

## บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์

### 4.1 สมบัติทางกระแสวิทยาของสารละลายเอธิลเซลลูโลส

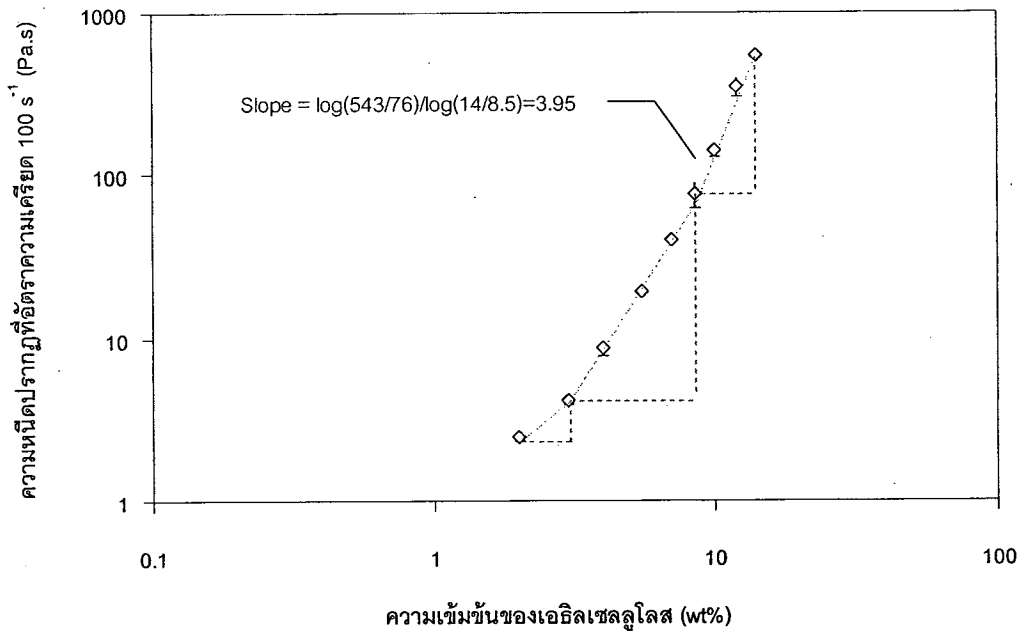
สารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ ถูกนำมาวัดความหนืดด้วยเครื่อง Rotational Viscometer โดยภาพพบว่าสารละลายเอธิลเซลลูโลสเป็นสารละลายที่มีพฤติกรรมในการไหลเป็นแบบ Shear Thinning กล่าวคือ ในขณะที่ทำการวัดความหนืดของสารละลายโดยการเพิ่มแรงเฉือนให้มากขึ้นจะทำให้สารละลายมีความหนืดลดลง เนื่องจากสารละลายเมื่อได้รับแรงเฉือนจะทำให้สายพอลิเมอร์ที่เกี่ยวข้องพันกันหลุดออกจากกัน เมื่อสายพอลิเมอร์หลุดออกจากการเกี่ยวพัน จะทำให้สารละลายที่ได้รับแรงเฉือนมีความหนืดลดลง (Fatkulin *et al.*, 2011) สำหรับความหนืดของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหนืดของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่อัตราการเฉือน 100/s (จำนวนตัวอย่าง = 3 ซ้ำ)

ความเข้มข้นของ สารละลายเอธิลเซลลูโลส (%wt)	ความหนืดที่อัตราการเฉือน 100/s (Pa.s)	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
2	2.49	0.06
3	4.17	0.17
4	8.65	0.24
5.5	19.46	0.82
7	39.62	0.52
8.5	75.52	0.66
10	140.18	13.06
12	344.87	11.99
14	542.82	47.30

จากผลการทดลอง พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 2 เป็น 4 %wt (2 เท่า) ความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นประมาณ 3.5 เท่า คิดเป็นอัตราส่วนของความหนืดที่เพิ่มขึ้นต่อความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $3.5 / 2 = 1.75$  เท่า ส่วนในกรณีที่มีความเข้มข้นสูง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 10 เป็น 14 %wt (1.4 เท่า) ความหนืดเพิ่มขึ้นประมาณ 3.9 เท่า คิดเป็นอัตราส่วนของความหนืดที่เพิ่มขึ้นต่อความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $3.9 / 1.4 = 2.79$  เท่า จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของการเพิ่มขึ้นของความหนืดเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นจะสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า ความไวของการเพิ่มขึ้นของความหนืดต่อความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ สายพอลิเมอร์ที่อยู่ในสารละลายจะกระจายตัวอยู่กันอย่างอิสระ ดังนั้นในการเพิ่มความเข้มข้นจาก 2 เป็น 4 %wt (2 เท่า) จึงทำให้ความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากสายพอลิเมอร์ในสารละลายก็ยังกระจายตัวอยู่อย่างอิสระอยู่ สำหรับที่ความเข้มข้นสูง สายพอลิเมอร์ในสารละลายจะอยู่กันอย่างหนาแน่น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเพียง

เล็กน้อย (จาก 10 เป็น 14 %wt หรือ 1.4 เท่า) สายพอลิเมอร์จะเกี่ยวพันกันมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นของสารละลาย

ภาพที่ 4.1 เป็นกราฟที่ Plot ขึ้นใหม่จากข้อมูลในตาราง 4.1 เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและความเข้มข้นของสารละลายได้ง่ายขึ้น โดยภาพรวมความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเอธิลเซลลูโลสในสารละลายเพิ่มขึ้น สิ่งที่น่าสนใจคือ ความชันของเส้นกราฟมีความแตกต่างกัน 3 ช่วง แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอัตราการเพิ่มของความหนืดไม่เท่ากันเนื่องมาจากระดับความเกี่ยวพันที่ไม่เท่ากัน ความชันแต่ละช่วงของกราฟสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.1

$$n = (\log y_2 - \log y_1) / (\log x_2 - \log x_1) \tag{4.1}$$

โดย n คือความชันของกราฟ, x คือความเข้มข้นของสารละลายเอธิลเซลลูโลส และ y คือความหนืดที่ความเข้มข้นของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ x

ความเข้มข้นช่วงที่ 1 ที่ความเข้มข้นเอธิลเซลลูโลสต่ำ (2-4 wt%) ความหนืดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อทำการคำนวณตามสมการที่ (4.1) จะได้ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 1.27 ค่าที่ได้นี้เป็นค่าของความเข้มข้นที่มีค่าน้อยที่สุดของสารละลายเอธิลเซลลูโลส จากทฤษฎีจะมีค่าประมาณ 1 (Gupta *et al.*, 2005) ในกรณีที่ค่าความเข้มข้นมีค่าไม่เท่ากันอาจจะเป็นเพราะใช้สารละลายในการวัดความหนืดที่แตกต่างกัน จากความเข้มข้นที่ได้แสดงให้เห็นว่าช่วงของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 2 - 4 %wt การกระจายตัวของสายพอลิเมอร์ในสารละลายมีการกระจายตัวกันอย่างอิสระ ทำให้สายพอลิเมอร์ที่กระจายอยู่ไม่มีการเกี่ยวพันกันเกิดขึ้น ช่วงนี้เรียกว่าช่วง "Dilute"

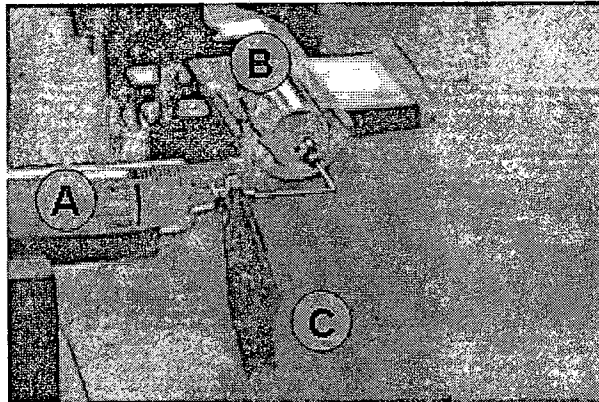
เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายให้กลายเป็นความเข้มข้นที่ 4 - 8.5 %wt จะพบว่าความชันของกราฟจะเปลี่ยนเป็น 2.72 เมื่อนำมาเทียบกับความชันในช่วงแรก เห็นได้ว่าความชันของกราฟจะมีค่าของความชันเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วงนี้เป็นช่วงที่สายพอลิเมอร์ในสารละลายเอธิลเซลลูโลสมีปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สายพอลิเมอร์อยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น ช่วงนี้เรียกว่า "Semi-dilute unentangled" (Bock *et al.*, 2012; Gupta *et al.*, 2005)

เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายให้สูงเกิน 8.5 %wt ขึ้นไป พบว่าความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.95 ซึ่งเป็นช่วงที่ความชันของกราฟมีค่าสูงที่สุด ในช่วงนี้สายพอลิเมอร์ที่อยู่ในสารละลายเอธิลเซลลูโลสจะอยู่กันอย่างหนาแน่นภายในสารละลาย และเนื่องจากสายพอลิเมอร์หนาแน่นมาก จะทำให้สายพอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวพันกัน ช่วงนี้เรียกว่า "Semi-dilute entangled" (Bock *et al.*, 2012; Gupta *et al.*, 2005) ค่าความชันที่หาได้จากกราฟในช่วงนี้ใกล้เคียงกับที่รายงานโดย Gupta และคณะ (2005) ว่า ค่าความเข้มข้นที่สารละลายเริ่มเกิด Polymer Chain Entanglement (PCE) จะมีค่าประมาณ 4 แสดงว่าในกรณีของสารละลายเอธิลเซลลูโลสในเอธานอล ความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะต้องมีค่าสูงกว่า 8.5 wt% (และโดยปกติต้องสูงกว่าค่าที่เริ่มเกิด PCE พอสมควร) อย่างไรก็ตามหากความเข้มข้นสูงเกินไป สารละลายจะมีความหนืดที่สูง ทำให้เกิดปัญหาการอุดตันได้

ดังนั้น สารละลายที่จะนำไปใช้ในการผลิตฟิล์มเส้นใยนาโน จะอยู่ในช่วงของความเข้มข้นตั้งแต่ 8.5 - 13 %wt เนื่องจากอยู่ในช่วง "Semi-dilute entangled" เนื่องจากความหนืดในช่วงนี้ มีแรงต้านการยืดของ Polymer jet ทำให้สัญญาณของเส้นใยที่ผลิตไม่ขาดออกจากกัน และทำให้ได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง

## 4.2 เงื่อนไขที่เหมาะสมของการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ในการผลิตวัสดุปิดผิวในครั้งนี้ เอทานอลถูกเลือกเป็นตัวทำละลายที่ใช้เตรียมสารละลายเพราะไม่เป็นพิษและมีความสามารถในการทำละลายเอธิลเซลลูโลสได้ดี อย่างไรก็ตาม เอทานอลมีความดันไอที่สูงทำให้มีอัตราการระเหยที่สูงด้วย จึงมีโอกาที่สารละลายจะเกิดการอุดตัน (Clogging) ได้ ดังนั้นเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบ Solvent coating ที่เสนอโดย Kanjanapongkul และคณะ (Kanjanapongkul *et al.*, 2010a, 2010b) จึงถูกนำมาใช้โดยมีรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 การผลิตเส้นใยด้วยเทคนิค Solvent coating โดยส่วน A เป็นส่วนที่บรรจุสารละลาย และ B เป็นกระบอกบรรจุตัวทำละลาย ส่วน C เป็นอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแก่สารละลาย

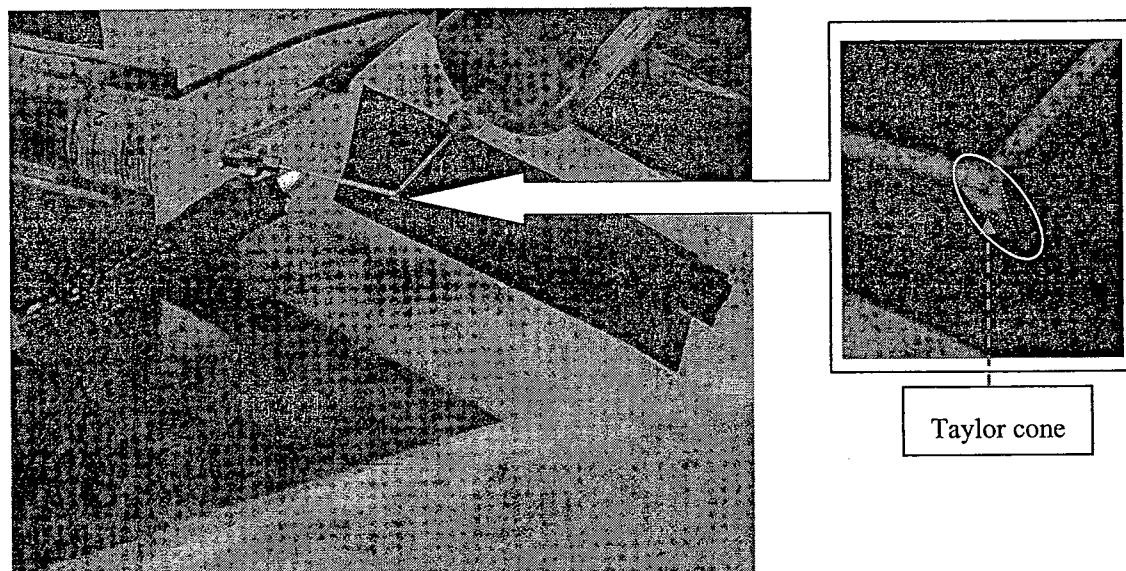
ในส่วนนี้เป็นการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ในการผลิตเส้นใย โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารละลาย แรงดันไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ อัตราการไหลของสารละลายและตัวทำละลาย

