

เอกสารวิทยาสด
ห้ามนำออกจากห้องสมุด
ใช้เฉพาะ ชั้น 5 เท่านั้น



การสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง
Synthesis of Silica Fiber with Sol-Gel Method by Electrospinning Technique

ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ

RMUTK - CARIT



3 2000 00100703 0

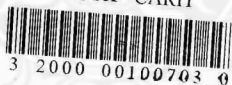
ประจำปีงบประมาณ 2548



การสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง
Synthesis of Silica Fiber with Sol-Gel Method by Electrospinning Technique

ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ

RMUTK - CARIT



ประจำปีงบประมาณ 2548

การสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

Synthesis of Silica Fiber with Sol-Gel Method by Electrospinning Technique

ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สนับสนุนโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณเงินผลประโยชน์
ประจำปี 2548

บทคัดย่อ

สารละลายซิลิกอนเตรียมด้วยอัตราส่วนเชิงโมเลกุลระหว่าง TEOS : EtOH : H₂O : HCl เท่ากับ 1 : 2 : 2 : 0.01 กวนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 50°C แล้วนำไปฉีดเป็นเส้นใยด้วยชุดอิเล็กทรอนิกส์สปinning ซึ่งมีการแปรผันตัวแปร 2 ค่า คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงถูกแปรผันที่ 5, 6, 7.5, 9 และ 15 kV ในขณะที่อัตราการป้อนสารถูกแปรผันที่ 3, 5, 7 และ 9 ml/h ตามลำดับ เส้นใยซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ผลทางเคมี โดยใช้เครื่อง FT-IR ซึ่งพบว่าหมู่หน้าที่ของสารก่อนฉีดเป็นเส้นใย และ หลังฉีดเป็นเส้นใยมีหมู่หน้าที่ใกล้เคียงกันโดยมีหมู่หน้าที่ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่ซิลิกา (Si-O-Si) และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในขณะที่ผลจากเครื่อง SEM แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.81 ถึง 9.45 μm ซึ่งจากข้อมูลที่ได้พิจารณาพบว่าที่สภาวะค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.5 และ 15.0 kV ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนสารและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยแสดงออกอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีความหนาใหญ่ขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่สภาวะดังกล่าวมีความเบี่ยงเบนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยน้อยแสดงให้เห็นว่าเส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้มีความสม่ำเสมอ (uniform) เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่อไป

Abstract

Sol solution was prepared from TEOS, EtOH, H₂O and HCl as mole fraction of 1:2:2:0.01 at stirring time 60 min and stirring temperature 50°C, before the synthesis of silica fiber by electrospinning instrument. Two factors were varied, the high voltage 5.0, 6.0, 7.5, 9.0 and 15.0 kV and feed rate of 3.0, 5.0, 7.0 and 9.0 ml/h, respectively. The FT-IR results showed that the silica fiber and sol solution contained the same functional groups as hydroxyl (-OH), silica (Si-O-Si) and carbonyl (C=O). The SEM images results demonstrated those silica fiber diameters were in rang of 1.81 to 9.45 μm . At the high voltage 7.5 and 15.0 kV, however, silica fiber diameter increased with an increase of feed rate. Additional, these conditions showed the low derivative value, since the silica fibers were uniform.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูป	ช
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการทำวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
2. วารสารปริทัศน์	3
2.1 โซล-เจลเทคโนโลยี	3
2.2 กระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์	4
2.3 การเกิดเป็นเจล	13
2.4 เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง	13
2.5 การประยุกต์ใช้เส้นใยที่ได้จากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง	15
2.6 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา	16
3. วิธีการทำงานวิจัย	19
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	19
3.2 วิธีการทดลอง	20

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล	22
4.1 การสร้างชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์	22
4.2 ผลการนิคเส้นใยซิลิกาและวิเคราะห์ผลทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM และ เครื่อง FT-IR	22
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	36
5.1 ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์	36
5.2 ลักษณะเส้นใยที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM model JEOL JSM-5800LV	36
5.3 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier transforms infrared)	36
5.4 อิทธิพลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและอัตราการใช้สาร	37
5.5 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	40
ก. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	41
ข. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)	43
ค. วิธีการคำนวณทางสถิติ	45
ง. ลักษณะของเส้นใยที่ผลิตได้ที่ตั้งเกิดด้วยตาเปล่า	46
ประวัตินักวิจัย	48

