเป็นระยะเวลาประมาณ 8 ชั่วโมงหรือมากกว่า เพื่อให้ CA ละลายโดยสมบูรณ์และนิยมเตรียมในภาชนะปิดเพื่อป้องกันการระเหยของตัวทำละลาย เนื่องจากเป็นกรดเข้มข้น

Han และคณะ [14] ศึกษาผลของตัวทำละลายต่อขนาดของเส้นใยนาโนจาก CA ขนาด 30 kDa โดย

เตรียมสารละลายของ CA ในตัวทำละลายกรด acetic ที่มีปริมาณกรด acetic ในตัวทำละลายอยู่ในช่วง 70-95% โดยน้ำหนัก ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด +25 kV ที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดเท่ากับ 0.84 มิลลิเมตร พวกเขาพบว่าขนาดของเส้นใยจะมีค่าใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณกรด acetic ในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น จากการวัดพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดในขณะที่ความหนืดของสารละลายลดลง โดยปกติขนาดของเส้นใยจะแปรผกผันกับค่าการนำไฟฟ้าและความหนืด แสดงว่าในกรณีนี้ค่าการนำไฟฟ้ามีผลเหนือกว่าค่าความหนืด เมื่อค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมีค่าสูงขึ้น ความเร็วของ Polymer ก็สูงขึ้นด้วย ทำให้ Flying time ลดลง Polymer jet จึงมีเวลาในการยึดตัวน้อยลง และเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ

Wongsasulak และคณะ [13] ทดลองผลิตเส้นใยนาโนจากส่วนผสมของสารละลายของ CA ใน 85% Glacial acetic acid และสารละลาย Egg Albumin (EA) ใน 50% Formic acid โดยส่วนผสมของสารละลายทั้งสองมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ CA และ EA อยู่ที่ค่าต่างๆ กันคือ 100:0, 91:9, 77:23, 66:34 และ 0:100 จากการตรวจสอบสมบัติของส่วนผสมพบว่าเมื่อปริมาณ EA ในสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเพิ่มขึ้นในขณะที่ความหนืดของสารละลายลดลง เมื่อนำส่วนผสมมาผลิตเส้นใย พบว่าขนาดของเส้นใยที่ผลิตได้จะแปรผันตามปริมาณโซลว ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับกรณีของ Han และคณะ [14]

### 2. โคโตซาน

โคโตซานสามารถผลิตได้จากโคตินผ่านกระบวนการ Deacetylate เพื่อกำจัดหมู่ acetyl ในโคตินออกไป ซึ่งทำให้เกิดหมู่ Amine อิสระขึ้นในโครงสร้างของโมเลกุลของโคโตซาน จึงทำให้โคโตซานสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่เป็นกรดอ่อน [15] โคโตซานมีคุณสมบัติเด่นหลายข้อที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ผลิตเส้นใยนาโนเพื่อใช้ในด้านวิศวกรรม การแพทย์ วิศวกรรมอาหาร และวิศวกรรมชีวภาพ เช่น

โครงสร้างโมเลกุลที่เป็นแบบเชิงเส้นทำให้เหมาะกับการผลิตเส้นใย การมีความเสถียรต่อความชื้น คุณสมบัติด้าน Biodegradability และ biocompatibility ความไม่เป็นพิษต่อร่างกาย และเหนือสิ่งอื่นใด คุณสมบัติเรื่อง Antimicrobial activity [16] ซึ่งน่าจะเป็นจุดเด่นที่สุดจุดหนึ่งที่ทำให้นักวิจัยมีความสนใจในโคโตซาน [17]