### 4.2.1 ความเข้มข้นของสารละลาย

ปัจจัยแรกเป็นการหาความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์ม เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายจะส่งผลต่อสัดส่วนของเส้นใย โดยที่ความเข้มข้น 2 – 8.5 %wt เป็นช่วงที่สายพอลิเมอร์ในสารละลายไม่เกิดการเกี่ยวพันกัน ทำให้ Polymer jet ขาดออกจากกันด้วยแรงผลัทางไฟฟ้าในขณะที่กำลังยึดตัวอยู่ในอากาศ สัดส่วนของเส้นใยที่ผลิตได้จึงมีลักษณะเป็นเม็ด Bead หรือ Bead บนเส้นใย เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเป็น 8.5 – 14 %wt ซึ่งเป็นช่วงที่สายพอลิเมอร์ที่อยู่ในสารละลายเกิดการเกี่ยวพันกัน จึงช่วยป้องกันให้เส้นใยที่ผลิตไม่ขาดออกจากกันในขณะที่ถูกยึดด้วยแรงผลัทางไฟฟ้า ทำให้เส้นใยที่ผลิตขึ้นมีลักษณะต่อเนื่อง เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 14 %wt จะพบว่าเตรียมสารละลายได้ยาก และบางส่วนมีลักษณะเป็นเจล ทำให้เกิดการอุดตันระหว่างการผลิต

#### 4.2.2 แรงดันไฟฟ้า

ปัจจัยต่อไปที่ทำการศึกษาคือแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก เนื่องจากการที่จะทำให้เกิด Polymer jet พุ่งออกกลายเป็นเส้นใยได้นั้น จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของหยดสารละลายที่ปลายเข็มได้ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาดังแต่แรงดันไฟฟ้า 8 kV ถึง 20 kV ซึ่งเป็นช่วงที่ต่ำสุดและสูงสุดในการผลิตฟิล์ม (Xi-Wen, 2008) ในขณะที่ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ Taylor cone โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง (Tripatanasuwan and Reneker, 2009) ซึ่งช่วงแรกเป็นช่วงที่แรงดันไฟฟ้าน้อยเกินไป (ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 9 kV) จะไม่มี Taylor cone เกิดขึ้น แต่จะเกิดเป็นหยดของสารละลายแทน เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (แรงดันไฟฟ้า 12 ถึง 16 kV) จะพบว่า Taylor cone มีความเสถียร ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.3 แต่เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงกว่า 18 kV Taylor cone จะหดตัวเข้าไปในปลายเข็ม ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงมากเกินไป จะทำให้ประจุที่อยู่ในสารละลายบริเวณปลายเข็ม อยู่รวมกันอย่างหนาแน่นและส่งผลให้มีแรงผลักรันมากขึ้น แรงผลักรันของประจุทำให้สารละลายพุ่งออกไปได้มากกว่าสารละลายที่ไหลออกมา เกิดสภาพการไหลของมวลที่ไม่สมดุล คือมวลที่พุ่งออกไปจาก Taylor cone จะมากกว่ามวลที่ Syringe pump ส่งเข้ามาเพื่อเลี้ยง Taylor cone ไว้ ผลก็คือ Taylor cone ค่อยๆ มีขนาดเล็กลงและในที่สุดจะหดเข้าไปในเข็ม

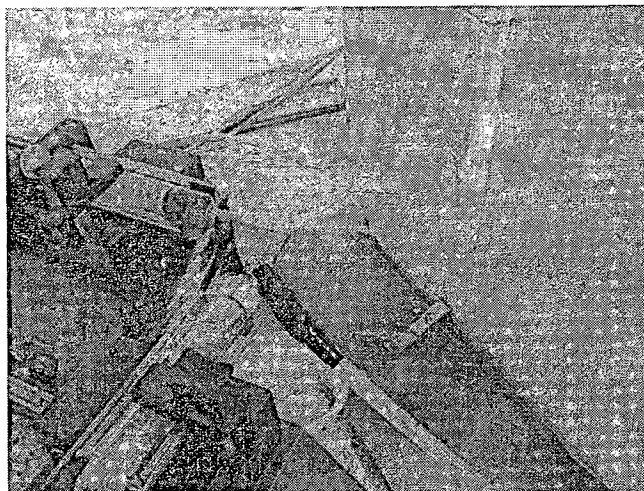


ภาพที่ 4.3 ลักษณะของ Taylor cone ที่มีความเสถียร

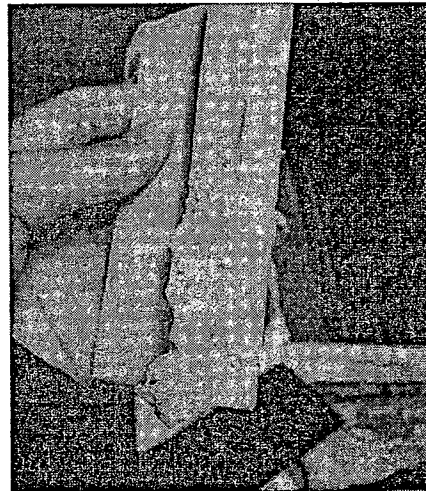
#### 4.2.3 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับ

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับจะมีผลคล้ายๆกับแรงดันไฟฟ้า เพราะวาระยะทางจะเป็นปัจจัยร่วมกับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า หากระยะทางห่างจะส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าอ่อน และเมื่อระยะสั้นลงก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากขึ้น สำหรับช่วงของระยะห่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีค่าตั้งแต่ 5 ถึง 20 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่าที่ระยะห่างน้อยกว่า 10 เซนติเมตร ทำให้เกิดเส้นใยแห้งกลางอากาศก่อนที่จะเดินทางไปถึงแผ่นรองรับ ทั้งนี้จะเกิดจากสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ทำให้เกิดความร้อนจากสนามไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อตัวทำละลายได้รับความร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยอย่าง

รวดเร็ว ทำให้เส้นใยแห้งกลางอากาศได้ จากการสังเกต หากปล่อยไว้โดยไม่หยุดการผลิต เส้นใยที่แห้งกลางอากาศจะเริ่มยาวขึ้นจนกระทั่งถึงปลายเข็ม เส้นใยที่แห้งกลางอากาศนี้จะเปรียบเสมือนสะพานไฟเชื่อมระหว่างแผ่นรองรับกับอิเล็กโทรด (ภาพที่ 4.4) การเชื่อมนี้ทำให้เกิดกระแสไหลสูงกว่าปกติ และทำให้เกิด Overload และอาจจะความเสียหายกับเครื่อง High voltage power supply ได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.4 ลักษณะของฟิล์ม กรณีที่ระยะห่างระหว่างแผ่นรองรับกับปลายเข็มของสารละลายน้อยเกินไป (ก) เส้นใยเกิดการแห้งตัวขณะอยู่กลางอากาศ (ข) ฟิล์มที่ได้จากกรณีระยะห่างของแผ่นรองรับกับปลาย electrode น้อยเกินไป

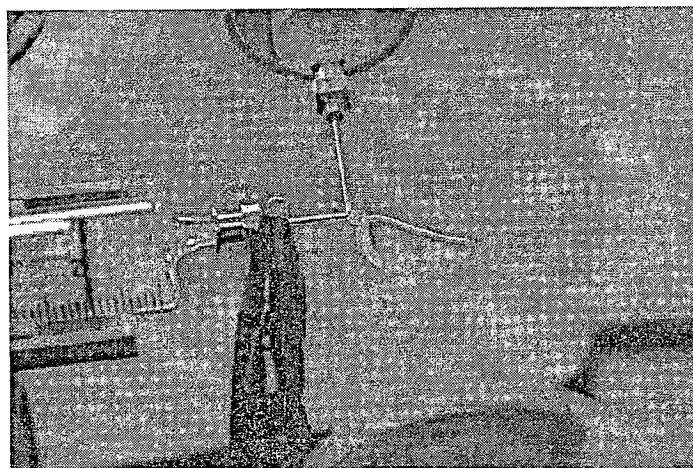
เมื่อเพิ่มระยะห่างให้มากขึ้นจนมีระยะ 10 เซนติเมตรจะพบว่า Taylor cone จะมีความเสถียร แต่หากยังเพิ่มระยะห่างให้มากขึ้นจนเกินกว่า 20 เซนติเมตร จะไม่เกิดเส้นใยที่แผ่นรองรับ ทั้งนี้เนื่องจากระยะทางที่ห่างมากไปจะทำให้สนามไฟฟ้าอ่อนเกินไป แรงผลักทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงไม่ขนาดมากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดของสารละลายที่ปลายเข็มได้ จึงไม่สามารถเกิด Taylor cone ที่สมบูรณ์ ทำให้ไม่มี Polymer jet พุ่งออกไปยัง Collector plate ได้

#### 4.2.4 อัตราการไหลของสารละลาย

อัตราการไหลของสารละลายเป็นอีกเงื่อนงำที่ส่งผลต่อการผลิต ที่อัตราการไหลของสารละลายน้อยกว่า 5  $\mu\text{L}/\text{min}$  จะส่งผลให้มวลขาเข้าน้อยกว่ามวลขาออก จึงทำให้ Taylor cone หดเข้าไปในเข็ม และอาจจะทำให้ฟิล์มที่ผลิตได้มี Bead อยู่อย่างหนาแน่น เนื่องจากแรงผลักของประจุไฟฟ้ามีปริมาณมากเกินไปจนทำให้สายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกไปขาดออกจากกันในขณะที่ยึดด้วยแรงดันไฟฟ้า แต่ในทางกลับกันเมื่ออัตราการไหลของสารละลายมากเกินไปจะทำให้สิ่งที่ได้เป็นหยดของสารละลายแทนที่จะได้เส้นใย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราการไหลของสารละลายที่ 30  $\mu\text{L}/\text{min}$  ในการผลิต ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ Taylor cone มีความเสถียรมากที่สุด

#### 4.2.5 อัตราการไหลของตัวทำละลาย

อัตราการไหลของตัวทำละลายเป็นเงื่อนไขพิเศษที่จะช่วยให้อัตราการเกิด Clogging ในขณะการผลิตลดลง (Kanjanapongkul และคณะ, 2011) ถึงแม้ว่าหน้าที่ของการเพิ่มตัวทำละลายให้กับสารละลายที่ปลายเข็มจะเป็นวิธีที่จะช่วยให้อัตราการเกิด Clogging ลดลง แต่ถ้าตัวทำละลายมีอัตราการไหลน้อยกว่า 6  $\mu\text{L}/\text{min}$  ก็จะส่งผลให้เกิดการอุดตัน (Clogging) ที่ปลายเข็มในขณะทำการผลิต ดังภาพที่ 4.5 ในทางกลับกัน ถ้าอัตราการไหลของสารละลายสูงเกินกว่า 10  $\mu\text{L}/\text{min}$  จะส่งผลให้ตัวทำละลายระเหยไม่หมดเมื่อถึงแผ่นรองรับ จึงทำให้เส้นใยที่แผ่นรองรับถูกตัวทำละลายที่ระเหยไม่หมดทำลายจนมีลักษณะเป็นแผ่น