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เวลาในการเกิดเจลและค่าความเป็นกรด-ด่างสำหรับระบบ TEOS ใน ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ	8
2.2 ผลของค่า r ต่อลักษณะรูปร่างผลิตภัณฑ์โพลีซิลิกาที่ได้แก่ เจลก้อน เส้นใย แผ่นฟิล์มและ ผงอนุภาค	9
2.3 แสดงอัตราส่วนของสารเชิงโมลของงานวิจัยจันทน์ภษาและสาวตรี	18
3.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่แปรผันในการทดลอง	21
4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm)	33
4.2 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นใย	34

รายการรูป

รูป	หน้า
2.1 พฤติกรรมการเกิดโพลิเมอร์ของอนุภาคซิลิกาในสารละลายน้ำ (A) ใน สารละลายกรดหรือมีการเติมเกลือ อนุภาครวมกลุ่มกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ และเกิดเป็นเจล (B) ในสารละลายเบสอนุภาคขนาดใหญ่เกิดขึ้นและจำนวนอนุภาคลดลง	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ใน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ γ - โกลติคอกซิโพรพิลไครอิลคอกซิซิเลน	7
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลและค่า r ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอล และ TEOS คงที่	10
2.4 ลักษณะโครงข่ายที่แตกต่างกันของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจล	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราเร็วเฉลี่ยของปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน ของกระบวนการโซล-เจลในสารละลายกรดต่างๆ	12
2.6 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่สัมพันธ์กับอัตราการละลายของซิลิกาและเวลาในการเกิดเจลใน ระบบสารละลายน้ำ	12
2.7 กระบวนการโซล-เจล	13
2.8 องค์ประกอบของเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ทรานสปิณิง	18
4.1 ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์ทรานสปิณิง	22
4.2 เส้นใยที่ได้หลังการฉีดด้วยเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ทรานสปิณิง	23
4.3 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 3.0 mL/h	27
4.4 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 5.0 mL/h	24
4.5 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 7.0 mL/h	24
4.6 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 6.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 3.0 mL/h	25
4.7 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 6.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 5.0 mL/h	25
4.8 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 6.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 7.0 mL/h	26
4.9 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 6.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 9.0 mL/h	26
4.10 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.5 kV และ อัตราการป้อนสาร 3.0 mL/h	27
4.11 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.5 kV และ อัตราการป้อนสาร 5.0 mL/h	27

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.12 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.5 kV และ อัตราการป้อนสาร 7.0 mL/h	28
4.13 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.5 kV และ อัตราการป้อนสาร 9.0 mL/h	28
4.14 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 9.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 3.0 mL/h	29
4.15 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 9.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 5.0 mL/h	29
4.16 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 9.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 7.0 mL/h	30
4.17 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 9.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 9.0 mL/h	30
4.18 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 3.0 mL/h	31
4.19 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 5.0 mL/h	31
4.20 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 7.0 mL/h	32
4.21 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 9.0 mL/h	32
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm) กับ อัตราการป้อนสาร (mL/h)	33
4.23 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาเจล	35

ประมวลศัพท์และคำย่อ

cm	=	เซนติเมตร
mm	=	มิลลิเมตร
μm	=	ไมโครเมตร
nm	=	นาโนเมตร
mL	=	มิลลิลิตร
h	=	ชั่วโมง
ppm	=	ส่วนในล้านส่วน
Pa.s	=	พลาสติก.วินาที
r	=	อัตราส่วนเชิงโมระหว่างน้ำต่อ TEOS
R	=	หมู่ฟังก์ชัน
g	=	กรัม
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
kV	=	กิโลโวลต์
°C	=	องศาเซลเซียส
TEOS	=	เตตระเอทิลอซิซิลิเกต
SEM	=	Scanning Electron Microscope

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตเส้นใยได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยการผลิตเส้นใยจะสนใจที่ขนาดของเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับต่ำกว่าไมโครเมตรถึงนาโนเมตร

จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่ามีการนำสารประเภทโพลิเมอร์มาผลิตเป็นเส้นใยเพื่อประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น ทางด้านการแพทย์จะมุ่งเน้นการใช้งานทางด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ เช่น การทำอวัยวะเทียม โครงสร้างรองรับเนื้อเยื่อ วัสดุปิดแผล ด้านเวชภัณฑ์ และยังมีการประยุกต์ใช้ในการกรองซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการกรองสูงและด้านทานการไหลของอากาศต่ำ [1] โดยการผลิตสารที่มีลักษณะเป็นเส้นใยจะมีข้อดีในด้านการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัส นอกจากนี้พบว่ามันกัวชี่ได้นำเทคนิคโซล-เจลมาประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิววัสดุด้วยแผ่นฟิล์มแก้ว หรือนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ [2] ในลักษณะต่างๆ เช่น เป็นก้อน แผ่นฟิล์ม หรือแบบอสัณฐาน เป็นต้น ซึ่งสารตั้งต้นที่นิยมใช้ได้แก่สารจำพวกโลหะอัลคอกไซด์ ซึ่งมีหลายประเภท เช่น TMOS (Tetramethyl Orthosilicate) และ TEOS (Tetraethyl Orthosilicate) เป็นต้น ซึ่งสารดังกล่าวนี้ จะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาหลังเคลือบและมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวในการสัมผัส งานวิจัยนี้จะเลือกใช้สารตั้งต้นที่ชื่อ เตตระเอทิลออร์โธซิลเคต หรือ TEOS มาเป็นสารตั้งต้นเนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydrolysis) ได้อย่างรวดเร็วซึ่งจะเกิดได้สมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่ใช้ นอกจากนี้โมเลกุลของ TEOS ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ 2 โมเลกุลสามารถเชื่อมโยกันได้โดยปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation) ซึ่งจะทำให้เกิดโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างที่ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาวะและเครื่องมือในกระบวนการผลิต [3] ซึ่งวิธีการทำให้เป็นเส้นใยมีเทคนิคในการผลิตด้วยกันหลายแบบ เช่น การดึงยัด (Drawing) การสังเคราะห์แบบเทมเพลต (Template Synthesis) การแยกเฟส (Phase Separation) และ อิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีอิเล็กโตรสปินนิง เนื่องจากอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องมีน้อยชิ้น การคิดค้นทำได้ง่าย ซึ่งจากการค้นคว้าพบว่าการผลิตเส้นใยโดยใช้วิธีอิเล็กโตรสปินนิงจะใช้อุปกรณ์หลักๆเพียง 3 ส่วน คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง, หลอดแคปิลลารีและแผ่นรองโลหะ โดยตัวแปรในการควบคุมมี 2 ตัวแปร คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (High Voltage, kV) และอัตราการป้อนสารตั้งต้น (Flow Rate, ml/h) โดยจะฉีดเส้นใยออกมาในทิศทางแนวนอน (Horizontal) เพื่อคัดผลกระทบของแรงโน้มถ่วงที่มีต่อสารตั้งต้นในหลอดแคปิลลารี ในขณะที่ทำการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตเส้นใยซิลิกา
- 1.2.3 เพื่อทดสอบสมบัติของเส้นใยซิลิกาที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ผลิตเส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง
- 1.3.2 แปรผันค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 3.0, 5.0, 7.5, 9.0 และ 15.0 kV และอัตราการป้อนสารตั้งต้นที่ 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 ml/h
- 1.3.3 วิเคราะห์ข้อมูลของเส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ คือ
 - SEM (Scanning electron microscope)
 - FT-IR (Fourier transforms infrared)

1.4 วิธีการทำวิจัย

- 1.4.1 เตรียมสารละลายโซล-เจล
- 1.4.2 ทดลองผลิตสารละลายที่เตรียมได้ด้วยชุดทดลองอิเล็กโตรสปินนิง
- 1.4.3 วิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและเคมีของเส้นใยที่ผลิตได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเส้นใยซิลิกา
- 1.4.2 ทราบลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและเคมีของเส้นใยซิลิกา เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 โขล-เจลดเทคโนโลยี [3,4,10]

2.1.1 สารแขวนลอย (Suspension agent)

หมายถึงสารผสมที่เกิดจากสาร 2 ชนิดรวมกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า มีลักษณะขุ่น เนื่องจากอนุภาคที่แขวนลอยอยู่มีขนาดใหญ่และอนุภาคที่แขวนลอยอยู่เหล่านี้ไม่อาจแขวนลอยอยู่กับสารละลายอื่นเป็นสารผสมอยู่ได้นาน แต่จะจมลงสู่เบื้องล่างแล้วแยกออกจากสารชนิดอื่น

2.1.2 สารคอลลอยด์ (Colloid agent)