Bhattacharai และคณะ[18] ทำการผลิตเส้นใยนาโนจากสารละลายที่มีส่วนผสมของโคโตซานและ Poly(ethylene oxide) (PEO) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 60/40 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การผลิตเส้นใยจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อมีส่วนผสมของ PEO อย่างน้อย 10% โดยในสารละลายที่ไม่มีส่วนผสมของ PEO อยู่เลยนั้นสังเกตเห็นแต่หยดของสารละลาย ซึ่งเป็นเพราะว่า สารละลายโคโตซานมีค่าการนำไฟฟ้าและแรงตึงผิวที่สูงมาก สาย Polymer jet จึงถูกแยกออกจากกันด้วยแรงผลักรวมกับแรงตึงผิว การเติม PEO จะช่วยลดค่าการนำไฟฟ้าและแรงตึงผิวของสารละลายทำให้ Polymer jet สามารถคงความต่อเนื่องได้ดีขึ้น นอกจากนี้ Bhattacharai และคณะยังได้ทดลองเติมสารลดแรงตึงผิว Triton X-100<sup>TM</sup> และ DMSO ในสารละลายที่อัตราส่วนต่างๆ กันและพบว่า สารลดแรงตึงผิวช่วยให้เส้นใยมีลักษณะต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อนำฟิล์มโคโตซานที่ผลิตได้มาใช้ทดสอบกับเซลล์ Osteoblast และ Chondrocyte พบว่าเซลล์สามารถเกาะติด และกระจายตัวบนฟิล์มที่ผลิตโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้ดีกว่าบนฟิล์มที่ผลิตโดย Solvent casting

### 3. เซอีน (Zein)

เซอีน เป็นโปรตีนหลักที่อยู่ในเมล็ดข้าวโพด ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลักคือ Leucine (20%), Proline (10%) และ Alanine (10%) [19] ซึ่งเป็นกลุ่มกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้ว จึงเป็นเหตุผลที่เซอีนไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้วอ่อนๆ เช่น เอทานอล [10,20] ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [21] เป็นต้น ทำให้เซอีนมีคุณสมบัติดีเยี่ยมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวเม็ดยา [22] เซอีนมีโครงสร้างเป็นแบบ

Helical structure [19] จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต [23,24]

Miyoshi และคณะ [20] ผลิตเส้นใยนาโนจากสารละลายเซอีนในเอทานอลเข้มข้น 80% และพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของเซอีน มีค่าเท่ากับ 21% โดยน้ำหนัก เส้นใยที่ผลิตได้มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 700 นาโนเมตร โดยเส้นใยที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นเส้นแบบ Ribbon ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับที่รายงานโดย Selling และคณะ [21] ที่ศึกษาผลของตัวทำละลายต่อลักษณะเส้นใย เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลพบว่าเส้นใยมีลักษณะเป็น Ribbon แต่เมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นกรด Acetic และความเข้มข้นของเซอีนมากกว่า 30% จะได้เส้นใยที่มีลักษณะกลมแทน นอกจากนี้ Selling และคณะ [25] ยังแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของเซอีน ฟิล์มที่ผลิตได้โดยการ Cross-link เส้นใยด้วย Glutaraldehyde อย่างไรก็ดี ปัญหาการอุดตันของสารละลายเซอีน ขณะผลิตเส้นใยด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต เป็นปัญหาที่สำคัญที่ทำให้การผลิตเป็นไปได้อย่างยาก สาเหตุสำคัญมาจากการใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลซึ่งระเหยได้อย่างรวดเร็ว Kanjanapongkul และคณะ [10,11] ได้ทำการศึกษาและเสนอทางแก้ปัญหาด้วยการใช้เทคนิคที่เรียกว่า Solvent coating ซึ่งช่วยให้การผลิตต่อเนื่องได้อย่างน้อย 8 ชั่วโมง

### การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนและการพัฒนาการผลิตเส้นใยด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ด้วยสมบัติพิเศษของเส้นใยนาโนซึ่งมีพื้นผิวจำเพาะสูง และความไม่เป็นพิษของวัสดุชีวภาพ ทำให้เส้นใยนาโนจากวัสดุชีวภาพเหมาะกับการนำมาใช้งานได้หลายด้าน ได้แก่ งานกรองโดยเฉพาะการกรองเชื้อโรคในอุตสาหกรรมอาหารที่มีความจำเพาะสูง [1,26,27] งานทางด้านวิศวกรรมชีวภาพโดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นวัสดุปิดแผล [28] หรือใช้เป็นพาหนะสำหรับนำส่งยาเพื่อใช้ทั้งภายในและนอกร่างกายมนุษย์ (Drug vehicles) [29] ในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการผลิตเส้นใยนาโนแบบไม่ใช้หัวฉีด (Needless



electrospinning) ซึ่งช่วยให้การผลิตเร็วขึ้นกว่าแบบเก่า ทั้งแบบลูกกลิ้งเรียบหมุน (Rotatable drum) [30] และแบบที่ใช้ฟองอากาศ (Bubble electrospinning) [31] ทำให้กำลังการผลิตต่อหน่วยสูงขึ้นไปมากกว่า 100 เท่า ในปัจจุบันนี้ นักวิจัยยังคงทำการศึกษาและพัฒนาทั้งในแง่เทคนิคการผลิต และการประยุกต์ใช้งาน จึงทำให้คาดได้ว่าในอนาคตไม่ไกลเราอาจได้สัมผัสกับสินค้าที่ใช้ประจำวันที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใยนาโนที่ผลิตโดยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ก็เป็นไปได้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Huang, Z.M., Zhang, Y.Z. Kotaki M. and Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 63: 2223-2253.
- [2] Bhardwaj, N. and Kundu, S.C. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*. 28: 325-347.
- [3] Reneker, D.H., Yarin, A.L. Fong, H. and Kooombhongse, S. (2000). Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning. *Journal of Applied Physics*. 87: 4531-4547.
- [4] Lala, N.L., Ramaseshan, R., Li, B.J., Sundarrajan, S., Barhate, R.S., Liu, Y.J. and Ramakrishna, S. (2007). Fabrication of nanofibers with antimicrobial functionality used as filters: Protection against bacterial contaminants. *Biotechnology and Bioengineering*. 97: 1357-1365.
- [5] Yarin, A.L., Kooombhongse, S. and Reneker, D.H. (2001). Taylor cone and jetting from liquid droplets in electrospinning of nanofibers. *Journal of Applied Physics*. 90: 4836-4846.
- [6] Shin, Y.M., Hohman, M.M., Brenner, M.P. and Rutledge, G.C. (2001). Experimental characterization of electrospinning: the electrically forced jet and instabilities. *Polymer*. 42: 9955-9967.
- [7] Shin, Y.M., Hohman, M.M. Brenner M.P. and Rutledge, G.C. (2001). Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers. *Applied Physics Letters*. 78: 1149-1151.
- [8] Ramakrishna, S. (2005). *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. Singapore: World Scientific.
- [9] Gupta, P., Elkins, C., Long, T.E. and Wilkes, G.L. (2005). Electrospinning of linear homopolymers of poly (methyl methacrylate): exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent. *Polymer*. 46: 4799-4810.
- [10] Kanjanapongkul, K., Wongsasulak, S. and Yoovidhya, T. (2010). Investigation and prevention of clogging during electrospinning of zein solution. *Journal of Applied Polymer Science*. 118: 1821-1829.
- [11] Kanjanapongkul, K., Wongsasulak, S. and Yoovidhya, T. (2010). Prediction of clogging time during electrospinning of zein solution: Scaling analysis and experimental verification. *Chemical Engineering Science*. 65: 5217-5225.