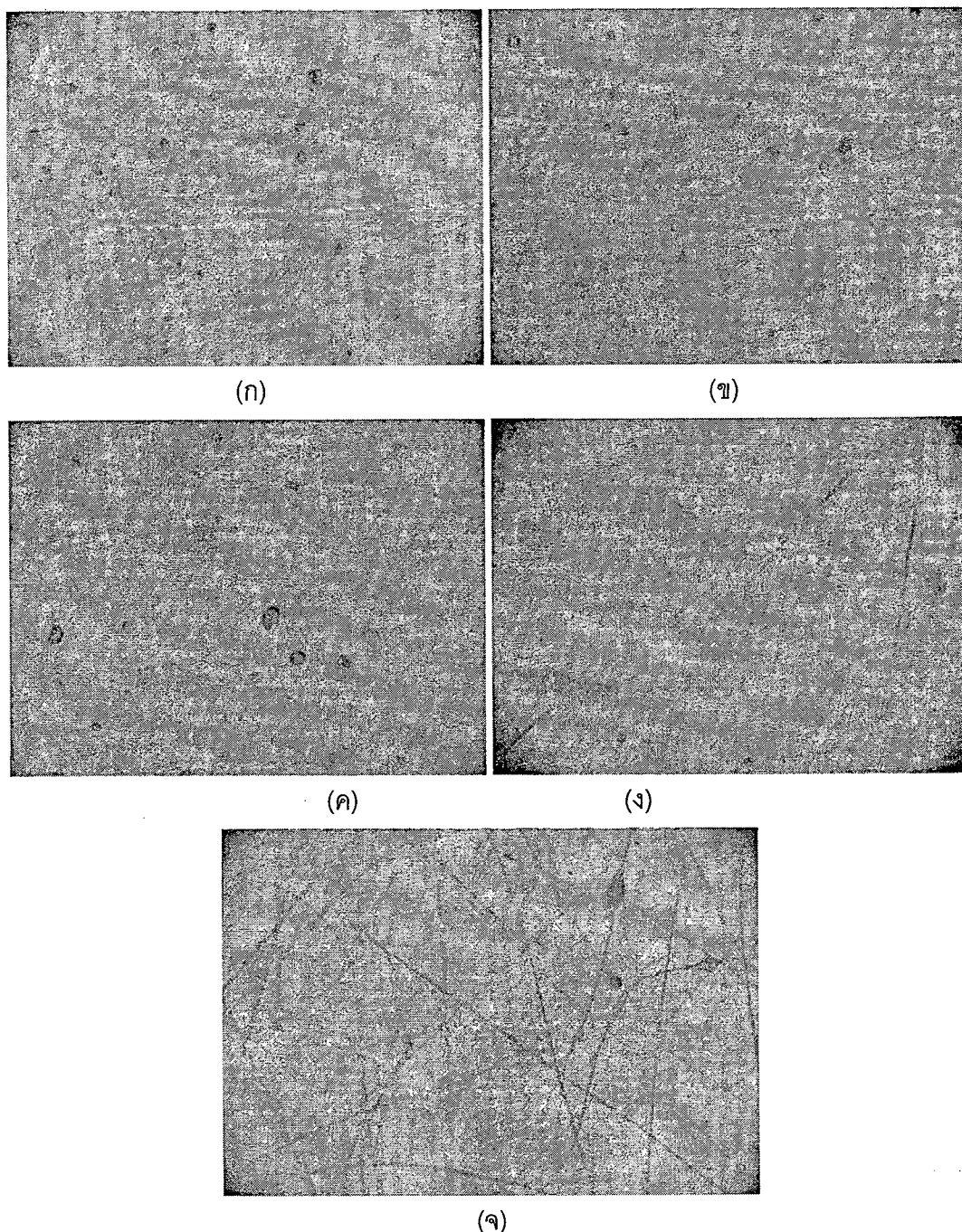
ภาพที่ 4.5 ลักษณะของการเกิด Clogging

โดยสรุป ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ในการผลิตฟิล์มจากสารละลายเอทิลเซลลูโลส ได้แก่

1. ความเข้มข้นของสารละลาย 8.5 – 14 %wt
2. แรงดันไฟฟ้าที่ 12, 14 และ 16 kV
3. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นรองรับเท่ากับ 10 เซนติเมตร
4. อัตราการไหลของสารละลาย 30  $\mu\text{L}/\text{min}$  และ
5. อัตราการไหลของตัวทำละลาย 7  $\mu\text{L}/\text{min}$

### 4.3 สัณฐานของเส้นใยจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Light microscope (LM)

ความเข้มข้นของสารละลาย และแรงดันไฟฟ้า เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อสัณฐานของเส้นใย (Deitzel *et al.*, 2001) ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษามวลของปัจจัยทั้ง 2 โดยทำการตรวจสอบสัณฐานของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ผลที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.6, 4.7 และ 4.8



ภาพที่ 4.6 สัณฐานของเส้นใยที่แรงดันไฟฟ้า 12 kV ที่ความเข้มข้น (ก) 5 %wt (ข) 7 %wt (ค) 9 %wt (ง) 11 %wt และ (จ) 13 %wt

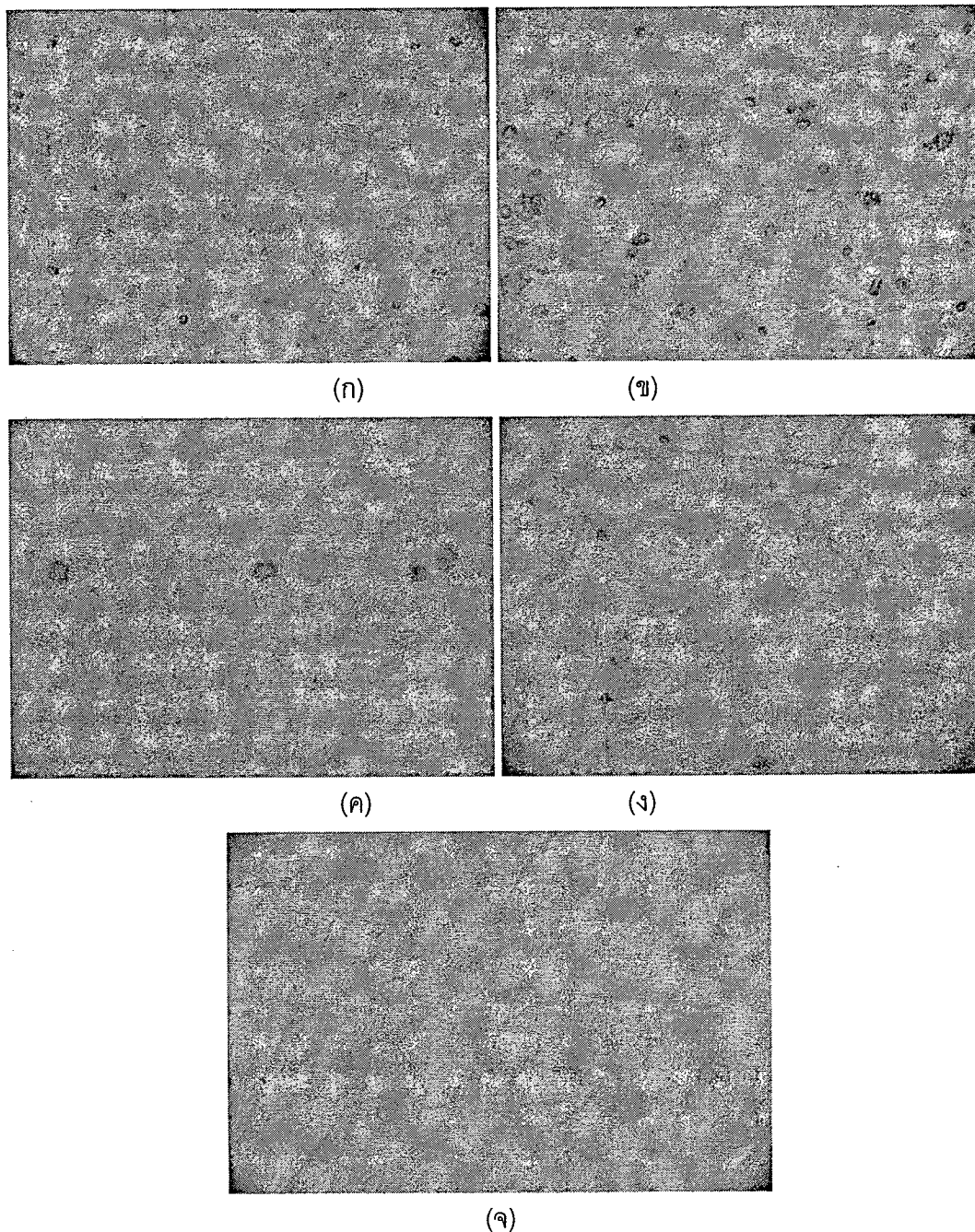
ภาพที่ 4.6 แสดงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่แรงดันไฟฟ้า 12 kV ภาพที่ 4.6 (ก) แสดงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 %wt จะสังเกตเห็นเพียง Bead โดยที่ไม่พบเส้นใย ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 %wt จะอยู่ในช่วง Semi-dilute unentangled ดังที่ได้อธิบายไว้แล้ว

ภาพที่ 4.6 (ข) เป็นรูปของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 7 %wt พบว่าสัณฐานของเส้นใยที่ได้ มีลักษณะคล้ายกับสัณฐานของเส้นใยที่ได้จากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 %wt ดังภาพที่ 4.6 (ก) สารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 7 %wt จะอยู่ในช่วง Semi-dilute unentangled ที่สายพอลิเมอร์ในสารละลายเอธิลเซลลูโลสไม่มีการเกี่ยวพันกัน จึงทำให้สัณฐานของเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็น Bead เมื่อสังเกตขนาดของ Bead ที่ได้จากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 7 %wt จะพบว่ามีความใหญ่กว่าขนาดของ Bead ที่สารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 %wt เนื่องจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 7 %wt มี Solid content มากกว่า

สัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 9 %wt มีการเปลี่ยนแปลงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นที่ 7 %wt คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 7 เป็น 5 %wt ส่งผลให้ขนาดของ Bead ใหญ่ขึ้น และจำนวน Bead ต่อพื้นที่น้อยลง ดังภาพที่ 4.6 (ค)

ภาพที่ 4.6 (ง) แสดงให้เห็นถึงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 11 %wt ว่ามีลักษณะเป็น Short fiber สลับกับ Bead ขนาดเล็กที่อยู่บนเส้นใย จากภาพที่ 4.5 พบว่าที่ความเข้มข้น 11 %wt ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้นจะอยู่ในช่วง Semi-dilute entangled จึงเป็นเหตุผลให้สายพอลิเมอร์ในสารละลายดังกล่าวเริ่มมีการเกี่ยวพันกัน จึงสังเกตเห็นเส้นใย อย่างไรก็ตามยังคงสังเกตเห็นเส้นใยสั้นๆที่เกิดจากการขาดของเส้นใยในขณะที่ยึดตัวกลางอากาศ ซึ่งน่าจะเกิดจากการเกี่ยวพันของสายพอลิเมอร์ที่ยังมีการเกี่ยวพันไม่มากนัก เนื่องจากพืงจะเป็นช่วงเริ่มต้นของช่วง Semi-dilute entangled และในส่วนของ Bead บนเส้นใยเกิดจากแรงผลักรังของประจุไฟฟ้าไม่สามารถเอาชนะแรงตึงผิวได้

สัณฐานของเส้นใยที่ได้จากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 13 %wt ดังภาพที่ 4.6 (จ) มีความต่อเนื่องมากขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ 13 %wt จะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายพอลิเมอร์อย่างเหนียวแน่นจึงทำให้ในขณะที่เกิดการยึดของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่อยู่กลางอากาศ แรงผลักรังของประจุไฟฟ้าไม่สามารถทำให้สายพอลิเมอร์ขาดออกจากกันได้ นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าขนาดของเส้นใยที่ความเข้มข้น 13 %wt มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยที่ความเข้มข้น 11 %wt เพราะสารละลายมีความหนืดมากจึงสามารถต้านแรงยึดทางไฟฟ้าได้มากกว่า จึงทำให้ในขณะที่เกิดการยึดตัวกลางอากาศ เส้นใยที่ความเข้มข้น 13 %wt สามารถยึดได้น้อยกว่าเส้นใยที่ความเข้มข้น 11 %wt