เป็นสารผสมของสาร 2 ชนิด ชนิดหนึ่งมีโมเลกุลต่อเนื่องกันเรียกว่า Continuous Phase หรือ Dispersion Medium อีกชนิดหนึ่งเป็นโมเลกุลหลายๆ โมเลกุลรวมกันเป็นอนุภาคมีขนาดอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร เรียกว่า Discontinuous Phase หรืออนุภาคคอลลอยด์ โดยอนุภาคคอลลอยด์จะมีสมบัติดังนี้

1. มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของอนุภาคของตัวถูกละลาย แต่เล็กกว่าอนุภาคแขวนลอยมีขนาดอยู่ระหว่าง 1-100 นาโนเมตร เรียกว่า Discontinuous Phase หรืออนุภาคคอลลอยด์

2. อยู่ตัวได้นานคล้ายกับอนุภาคของตัวถูกละลาย ซึ่งคอลลอยด์สามารถแบ่งประเภทได้เป็น 6 ประเภทดังนี้

- โขล (Sols) เป็นระบบคอลลอยด์ซึ่งมีอนุภาคคอลลอยด์เป็นของแข็งแขวนลอยในของเหลว ตัวอย่าง เช่น ทองคำ กำมะถัน Fe_2O_3 หรือ AgCl ในน้ำ โดยโขลจะมีความหนาแน่นของของแข็งมากกว่าของเหลวที่อยู่บริเวณรอบๆ อนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลวจะมีขนาดเล็กมากจนความหนาแน่นของของเหลวมีความสามารถต้านทานแรงโน้มถ่วงของโลกได้และสามารถพยุ้อนุภาคของแข็งให้แขวนลอยอยู่ได้โดยไม่มีตะกอน

สารละลายที่ใช้ในการกระจายตัวของอนุภาค Colloidal ของโขล โดยทั่วไปจะเป็นน้ำหรือสารละลายที่ประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่หรือแอลกอฮอล์

- อิมัลชัน (Emulsion) เป็นระบบคอลลอยด์ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์เป็นของเหลวแขวนลอยอยู่ในของเหลว ตัวอย่างเช่น น้ำมันแขวนลอยอยู่ในน้ำส้มสายชู นมและครีม เป็นต้น

- แอโรซอล (Aerosol) เป็นคอลลอยด์ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้แขวนลอยในแก๊ส มีลักษณะเป็นควันหรือหมอก เช่น ของแข็งและของเหลวแขวนลอยในอากาศ ตัวอย่างอื่นๆ ได้แก่ สเปรย์ชนิดต่างๆ เช่น สเปรย์ฆ่าแมลง สเปรย์ไล่ลม เป็นต้น

- โฟมของเหลว เป็นคอลลอยด์ที่มีอนุภาคแก๊สแขวนลอยในของเหลว เช่น ฟองสบู่
- โฟมของแข็ง เป็นคอลลอยด์ที่มีอนุภาคแก๊สแขวนลอยในของแข็ง เช่น ฟองน้ำสบู่อ่อน

เป็นต้น

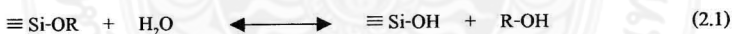
2.1.3 เจล (Gel)

คือ โครงสร้างอนุภาคของแข็งที่เป็นรูพรุนเชื่อมต่อกันเป็น 3 มิติ มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับ ภาชนะที่บรรจุ ถ้าอนุภาคของแข็งประกอบด้วยอนุภาคของโซล เจลนั้นก็จะเป็น colloidal gel ด้วย แต่ถ้าโครงสร้างของแข็งประกอบด้วย sub-colloidal หรือมีขนาดเล็กมาก เจลจะถูกเรียกว่า polymeric gel โดยทั่วไปเจลจะขึ้นอยู่กับการรวมตัวระหว่างโครงสร้างของของแข็ง และตัวกลางของของเหลวที่สภาวะสมดุล ถ้าของเหลวประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า aquagel หรือ hydrogel เป็นเจลที่บาง สามารถค้ำให้ค้ำได้ง่าย แต่ถ้าของเหลวประกอบด้วยแอลกอฮอล์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกเจลนั้นว่า alcogel ในการสังเคราะห์ของเหลวออกจากเจล สารที่เหลือจะกลายเป็นของแข็งที่แตกออกได้ง่าย โดยเรียกว่า Aerogel หรือ Xerogel ขึ้นอยู่กับอัตราการคั่งของเหลวออก