- [12] Wongsasulak, S., Kit, K.M., McClements, D.J., Yoovidhya T. and Weiss, J. (2007). The effect of solution properties on the morphology of ultrafine electrospun egg albumen-PEO composite fibers. *Polymer*. 48: 448-457.
- [13] Wongsasulak, S., Patapeejumruswong, M. Weiss, J. Supaphol P. and Yoovidhya, T. (2010). Electrospinning of food-grade nanofibers from cellulose acetate and egg albumen blends. *Journal of Food Engineering*. 98: 370-376.
- [14] Han, S.O., Son, W.K. Youk J.H. and Park, W.H. (2008). Electrospinning of ultrafine cellulose fibers and fabrication of poly(butylene succinate) biocomposites reinforced by them. *Journal of Applied Polymer Science*. 107: 1954-1959.
- [15] Aranaz, I., Mengibar, M., Harris, R., Paños, I., Miralles, B., Acosta, N., Galed G. and Heras, Á. (2009). Functional characterization of chitin and chitosan. *Current Chemical Biology*, 3: 203-230.
- [16] Fu, X., Shen, Y., Jiang, X., Huang D. and Yan, Y. (2011). Chitosan derivatives with dual-antibacterial functional groups for antimicrobial finishing of cotton fabrics. *Carbohydrate Polymers*, 85: 221-227.
- [17] Torres-Giner, S., M.J. Ocio an J.M. and Lagaron. (2008). Development of active antimicrobial fiber based chitosan polysaccharide nanostructures using electrospinning. *Engineering in Life Sciences*, 8: 303-314.
- [18] Bhattarai, N., Edmondson, D., Veisoh, O., Matsen F.A. and Zhang, M.Q. (2005). Electrospun chitosan-based nanofibers and their cellular compatibility. *Biomaterials*, 26: 6176-6184.
- [19] Shukla, R. and Cheryan, M. (2001). Zein: the industrial protein from corn. *Industrial Crops and Products*. 13: 171-192.
- [20] Miyoshi, T., Toyohara, K. and Minematsu, H. (2005). Preparation of ultrafine fibrous zein membranes via electrospinning. *Polymer International*. 54: 1187-1190.
- [21] Selling, G.W., Biswas, A. Patel, A. Walls, D.J., Dunlap, C. and Wei, Y. (2007). Impact of solvent on electrospinning of zein and analysis of resulting fibers. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 208: 1002-1010.
- [22] O'Donnell, P.B., Wu, C., Wang, J., Wang, L., Oshlack, B., Chasin, M., Bodmeier, R. and McGinity, J.W. (1997). Aqueous pseudolatex of zein for film coating of solid dosage forms. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 43: 83-89.
- [23] Torres-Giner, S., Gimenez, E. and Lagaron, J.M. (2008). Characterization of the morphology and thermal properties of Zein Prolamine nanostructures obtained by electrospinning. *Food Hydrocolloids*. 22: 601-614.
- [24] Torres-Giner, S., Ocio, M.J. and Lagaron, J.M. (2009). Novel antimicrobial ultrathin structures of zein/chitosan blends obtained by electrospinning. *Carbohydrate Polymers*. 77: 261-266.
- [25] Selling, G.W., Woods, K.K., Sessa, D. and Biswas, A. (2008). Electrospun zein

- fibers using glutaraldehyde as the crosslinking reagent: Effect of time and temperature. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 209: 1003-1011.
- [26] Desai, K., Kit, K., Li, J., Michael Davidson, P., Zivanovic S. and Meyer, H. (2009). Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications. *Polymer*. 50: 3661-3669.
- [27] Patanaik, A., Jacobs V. and Anandjiwala, R.D. (2010). Performance evaluation of electrospun nanofibrous membrane. *Journal of Membrane Science*. 352: 136-142.
- [28] Sill, T.J. and von Recum, H.A. (2008). Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*. 29: 1989-2006.
- [29] Huang, H.H., He, C.L., Wang H.S. and Mo, X.M. (2009). Preparation of core-shell biodegradable microfibers for long-term drug delivery. *Journal of Biomedical Materials Research-Part A*. 90: 1243-1251.
- [30] Huang, X., Wu, D., Zhu Y. and Sun, D. (2007). Needleless electrospinning of multiple nanofibers. In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> IEEE Conference*, pp 823-826. August 2-5, 2007, Hongkong.
- [31] He, J.H., Liu, Y., Xu, L., Yu, J.Y. and Sun, G. (2008). BioMimic fabrication of electrospun nanofibers with high-throughput. *Chaos, Solitons and Fractals*. 37: 643-651.