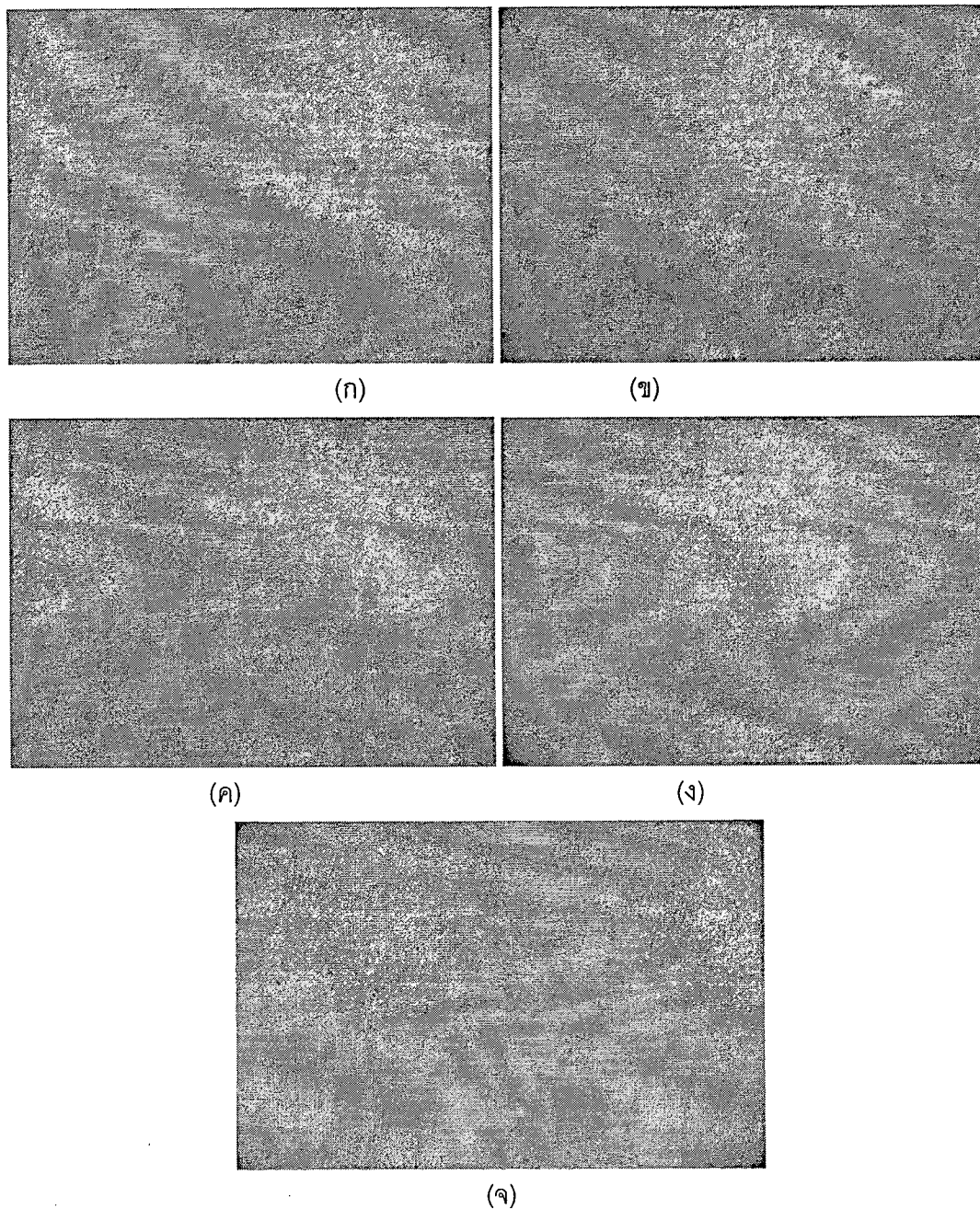


ภาพที่ 4.7 สัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น (ก) 5 %wt (ข) 7 %wt (ค) 9 %wt (ง) 11 %wt (จ) 13 %wt

สัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่แรงดันไฟฟ้า 14 และ 16 kV ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปจะมีความใกล้เคียงกับ สัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากแรงดันไฟฟ้า 12 kV ที่สารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ แต่ขนาด ของ Bead และ เส้นใยที่ได้จะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น ขนาด ของ Bead และเส้นใยจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เมื่อนำขนาดของ Bead ที่ได้จากสารละลายเอธิล เซลลูโลสที่ 9 %wt มาทำการเปรียบเทียบจะพบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 14 kV จะมีขนาดของ Bead ใหญ่กว่า Bead ที่ได้จากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นเดียวกันแต่ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 kV ประมาณ 150 % และที่

แรงดันไฟฟ้า 16 kV จะพบว่า มีขนาดของ Bead ที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่า Bead ที่ได้จากสารละลายเอธิล เซลลูโลสที่ความเข้มข้นเดียวกันแต่ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 kV ประมาณ 200 %

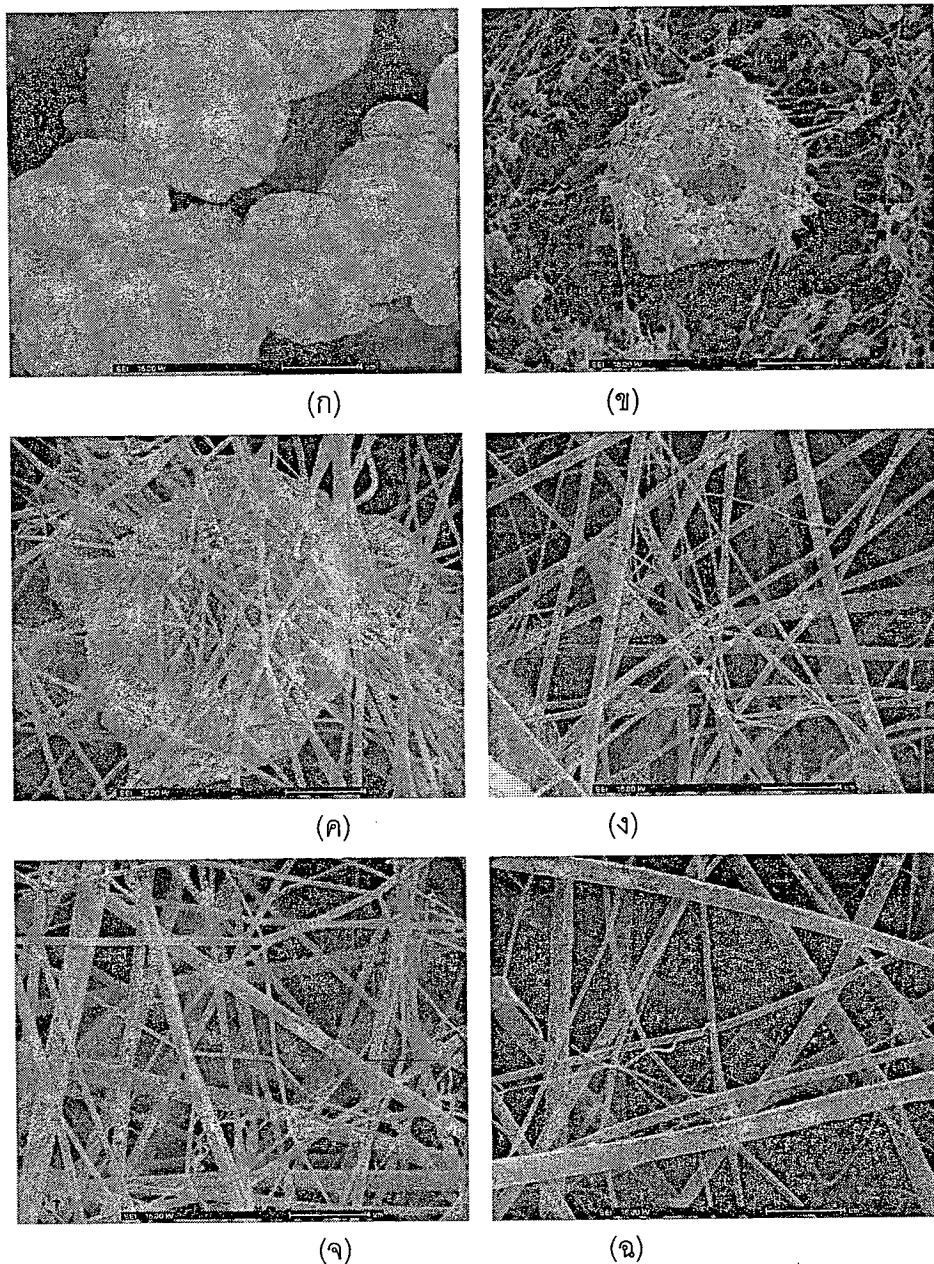
หลังจากที่ได้ทราบสัณฐานเส้นใยอย่างคร่าวๆจากการตรวจสอบด้วยกล้อง LM ในงานวิจัยส่วน ต่อไปจะเป็นการผลิตฟิล์มเพื่อนำไปตรวจสอบสัณฐานอย่างละเอียดอีกครั้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ชนิดส่องกราด (Scanning Electron microscope, SEM)



ภาพที่ 4.8 สัณฐานของเส้นใยที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV ที่ความเข้มข้น (ก) 5 %wt (ข) 7 %wt (ค) 9 %wt (ง) 11 %wt (จ) 13 %wt

4.4 สัณฐานของเส้นใยจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

เมื่อทำการตรวจสอบสัณฐานของเส้นใยอย่างคร่าวๆแล้ว ในส่วนนี้จึงจะเป็นการตรวจสอบสัณฐานของเส้นใยอย่างละเอียด เพื่อให้สามารถทำการวัดขนาดของเส้นใยได้ โดยจะใช้ภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron microscope, SEM) มาทำการวิเคราะห์

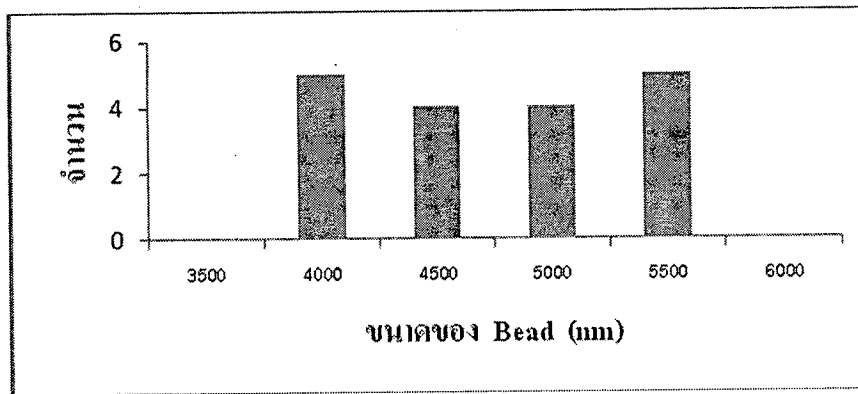


ภาพที่ 4.9 สัณฐานของเส้นใยที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV ที่ความเข้มข้น (ก) 5%wt (ข) 7%wt (ค) 9%wt (ง) 11%wt (จ) 12 %wt (ฉ) 13%wt

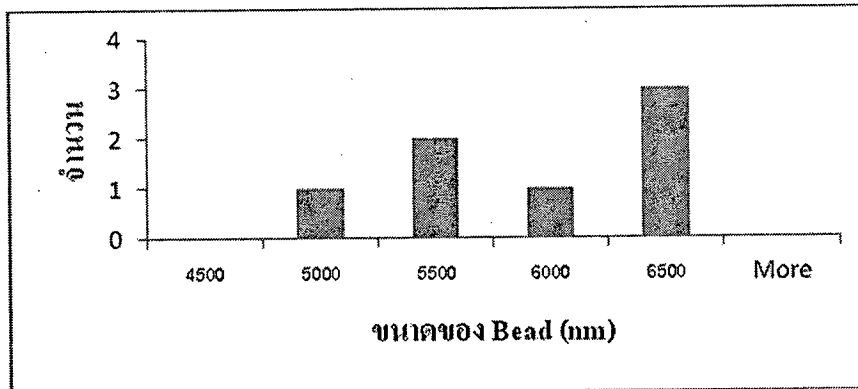
ภาพที่ 4.9 แสดงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอซิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 5 ถึง 13 %wt ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 16 kV ที่ความเข้มข้น 5, 7 และ 9 %wt พบว่าสัณฐานของเส้นใยที่ได้มี Bead อยู่อย่างหนาแน่น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายให้สูงขึ้นเป็น 11, 12 และ 13 %wt สัณฐานของเส้นใยที่ผลิต มีลักษณะเป็นเส้นใยที่มีพื้นผิวเรียบ และมีความยาวต่อเนื่อง

ภาพที่ 4.9 (ก) ถึง (ค) แสดงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5, 7 และ 9 %wt ที่ความเข้มข้นดังกล่าว สารละลายจะอยู่ในช่วงของ Semi-dilute unentangled (5 และ 7 %wt) จนถึงช่วงที่สารละลายเริ่มจะเข้าสู่ช่วง Semi-dilute entangled (9 %wt) จากรูปจะพบว่าที่ความเข้มข้น 5 %wt ไม่มีเส้นใยเกิดขึ้น สังเกตได้แต่เพียง Bead เนื่องจากในขณะที่ทำการผลิต ภายใน Polymer jet จะมีประจุอยู่อย่างหนาแน่น และทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้า แต่เนื่องจากสายพอลิเมอร์ที่อยู่ในสารละลายยังไม่ได้เกิดการเกี่ยวพัน จึงทำให้สาย Polymer jet ขาดออกจากกันและกลายเป็นเม็ดกลมๆ (Bead) ที่ความเข้มข้น 7 %wt พบว่าสัณฐานของเส้นใยที่ผลิต มีลักษณะเป็น Bead และ Bead บนเส้นใย ที่เป็นเช่นนี้อาจจะเป็นเพราะ สารละลายที่นำมาใช้ผลิตฟิล์มในงานวิจัยนี้ เป็นสารละลายคนละชนิดกับที่ได้ทำการตรวจเอกสารไว้ข้างต้น จึงทำให้สารละลายที่มีความหนืดอยู่ในช่วง Semi-dilute unentangled มีเส้นใยเกิดขึ้น และที่ความเข้มข้น 9 %wt สังเกตได้ว่าสัณฐานของเส้นใยส่วนใหญ่ มีลักษณะเป็นเส้นตรงยาว และมี Bead บนเส้นใย ที่เป็นเช่นนี้เพราะแรงตึงผิวมีค่ามากกว่าแรงยึดทางไฟฟ้า จึงทำให้บางส่วนของเส้นใยที่ผลิตมีลักษณะเป็น Bead