2.2 กระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์ [4,10]

กระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์ คือกระบวนการหนึ่งที่ใช้สังเคราะห์วัสดุเซรามิกและ แก้ว โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสตามด้วยปฏิกิริยาคอนเดนเซชันโพลิเมอไรเซชันของซิลิกอนอัลคอกไซด์ (Si-O-R) ผลิตภัณฑ์ประเภทซิลิเกตเจล (เจลที่มีโครงสร้างพื้นฐานเป็น SiO_4^{4-}) มักจะถูกสังเคราะห์จากไฮโดรไลซิสของเตตระอัลคอกซิเจนที่มีอัลคอกไซด์ 4 กลุ่ม (เช่น เตตระมีทอกซิซิลีน (TMOS), เตตระอีทอกซิซิลีน (TEOS)) และมีกรดเกลือ (mineral acid เช่น HCl) หรือเบส (เช่น NH_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากหมู่ฟังก์ชัน (หมู่แอลคอกไซด์ (OR) และหมู่ไฮดรอกซิล) จะมี 3 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในกระบวนการโซลเจล (Brinker และ Scherer, 1990) ร่วมกับปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังนี้

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



ปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่ผลิตแอลกอฮอล์



ปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่ผลิตน้ำ



เมื่อ R เป็นหมู่แอลคิล, $\text{C}_x\text{H}_{2x+1}$

ในการผลิตของเตตระอีทอกซิซิลีน (tetraethoxysilane, TEOS) R เป็น C_2H_5

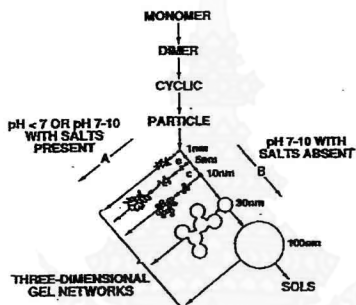
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (สมการที่ 2.1) เกิดจากการแทนที่หมู่แอลคอกไซด์ (-OR) ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ตามด้วยปฏิกิริยาคอนเดนเซชันซึ่งเกิดจากการรวมหมู่ซิลานอล (-Si-OH) เพื่อสร้าง

พันธะไฮโดรเจน (-Si-O-Si-) เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (by product) เป็นแอลกอฮอล์ (ROH) (สมการที่ 2.2) หรือน้ำ (สมการที่ 2.3) ซึ่งในสภาวะโดยทั่วไป การเริ่มต้นของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะเกิดขึ้นก่อน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเสร็จสมบูรณ์เนื่องจากน้ำและซิลิกอนอัลคอกไซด์ไม่ละลายเข้ากันจึงนิยมใช้ แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายร่วม แต่อย่างไรก็ตาม เจลสามารถเตรียมได้จากการผสมของซิลิกอน อัลคอกไซด์และน้ำโดยไม่ต้องอาศัยตัวทำละลายร่วม เพราะแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิด จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้สารตั้งต้นทั้งสองละลายเข้ากันได้ ลำดับของการ เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ในระบบที่มีและไม่มีแอลกอฮอล์จะมีผลต่อ ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวต่อไป

ในกระบวนการไฮโดร-เจลผลิตภัณฑ์เบื้องต้นคือ ไฮโดรเมือปถ่ายทิ้งไว้ไฮโดรจะค่อยๆเกิดพันธะเชื่อมต่อกันเป็นเจล ซึ่งจะเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ไฮโดรสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะคือ พาร์ทิคูลาเทไฮโดร (particulate sols) โดยทั่วไป เมื่อไฮโดรมีขนาดมากกว่า 5 นาโนเมตร และโพลิเมอร์ไฮโดร (polymeric sols) ในกรณีที่มี ไฮโดรมีขนาดน้อยกว่า 1 นาโนเมตร ทำให้เจลที่เกิดตามมาแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะเช่นเดียวกัน คือ พาร์ทิคูลาเทเจล (particulate gels) และ โพลิเมอร์เจล (polymeric gels) โดยที่พาร์ทิคูลาเทเจล หมายถึง มวลลักษณะซึ่คหุ่่นได้เกิดจากอนุภาคไฮโดรเชื่อมโยงกันด้วยแรงที่ผิว (surface force) เช่น แร่งวันเคอร์- วาลส์ เกิดเป็นโครงสร้ง (network) ขึ้น ส่วนโพลิเมอร์เจล หมายถึงมวลลักษณะซึ่คหุ่่นได้ซึ่งเกิดจาก การเชื่อมโยงไฮโดรด้วยพันธะโควาเลนต์

ในกรณีของพาร์ทิคูลาเทเจลสามารถอธิบายได้โดยอาศัยรูปที่ 2.1 ซึ่ง Engelhard และคณะ (1977) และ Iler (1979) พบว่าในระบบซึ่งมีน้ำปริมาณมากเกินพอและไม่ใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายร่วม ลักษณะของเจลที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายน้ำ กล่าวคือ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 อนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงมาเกาะกันด้วยแรงวันเคอร์วาลส์ ลักษณะเช่นนี้สามารถเกิดขึ้นในระบบที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น (ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 7-10) เมื่อมีเกลืออยู่ในระบบ เนื่องจากเกลือจะทำหน้าที่ลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคมาเกาะตัวกันเป็นโครงข่ายเจลได้ง่ายขึ้น ส่วนในระบบที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 7-10 และไม่มีเกลือ อนุภาคจะโคจขึ้นมากเป็นไฮโดรที่เสถียร ซึ่ง จะไม่สามารถเกาะตัวกันเป็นเจลได้ สำหรับกลไกของการเกิดเจลในกรณีพาร์ทิคูลาเทเจล ปฏิกิริยา คอนเดนเซชันเกิดในทิศทางที่จะได้พันธะไฮโดรเจนมากที่สุดและเหลือกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) น้อยที่สุด อยู่ที่ปลายของโมเลกุล ดังนั้นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจึงเกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับ โดยเริ่มจาก โมโนเมอร์ ไดเมอร์ ไตรเมอร์ที่เป็นเส้นตรง ไตรเมอร์ที่เป็นวง เตตระเมอร์ที่เป็นวง จนกระทั่งได้วงของ โพลิเมอร์ที่ใหญ่ขึ้น จนเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่แน่นอน (รูปที่ 2.1 B) จะเห็นได้ว่าการเกิดอนุภาคใน ลักษณะนี้จะต้องอาศัยปัจจัย 2 ประการคือ การแตกตัวของวงโพลิเมอร์ (depolymerization ซึ่งเกิดจาก ปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.2 หรือ 2.3) และการเติมโมโนเมอร์เข้าสู่วงโพลิเมอร์พบว่า การเพิ่ม ขนาดของอนุภาคจะหยุดเมื่อความแตกต่างระหว่างความสามารถในการละลายของอนุภาค (การละลาย ของพันธะไฮโดรเจน) ที่เล็กที่สุดและอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดเพียง 2-3 ส่วนในล้านส่วน (2-3 ppm) เท่านั้น

จากนั้นแต่ละอนุภาคซึ่งมีลักษณะเป็นคอลลอยด์อยู่ในของเหลวเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันด้วยแรง
 วนเคอร์วาลต์เกาะกันเป็นโงของอนุภาค จนกระทั่งเกิดเป็นโครงข่ายซึ่งแผ่ขยายในตัวกลางที่เป็นของ
 เหลวมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจนมีลักษณะเป็นเจล การเพิ่มขนาดของอนุภาคและการเกาะกลุ่มของ
 อนุภาคสามารถที่จะเกิดขึ้นพร้อมกันได้ ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมการเกิดโพลิเมอร์ของอนุภาคซิลิกาในสารละลายน้ำ (A) ในสารละลายกรด
 หรือมีการเติมเกลือ อนุภาครวมกลุ่มกันเป็นโครงข่าย 3 มิติ และเกิดเป็นเจล (B) ใน
 สารละลายเบสอนุภาคขนาดใหญ่เกิดขึ้นและจำนวนอนุภาคลดลง (Iler, 1979)