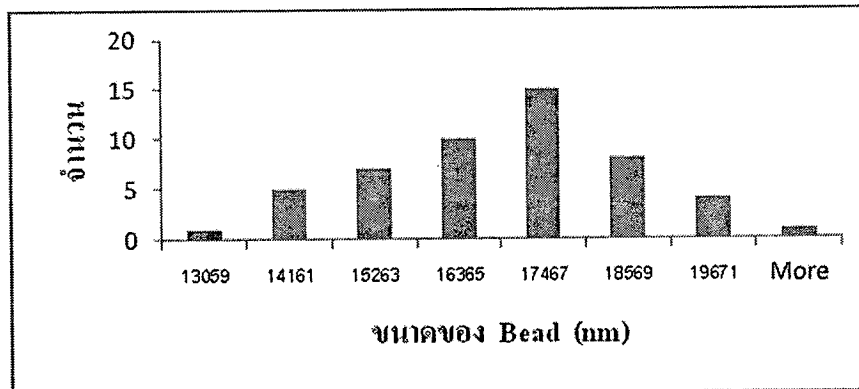
จากการวิเคราะห์ขนาดของเม็ด Bead ด้วย Software ImageJ พบว่าการกระจายตัวของขนาด Bead ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายเอธิลเซลลูโลสเป็นไปตามภาพที่ 4.10 โดยที่ขนาดของเม็ด Bead มีขนาดตั้งแต่ 4 ถึง 5.5  $\mu\text{m}$  , 5 ถึง 6.5  $\mu\text{m}$  และ 13 ถึง 20  $\mu\text{m}$  เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเท่ากับ 5 , 7 และ 9 %wt ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.10 Histogram แสดงการกระจายของขนาดของ Bead ที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV และความเข้มข้นของสารละลายที่ (ก) 5 %wt (ข) 7 %wt (ค) 9 %wt

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของ Bead ที่ความเข้มข้น 5, 7 และ 9 %wt ที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV จากผลการทดลองพบว่าขนาดของ Bead จะใหญ่ขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 5, 7 และ 9 %wt ขนาดเฉลี่ยของ Bead มีขนาด 4.3, 5.7 และ 16.4  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายมี Solid content สูงขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 4.2 ขนาดของ Bead ที่ความเข้มข้น 5 ถึง 7 %wt ที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV

ความเข้มข้น (%wt)	ขนาดของ Bead ( $\mu\text{m}$ )	
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	4.3	0.8
7	5.7	0.5
9	16.4	0.2

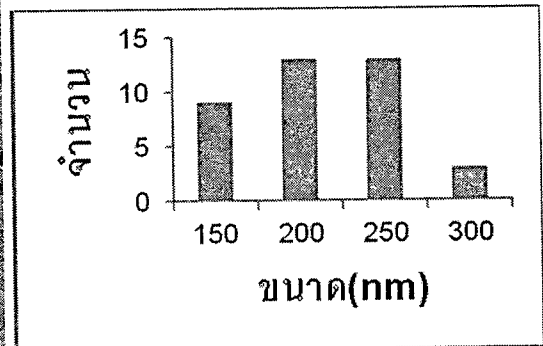
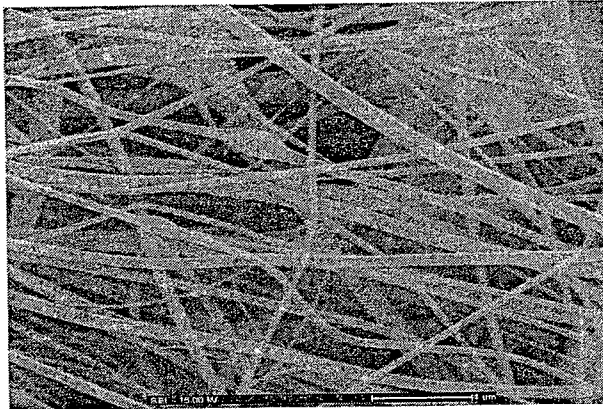
ในส่วนต่อไปเป็นการคำนวณหาความหนาแน่นของ Bead ที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV และสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 5 %wt, 7 %wt และ 9 %wt ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของ Bead ที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV

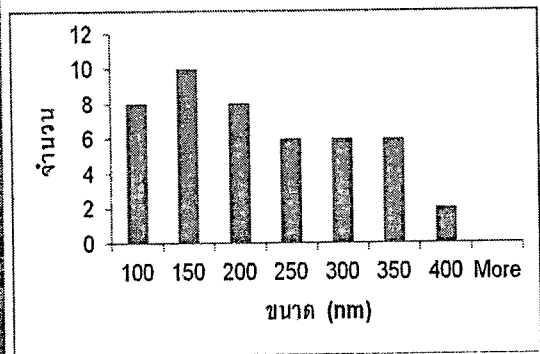
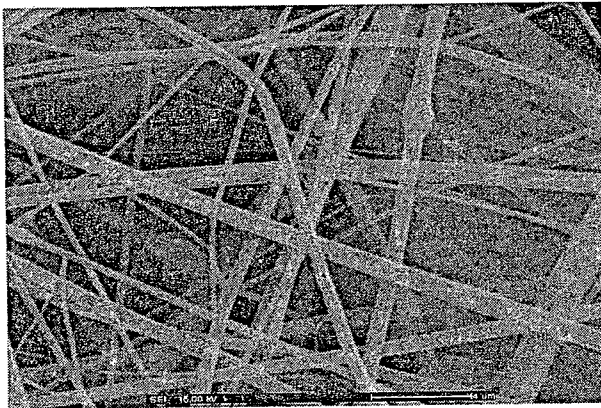
ความเข้มข้นของสารละลาย เอธิลเซลลูโลส (%wt)	ความหนาแน่นของ Bead (Bead/ $1000 \mu\text{m}^2$ )
5	105
7	15
9	3

ตารางที่ 4.3 สังเกตได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของ Bead จะน้อยลง เนื่องจากขนาดของ Bead มีขนาดใหญ่ขึ้น และ Polymer jet บางส่วนได้เปลี่ยนสภาพเป็น Short fiber จึงทำให้จำนวนเม็ด Bead ที่พบน้อยลง

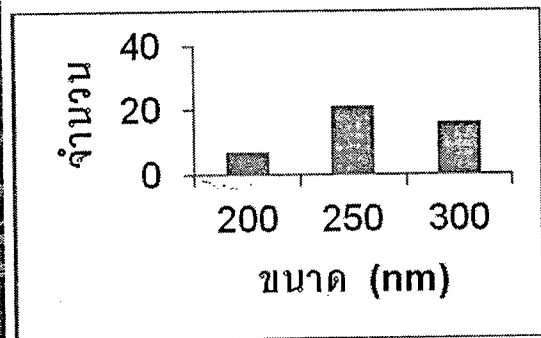
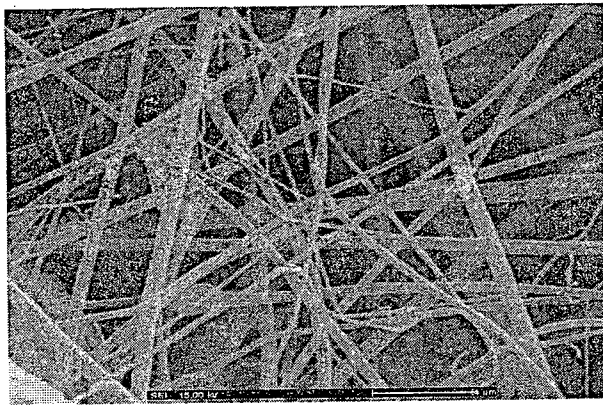
ภาพที่ 4.11 แสดงลักษณะของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 11 %wt ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ ภาพที่ 4.10 (ก) เป็นเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 11 %wt และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 12 kV สังเกตเห็นว่าเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาว มีขนาดของเส้นใยค่อนข้างสม่ำเสมอโดยที่ขนาดของเส้นใยเฉลี่ยประมาณ 187 nm เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 14 kV (ภาพที่ 4.10 (ข)) ขนาดเฉลี่ยของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นเป็น 193 nm และขนาดเฉลี่ยของเส้นใยยังคงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนกระทั่งมีขนาดประมาณ 230 nm เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 16 kV (ภาพที่ 4.10 (ค)) เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้มีแรงผลักรวมของประจุไฟฟ้าในสารละลายมากขึ้น ทำให้ Polymer jet เคลื่อนที่จากปลายเข็มด้วยความเร็วที่มากขึ้น เป็นผลให้เวลาที่ Polymer jet อยู่กลางอากาศน้อยลง และเดินทางไปถึงแผ่นรองรับเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับที่แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า เนื่องจากการยึดตัวของเส้นใยจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ Polymer jet อยู่กลางอากาศเท่านั้น จึงทำให้ขนาดของเส้นใยมีขนาดใหญ่กว่า นอกจากนี้ในการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นจะทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง และที่สนามไฟฟ้าสูงก็จะทำให้ความร้อนที่เกิดจากสนามไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ตัวทำละลายใน Polymer jet ระเหยเร็วขึ้นจึงทำให้เส้นใยแห้งกลางอากาศ และไม่สามารถที่จะยึดตัวได้อีก อย่างไรก็ตามตามลักษณะของเส้นใยยังพบว่ามี Bead บนเส้นใยปนอยู่เป็นจำนวนมาก ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.12



(ก)

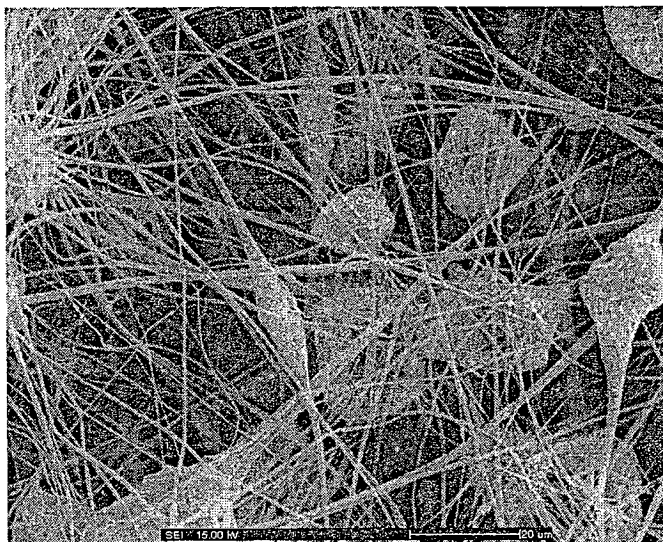


(ข)



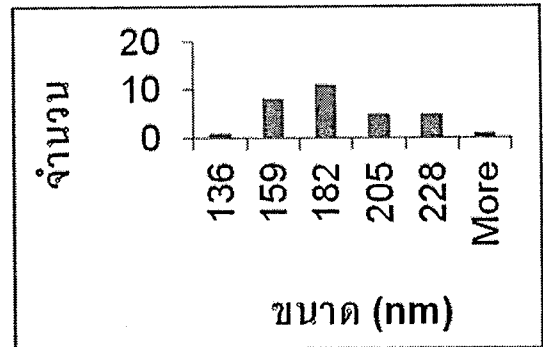
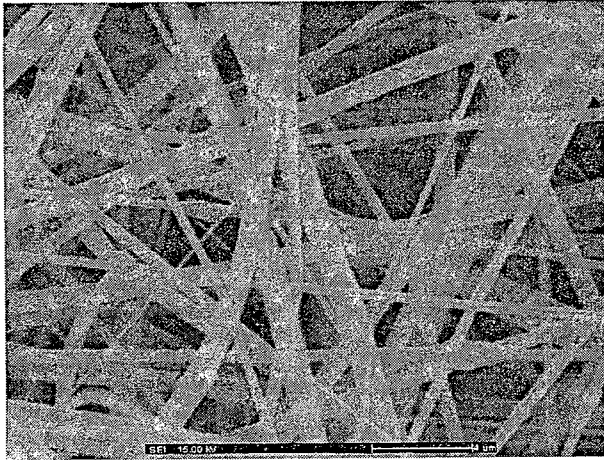
(ค)

ภาพที่ 4.11 สัณฐานเส้นใยของสารละลายเอริทริทอลที่ความเข้มข้น 11 %wt และแรงดันไฟฟ้าที่ (ก) 12 kV (ข) 14 kV (ค) 16 kV

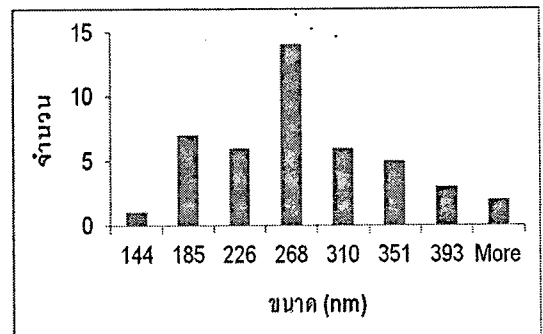
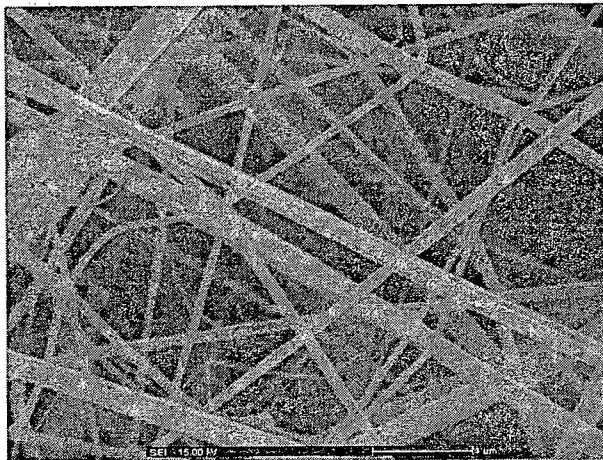


ภาพที่ 4.12 ลักษณะ Bead ที่ตรวจพบบนเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 11 %wt

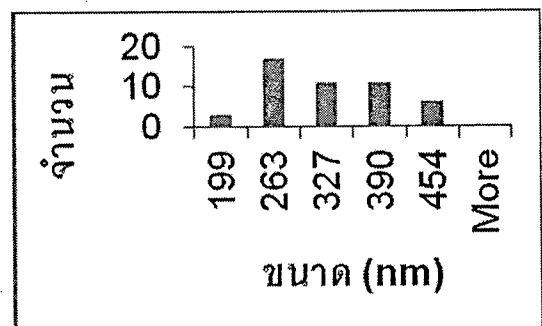
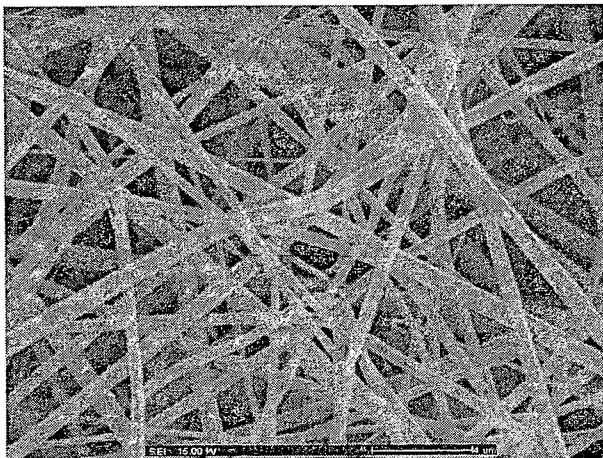
ภาพที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 12 %wt ที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ ภาพที่ 4.13 (ก) เป็นเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 12 %wt และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 12 kV จะสังเกตเห็นว่าเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาว มีขนาดของเส้นใยค่อนข้างสม่ำเสมอโดยที่ขนาดของเส้นใยเฉลี่ยประมาณ 179 nm เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 14 kV (ภาพที่ 4.13 (ข)) ขนาดเฉลี่ยของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นเป็น 260 nm และขนาดเฉลี่ยของเส้นใยยังคงมีขนาดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีขนาดประมาณ 296 nm เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 16 kV (ภาพที่ 4.13 (ค)) ผลที่ได้พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกรณีของเส้นใยที่ผลิตได้จากสารละลายที่ความเข้มข้น 11 %wt



(ก)

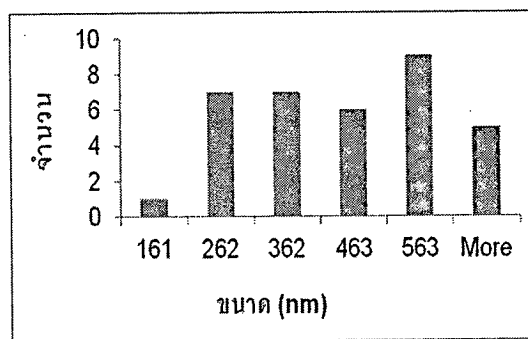
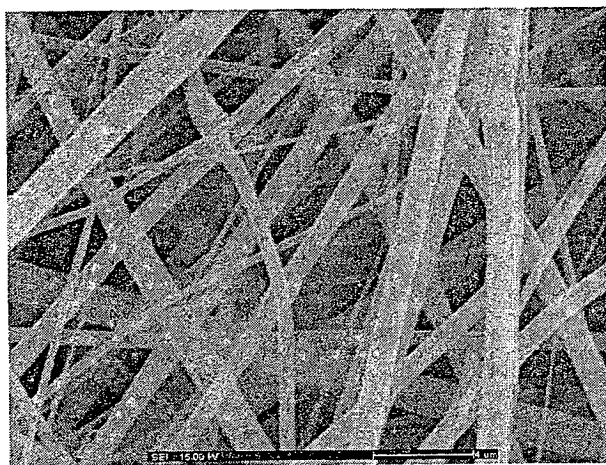


(ข)

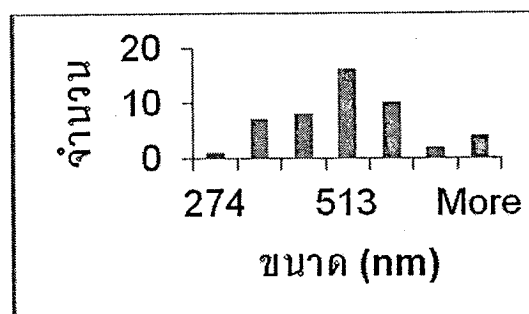
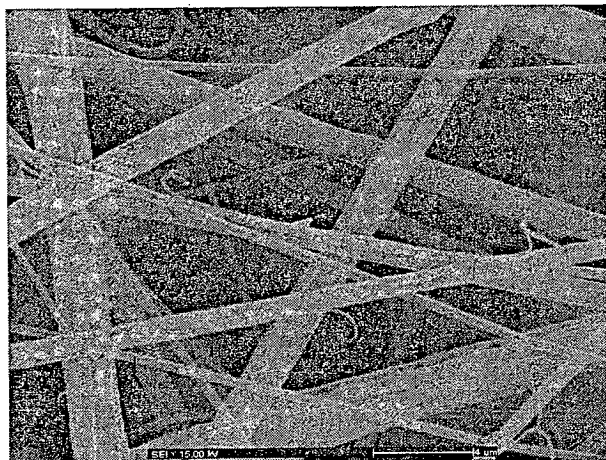


(ค)

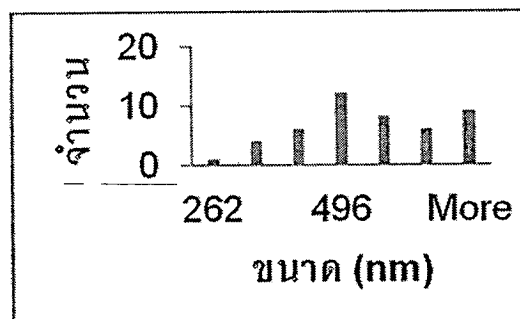
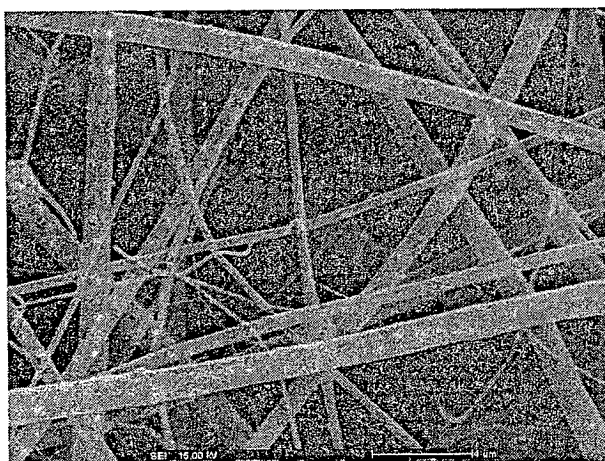
ภาพที่ 4.13 สัณฐานเส้นใยของสารละลายเอทิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 12 %wt และแรงดันไฟฟ้าที่ (ก) 12 kV (ข) 14 kV (ค) 16 kV



(ก)



(ข)



(ค)

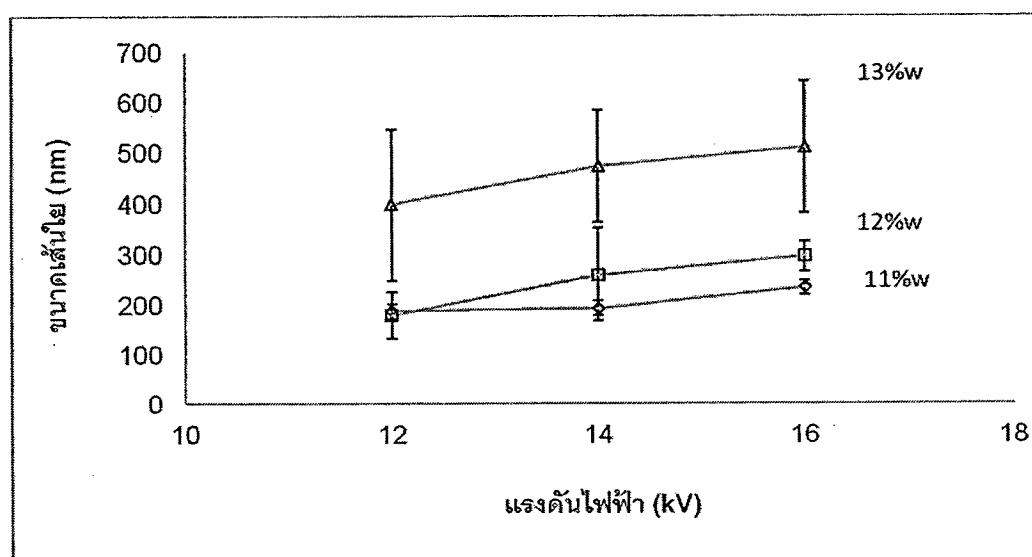
ภาพที่ 4.14 สัณฐานเส้นใยของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 13 %wt และแรงดันไฟฟ้าที่ (ก) 12 kV (ข) 14 kV (ค) 16 kV

สำหรับเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 13 %wt พบว่าผลของแรงดันไฟฟ้าต่อขนาดของเส้นใย มีความสอดคล้องกับกรณีของสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 11 และ 12 %wt กล่าวคือ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจาก 12 เป็น 14 และ 16 kV เส้นใยที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 398, 475 และ 511 nm ตามลำดับ เส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาว มีขนาดของเส้นใยค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.14

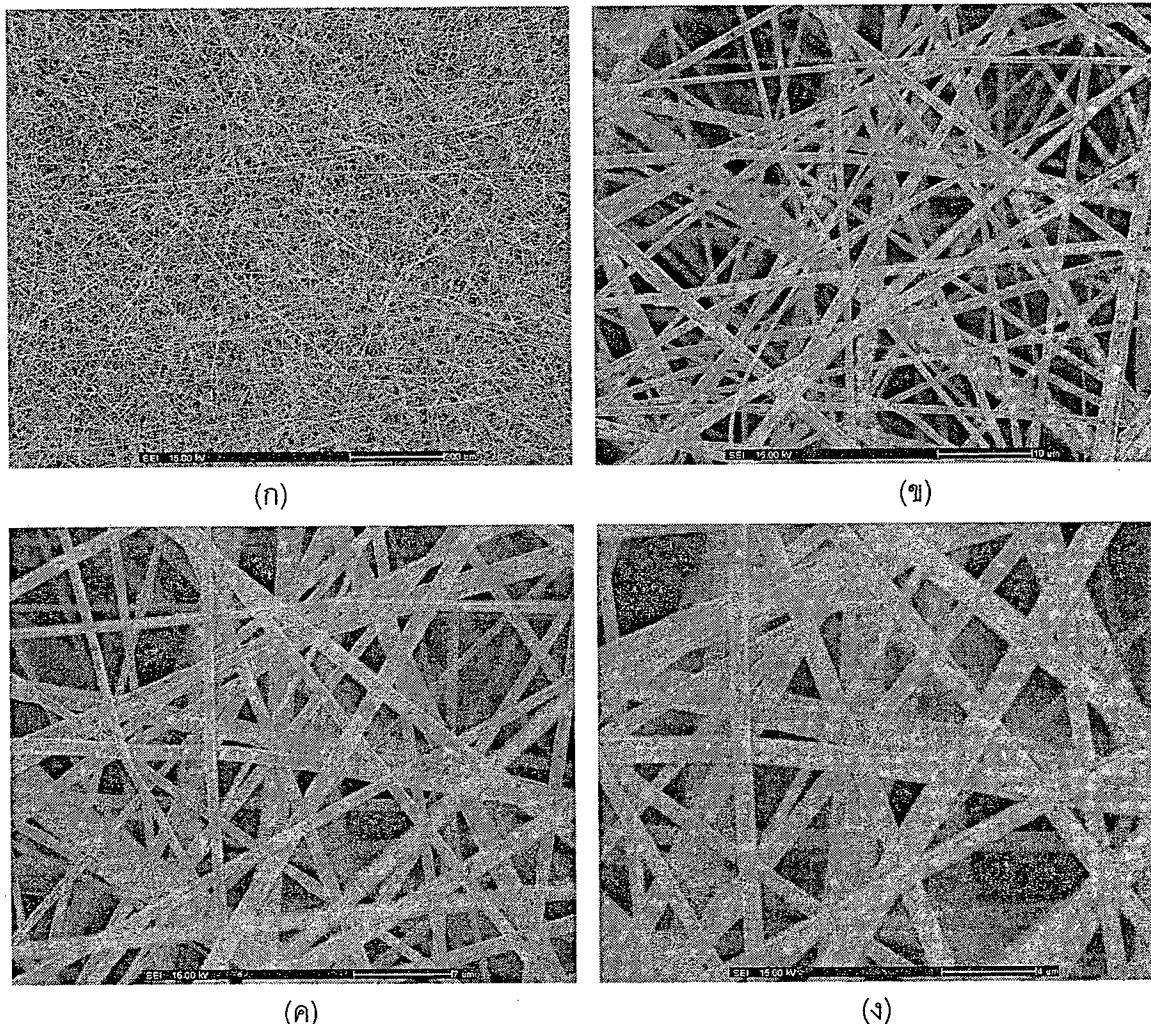
ตารางที่ 4.4 ขนาดของเส้นใย ที่ความเข้มข้น 11 ถึง 13 %wt ที่แรงดันไฟฟ้า 12, 14 และ 16 kV (จำนวนตัวอย่าง = 3 ซ้ำ)