ส่วนในกรณีของโพลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการไฮโดร-เจลที่สภาพความเป็นกรด-ด่างต่ำ (ค่าความเป็น
 กรด-ด่างน้อยกว่า 7) โดยเฉพาะในระบบสารละลายแอลกอฮอล์-น้ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของ
 ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (สมการที่ 2.2 และ 2.3) จะต่ำกว่าในระบบสารละลายน้ำภายใต้สภาวะเหล่านี้ Iler
 (1979) เสนอว่าการแตกของวงโพลิเมอร์เกิดน้อยที่สุดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่
 ได้ เพราะพันธะไฮโดรเจนไม่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ กระบวนการคอนเดนเซชันจะคล้ายคลึงกับการเกิด
 ปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของโมโนเมอร์ของสารอินทรีย์เป็นสายโซ่ ทำให้เกิดเกิดขึ้นในลักษณะโครงข่าย
 โมเลกุลโพลิเมอร์สามมิติ จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้าง และสมบัติของผลิตภัณฑ์จาก
 กระบวนการไฮโดรเจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่สำคัญหลายปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยา
 ไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน และปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาย้อนกลับทั้งสอง ซึ่งจะกล่าวถึง
 ในรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

2.2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

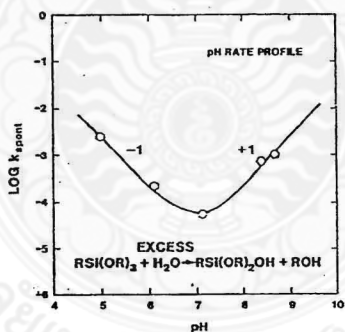
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดจากการงูโงของออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำต่ออะตอมซิลิกอน
 แสดงในสมการที่ 2.4 ซึ่งไฮโดรโทของน้ำจะไม่ปรากฏในแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ทั้งใน
 สภาวะกรดและสภาวะเบส [10]



2.2.1.1 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดเร็วและสมบูรณ์ได้เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งนิยมใช้กรดเกลือ และแอมโมเนียมมากที่สุดในการบวนการไฮด-เจล นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาชนิดอื่นๆอีก เช่น กรดอะซิติก โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ วาเนเดียมแอลกอฮอล์ และออกไซด์

นักวิจัยหลายท่าน (Keefer และคณะ, 1984) พบว่ากรดเกลือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเบสที่ความเข้มข้นเดียวกัน Aclion และคณะ (1950) สังเกตเห็นว่า ในปฏิกิริยาที่ใช้กรดอ่อนเป็นตัวเร่งต้องการเวลานานขึ้นในการแผ่ขยายของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เมื่อเปรียบเทียบกับกรดแก่ในจำนวนโมลที่เท่ากันเป็นตัวเร่ง นอกจากนี้ Pohl และ Osterholtz (1985) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (spontaneous first order rate constants) ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เฉพาะในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ γ -ไกลสิดอกซิโพรพิล ไตรอัลคอกซีซิลเลน (γ -glycidoxypentyl-trialkoxysilane, RSi(OR)_3) ในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในภาวะที่เป็นกรด และภาวะที่เป็นเบส เนื่องจากค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าและสูงกว่า 7 ตามลำดับ ในภาวะที่เป็นกลาง (ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7) ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะต่ำที่สุด แสดงว่าการเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เฉพาะ (specific acid and specific base catalyzed)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ γ -ไกลสิดอกซิโพรพิล ไตรอัลคอกซีซิลเลน (Pohl และ Osterholtz, 1985)

Pope และ Mackenzie (1986) ได้สรุปผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมของทั้งไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชัน สามารถเปรียบเทียบกันโดยดูจากเวลาที่ใช้ในการเกิดเจล (gelation time) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TEOS ที่อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อ TEOS ($[H_2O]/[TEOS]:r$) เป็นสี่ในเอทานอล แสดงตารางที่ 2.2 จากตารางจะสังเกตเห็นว่ากรดเกลือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากกว่าเบสที่ความเข้มข้นเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 เวลาในการเกิดเจลและค่าความเป็นกรด-ด่างสำหรับระบบ TEOS ในตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ (Pope และ Mackenzie, 1986)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้น (โมล)	เวลาในการเกิดเจล (ชั่วโมง)
HF	0.05	12
HCl	0.05	92
NH ₄ OH	0.05	107

ผลงานวิจัยของนักวิจัยหลายๆท่านที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความแรง (strong/weak acid, strong/weak basic catalysts) และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยที่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นได้ดีในภาวะกรดหรือเบส ซึ่งถ้าความแรงและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามีมากขึ้นยิ่งทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดได้เร็วขึ้น

2.2.1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อซิลิกอนอัลคอกไซด์ (r)