ความเข้มข้น (%wt)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงมาตรฐาน
11	12	187	47
	14	193	92
	16	234	30
12	12	179	30
	14	260	70
	16	296	75
13	12	398	150
	14	475	111
	16	511	130

ตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้จากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 11, 12 และ 13 %wt ที่แรงดันไฟฟ้า 12, 14 และ 16 kV เมื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากตารางมาแสดงในรูปแบบของกราฟ จะได้กราฟดังภาพที่ 4.15

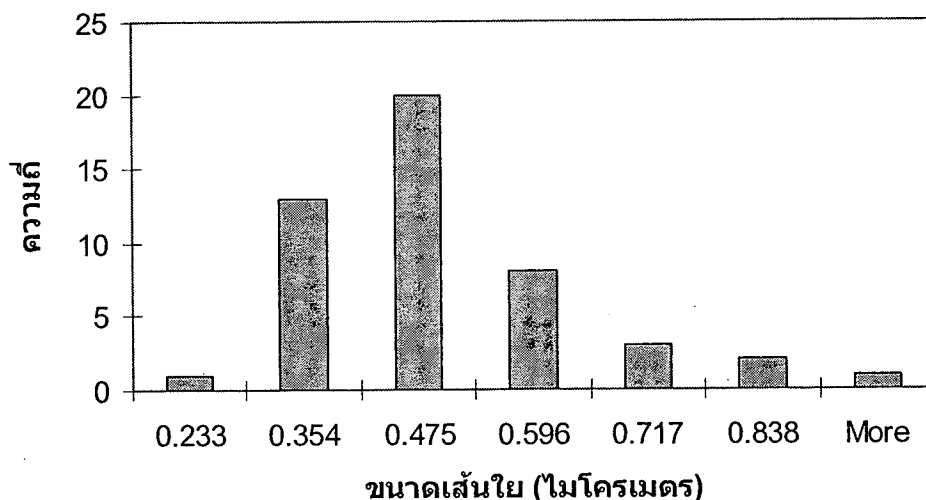


ภาพที่ 4.15 ขนาดของเส้นใยที่แรงดันไฟฟ้า 12, 14 และ 16 kV ที่ได้จากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 11, 12 และ 13 %wt



ภาพที่ 4.16 สัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสความเข้มข้น 13 %wt ผสมพูนานหาง จะเข้ในอัตราส่วน 0.9:0.1 โดยปริมาตรที่กำลังขยาย (ก) 100 เท่า (ข) 2000 เท่า (ค) 3000 เท่า (ง) 5000 เท่า

ภาพที่ 4.16 แสดงสัณฐานของเส้นใยที่ผลิตจากสารผสมระหว่างสารละลายเอธิลเซลลูโลสความเข้มข้น 13 %wt ผสมพูนานหางจะเข้ในอัตราส่วน 0.9:0.1 โดยปริมาตร จากการตรวจสอบพบว่า เส้นใยที่ได้มีความสม่ำเสมอมากกว่าเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสความเข้มข้น 13 %wt เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้เส้นใยที่ได้ยังมีขนาดเล็กกลางจาก  $511 \pm 130$  นาโนเมตร เหลือ  $432 \pm 159$  นาโนเมตร เนื่องจากพูนานหางจะเข้มีส่วนประกอบหลักคือน้ำ ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วมากกว่าเอทานอล สภาพการนำไฟฟ้าของสารผสมจึงสูงขึ้นและมีความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าจึงมีมากขึ้น ดังนั้นที่แรงดันไฟฟ้าค่าเดียวกัน แรงผลักทางไฟฟ้าภายใน Polymer jet จึงมีค่าสูงกว่า ส่งผลให้เกิดการยึดตัวมากกว่าและเส้นใยมีความเรียบมากกว่าและมีขนาดเล็กกลาง ภาพที่ 4.17 แสดงการกระจายตัวของขนาดเส้นใยที่ผลิตจากสารผสมระหว่างสารละลายเอธิลเซลลูโลสกับพูนานหางจะเข้ดังกล่าว



ภาพที่ 4.17 การกระจายขนาดของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสความเข้มข้น 13 %wt ผลสมร่วน  
 ว่างหางจระเข้ในอัตราส่วน 0.9:0.1 (ทำการทดลองทั้งสิ้น 3 ครั้ง)

ผลการวิจัยในส่วนนี้ แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นและแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อลักษณะของเส้นใย โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ 5, 7 และ 9 %wt สัณฐานของเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็น Bead และ Bead บนเส้นใย เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายให้สูงขึ้นเป็น 11 %wt จะพบว่าเส้นใยมีความต่อเนื่อง แต่ยังสามารถสังเกตเห็น Bead บนเส้นใย และที่ความเข้มข้น 12 และ 13 %wt พบว่าสัณฐานของเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงยาวต่อเนื่อง โดยขนาดของเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายให้สูงขึ้น ในกรณีผลของแรงดันไฟฟ้าต่อขนาดเส้นใย พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น เส้นใยจะมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การผสมร่วนว่างหางจระเข้ยังทำให้เส้นใยมีความเรียบมากขึ้นและมีขนาดเฉลี่ยเล็กลงอีกด้วย ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการผลิตฟิล์มเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงในส่วนต่อไป คือ 12 และ 13 %wt

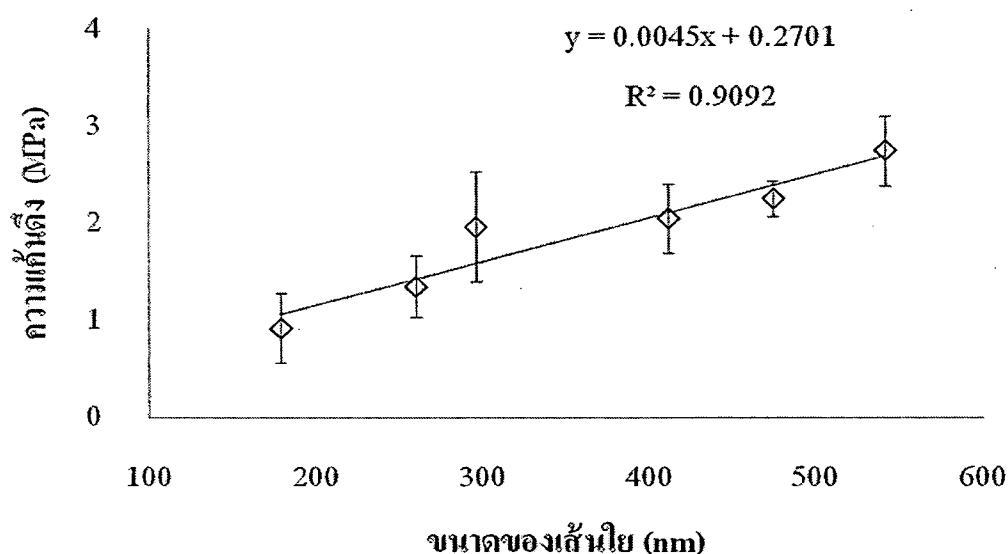
### 4.5 ความแข็งแรงของฟิล์ม

ในงานวิจัยส่วนนี้ เป็นการหาความแข็งแรงของฟิล์มที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 12 และ 13 %wt เพื่อหาว่าขนาดของเส้นใยและความแข็งแรงของฟิล์มมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความแข็งแรงของฟิล์มที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ 12 และ 13 %wt ที่แรงดันไฟฟ้า 12, 14 และ 16 kV (จำนวนตัวอย่าง = 3-5 ซ้ำ)

ความเข้มข้น (%wt)	แรงดันไฟฟ้า (kV)	ขนาดของเส้นใย (nm)	ความเค้นดึง (MPa)	ความเครียด (%)	ค่ามอดุลัสของยัง (MPa)
12	12	179	0.92±0.36	1.00±0.46	92.49
	14	260	1.35±0.32	1.08±0.48	124.95
	16	296	1.97±0.57	1.00±0.36	196.20
13	12	412	2.05±0.35	0.83±0.24	246.19
	14	475	2.25±0.19	1.034±0.30	270.29
	16	543	2.74±0.36	1.33±0.60	205.62

เส้นใยที่มีขนาด 179 nm จะมีความเค้นดึง และความเครียดเป็น 0.92 MPa และ 1 % ตามลำดับ เมื่อเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 260 nm จะความเค้นดึงจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.35 MPa (ประมาณ 47 %) ในขณะที่ความเครียดมีค่าใกล้เคียงกัน (เพิ่มประมาณ 8 %) และความเค้นดึงของเส้นใยที่มีขนาด 543 nm จะมีค่าเท่ากับ 2.74 MPa หรือประมาณ 3 เท่าของความเค้นดึงของเส้นใยที่มีขนาด 179 nm ในขณะที่ความเครียดเพิ่มขึ้นเพียง 33 % เท่านั้น



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นใยกับความเค้นดึง

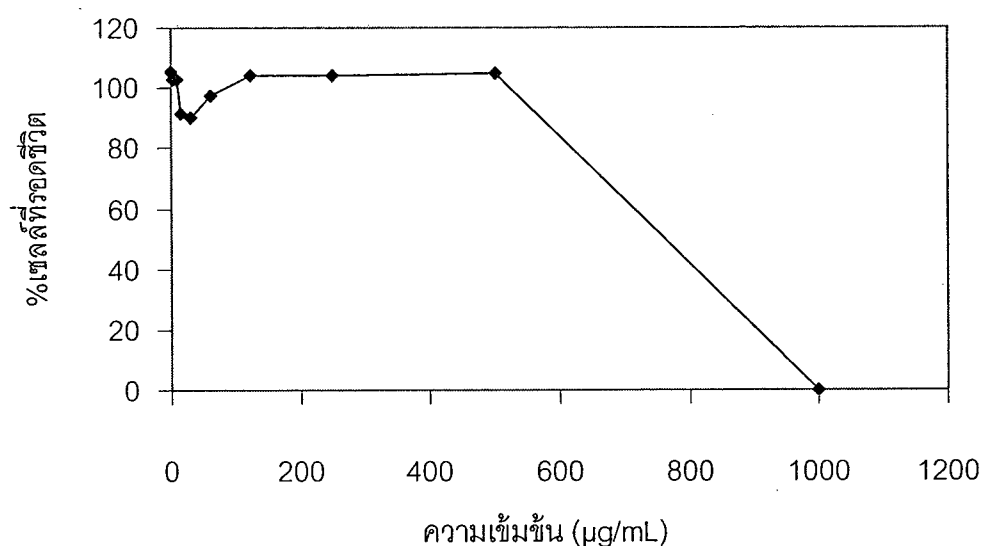
ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดเส้นใยและแรงดึง พบว่าแรงดึงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับขนาดของเส้นใย ตามสมการ  $y = 0.0045x + 0.2701$  โดยที่  $y$  คือค่า ความเค้นดึง (MPa) และ  $x$  คือ ขนาดของเส้นใย (nm) โดยที่มีค่าความสัมพันธ์รวม ( $R^2$ ) ระหว่าง  $X$  กับ  $Y$  เท่ากับ 91%

ผลการวิจัยในส่วนนี้ แสดงให้เห็นว่าขนาดของเส้นใยมีผลต่อความแข็งแรงของฟิล์ม โดยที่เมื่อเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำขนาดของเส้นใยและความเค้นดึงมาหาร้อยละความผิดพลาดของข้อมูลด้วย  $R^2$  สามารถยืนยันได้ว่าข้อมูลที่ได้กล่าวไว้ในตารางที่ 7 เป็นข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้ โดยที่ความแข็งแรงของฟิล์มที่มากที่สุด ได้จากฟิล์มที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 13 %wt ที่แรงดันไฟฟ้า 16 kV ดังนั้นเงื่อนไขของสารละลายที่เหมาะสมที่จะนำมาผสมกับว่านหางจระเข้คือ สารละลายเอธิลเซลลูโลสที่มีความเข้มข้น 13 %wt และใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 16 kV

การทดลองหาอัตราส่วนของสารละลายเอธิลเซลลูโลสต่อว่านหางจระเข้ที่เหมาะสมในการนำมาผลิตฟิล์ม จะใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายเอธิลเซลลูโลสต่อว่านหางจระเข้เป็น 5:5, 7:3 และ 9:1 โดยปริมาตร จากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วน 5:5 และ 7:3 โดยปริมาตร เอธิลเซลลูโลสที่อยู่ในสารละลายจะเกิดการตกตะกอนเป็นก้อนๆ อยู่ในสารละลาย เนื่องมาจากว่านหางจระเข้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำ (98 %) เมื่อนำมาผสมกับสารละลายเอธิลเซลลูโลส ทำให้ความเข้มข้นของตัวทำละลายลดลง จึงเป็นเหตุให้เอธิลเซลลูโลสที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำเกิดการตกตะกอน สำหรับอัตราส่วนของสารละลายเอธิลเซลลูโลสต่อว่านหางจระเข้ที่ 9:1 โดยปริมาตร ถึงแม้ความเข้มข้นของตัวทำละลายจะถูกเจือจางด้วยว่านหางจระเข้ แต่ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่เหลืออยู่ เพียงพอที่จะสามารถละลายเอธิลเซลลูโลสที่อยู่ในสารละลายได้ ดังนั้นอัตราส่วนของสารละลายเอธิลเซลลูโลสต่อว่านหางจระเข้ที่เหมาะสมในการนำมาผลิตฟิล์ม จะใช้อัตราส่วนระหว่างสารละลายเอธิลเซลลูโลสต่อว่านหางจระเข้คือ 9:1 โดยปริมาตร เมื่อนำสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่ผสมว่านหางจระเข้ในอัตราส่วนดังกล่าวมาทำการผลิตฟิล์ม พบว่าสามารถทำการผลิตฟิล์มได้ต่อเนื่อง โดยไม่เกิดการอุดตัน เมื่อนำฟิล์มที่ผลิตไปตรวจสอบลักษณะของเส้นใย จะสังเกตเห็นว่าขนาดของเส้นใยมีความสม่ำเสมอ ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาวและมีความต่อเนื่อง (ภาพที่ 4.16) เมื่อทำการวัดขนาดของเส้นใยจากภาพถ่าย SEM โดยใช้โปรแกรม ImageJ จะพบว่าเส้นใยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 432 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่าขนาดของเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสเดียวกัน แต่ไม่ได้ผสมว่านหางจระเข้ ทั้งนี้คาดว่าในการผสมว่านหางจระเข้ ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายลดลง ทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง เมื่อความหนืดลดลงทำให้แรงต้านการยืดของสารละลายมีค่าน้อยลง ทำให้เส้นใยสามารถยืดได้มากขึ้น และมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ในว่านหางจระเข้ มีโมเลกุลที่มีขั้วได้แก่ น้ำ และโปรตีนเป็นองค์ประกอบ ทำให้ความหนาแน่นของประจุในสารละลายสูงขึ้น ส่งผลให้แรงผลักระหว่างไฟฟ้ามากขึ้นด้วย จึงทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง

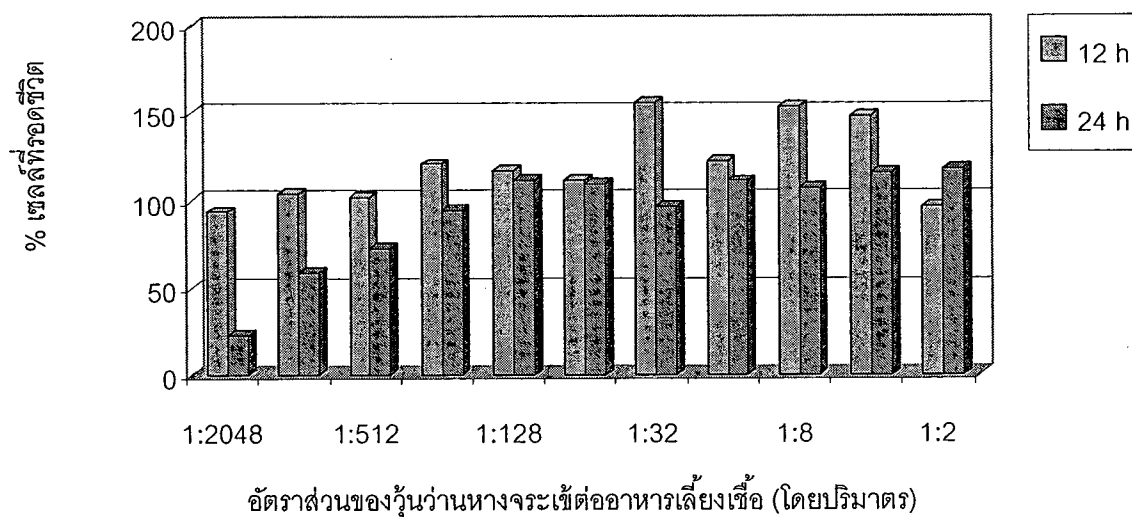
#### 4.6 ผลการทดสอบความเป็นพิษของฟิล์มต่อเซลล์

เนื่องจากฟิล์มที่ผลิตขึ้น มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นวัสดุปิดแผล ในการใช้งานจึงต้องมีการสัมผัสกับผิวหนังตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องทดสอบว่าฟิล์มมีความเป็นพิษต่อเซลล์หรือไม่ เซลล์ที่ถูกเลือกทดสอบในงานวิจัยนี้คือ Human skin fibroblast cell ภาพที่ 4.19 แสดงอัตราการรอดของเซลล์หลังจากทำการบ่มในตุ๊กกลางที่มีเอธิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 0.98-1,000  $\mu\text{g}/\text{mL}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เซลล์มีอัตราการรอดสูงกว่า 90% ที่ทุกความเข้มข้น ยกเว้นที่ความเข้มข้น 1,000  $\mu\text{g}/\text{mL}$  พบว่า อัตราการรอดชีวิตของเซลล์ต่ำในระดับที่ไม่สามารถตรวจพบได้ โดยภาพรวมอาจกล่าวได้ว่า เอธิลเซลลูโลสซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตฟิล์มเพื่อใช้เป็นวัสดุปิดแผล ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 500  $\mu\text{g}/\text{mL}$



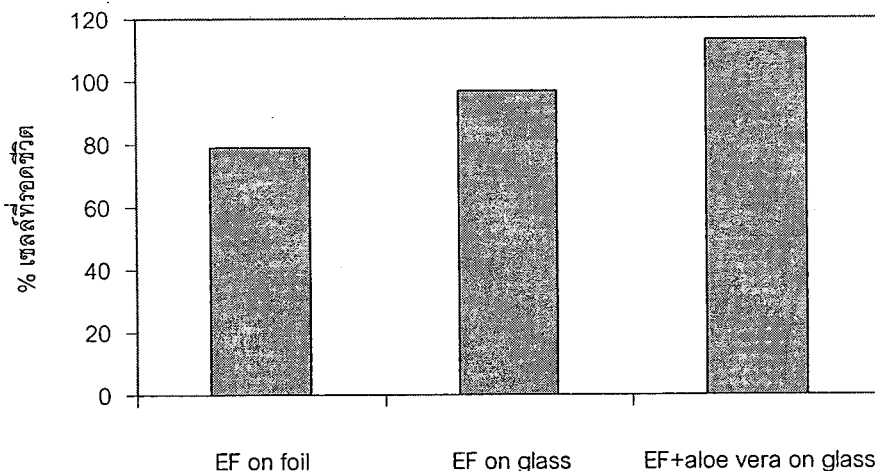
ภาพที่ 4.19 ปริมาณเซลล์ Normal Human skin fibroblast: CRL 2522 ที่รอดชีวิตภายหลังจากทดสอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีกับ Ethyl cellulose ที่ความเข้มข้น 0.98 – 1,000  $\mu\text{g}/\text{mL}$  (จำนวนตัวอย่าง = 3 ซ้ำ)

ภาพที่ 4.20 แสดงอัตราการรอดของเซลล์หลังจากทำการบ่มในตุ๊กกลางที่มีวุ้นว่านหางจระเข้ผสมในอาหารเลี้ยงเซลล์ด้วยอัตราส่วนตั้งแต่ 1:2048 จนถึง 1:2 โดยปริมาตรเป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสมต่ำสุด (1:2048) อัตราการรอดของเซลล์มีค่าประมาณ 90% เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงและลดเหลือประมาณ 20% ที่เวลา 24 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของวุ้นว่านหางจระเข้เป็น 1:128 โดยปริมาตรพบว่าอัตราการรอดของเซลล์ที่เวลา 12 และ 24 ชั่วโมงมีความใกล้เคียงกัน โดยภาพรวมพบว่าอัตราการรอดของเซลล์สูงกว่า 100% แสดงให้เห็นว่าวุ้นว่านหางจระเข้ไม่เป็นพิษต่อเซลล์เช่นเดียวกับเอธิลเซลลูโลสในระดับความเข้มข้นที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 4.20 ปริมาณเซลล์ Normal Human skin fibroblast: CRL 2522 ที่รอดชีวิตภายหลังจากทดสอบเป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ในอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีวุ้นว่านหางจระเข้ในอัตราส่วนต่างๆ (จำนวนตัวอย่าง = 3 ซ้ำ)

สุดท้ายเป็นการทดสอบความเป็นพิษของฟิล์มที่ผลิตต่อเซลล์ โดยได้ทำการทดสอบผลของวัสดุที่ใช้รองรับแผ่นฟิล์มด้วย โดยปกติการผลิตฟิล์มด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต มักนิยมทำบนกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อความสะดวก ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ต่อการเติบโตของเซลล์ ในขั้นต้นจึงได้ทำการผลิตแผ่นฟิล์มบนกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อตามวิธีที่นิยมโดยทั่วไป ด้วยการใช้เอธิลเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบเพียงอย่างเดียวโดยที่ไม่มีส่วนผสมของวุ้นว่านหางจระเข้



ภาพที่ 4.21 ปริมาณเซลล์ Normal Human skin fibroblast: CRL 2522 ที่รอดชีวิตภายหลังจากทดสอบเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ในอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีแผ่นฟิล์มแบบต่างๆ โดยที่ตัวย่อในแกน x คือ “EF on foil”, “EF on glass” และ “EF + aloe vera on glass” คือแผ่นฟิล์มเอธิลเซลลูโลสที่เตรียมบนกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์, แผ่นฟิล์มเอธิลเซลลูโลสที่เตรียมบนแผ่นกระจกใส และแผ่นฟิล์มเอธิลเซลลูโลสผสมวุ้นว่านหางจระเข้ที่เตรียมบนแผ่นกระจกใส (จำนวนตัวอย่าง = 3 ซ้ำ)

ผลการทดสอบที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงไว้ในภาพที่ 4.21 ซึ่งแสดงอัตราการรอดชีวิตของเซลล์หลังจากเวลาผ่านไป 16 ชั่วโมง ผลพบว่าอัตราการรอดชีวิตของเซลล์มีค่าต่ำกว่า 80% แต่เนื่องจากผลการวิจัยในส่วนก่อนหน้านี้นี้แสดงให้เห็นแล้วว่า ทั้งเอธิลเซลลูโลสและวุ้นว่านหางจระเข้สดต่างก็ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ จึงเป็นไปได้ว่ากระดาษอลูมิเนียมฟอยล์อาจจะมีความเป็นพิษต่อเซลล์ ทำให้อัตราการรอดชีวิตของเซลล์มีค่าต่ำลง เพื่อเป็นการพิสูจน์จึงได้มีการเปลี่ยนวัสดุรองรับที่ใช้ในการผลิตฟิล์มเอธิลเซลลูโลสเป็นแผ่นกระจกใส ผลการวิเคราะห์พบว่า อัตราการรอดของเซลล์สูงขึ้นเป็น 100% โดยประมาณ และเพิ่มเป็น 115% ในฟิล์มที่ผลิตจากสารละลายเอธิลเซลลูโลสที่มีวุ้นว่านหางจระเข้สดผสมในอัตราส่วน 1:9