ค่า r ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (สมการที่ 2.1) เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลของซิลิกอนอัลคอกไซด์ เช่น ลักษณะเป็นเส้นใย เจลก้อน หรือผงอนุภาค เป็นต้น ซึ่งลักษณะของผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะเกิดขึ้นที่ค่า r ในช่วงหนึ่งๆ ร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ตัวทำละลายร่วม (แอลกอฮอล์) อุณหภูมิ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสัดส่วนของสารประกอบที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจลซึ่งมีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น Sakka และคณะ (1984) พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TEOS ที่ใช้ค่า $r = 1$ และกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ มีผลต่อลักษณะของโซลเป็นเส้นใย (spinnable sol) Schaefer และคณะ (1982) แปรค่าภาวะของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชันโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 2 ขั้นตอน ($r = 1$ ภายใต้อุณหภูมิ 90 นาที จึงตามด้วย $r = 3.4$ ภายใต้อุณหภูมิ 90 นาที) พบว่าโครงสร้างของเจลมีลักษณะการแตกสาขาอย่างอ่อนๆ Stober และคณะ (1968) พบว่าที่ค่า r ตั้งแต่ 20 ถึง 50 และใช้สารละลายแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 7 โมลาร์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นผงอนุภาคทรงกลมของซิลิกา เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 ผลของค่า r ต่อลักษณะรูปร่างผลิตภัณฑ์โพลิซิลิเกตได้แก่ เจลก่อน เส้นใย แผ่นฟิล์มและ ผงอนุภาค (Brinker และคณะ, 1999)

ชนิดของซิลิกา	เปอร์เซ็นต์โดยโมล					
	TEOS	EtOH	H ₂ O	HCl	NH ₃	H ₂ O/Si (r)
เจลก่อน						
1. ขั้นตอน กรด	6.70	25.80	67.30	0.2	-	10.00
1 ขั้นตอน เบส	6.70	25.80	67.30	-	0.2	10.00
2 ขั้นตอน กรด-เบส						
ขั้นตอนที่ 1 กรด	19.60	59.40	21.00	0.01	-	1.10
ขั้นตอนที่ 2 เบส	12.90	39.20	47.90	0.01	0.016	3.70
เส้นใย	11.31	77.26	11.31	0.11	-	1.00
แผ่นฟิล์ม	5.32	36.23	58.09	0.35	-	10.90
ผงอนุภาค	0.83	33.90	44.50	-	20.75	53.61

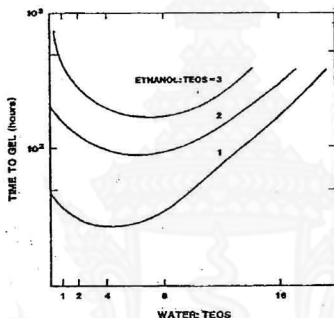
จากแนวโน้มที่ปรากฏจะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ถูกกระตุ้นด้วยกรด ประกอบกับค่า r ต่ำ ($r \leq 4$) โซิลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์ที่มีสาขาอย่างอ่อนๆ (weakly branched polymeric sols) ส่วนปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ถูกกระตุ้นด้วยเบสประกอบกับค่า r สูง ($r > 20$) โซิลที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นอนุภาค (highly condensed particulate sols) ที่ภาวะระหว่างภาวะทั้งสอง ($4 \leq r \leq 20$) ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นก้อนหรือแผ่นฟิล์ม

จากสมการที่ 2.1 การเพิ่มค่า r น่าจะมีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเร็วขึ้น ซึ่ง Klein (1985) พบว่าในระบบของ TEOS ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนเชิงโมลของตัวทำละลายร่วม (เอทานอล) ต่อ TEOS คงที่ เมื่อค่า r เพิ่มขึ้น (แสดงว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเกิดเจลจะลดลงจนถึงจุดหนึ่งแล้วจึงเพิ่มค่าขึ้น (รูปที่ 2.5) เนื่องจากความเข้มข้นของ TEOS ซึ่งเป็นสารตั้งต้นเจือจางลงมากจึงเป็นการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและคอนเดนเซชัน ดังนั้นเวลาในการเกิดเจลจึงนานขึ้น นอกจากนี้ที่ค่า r สูงขึ้นและปริมาณน้ำที่มากเกินไปทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อสลายพันธะซิลิเซน (ปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.3 เป็นการละลายของซิลิกา) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นมากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 3 ถึง 8 ในระบบของสารละลายน้ำ

Pouxviel และคณะ (1987) ใช้ ²⁹Si NMR ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ TEOS ที่ภาวะกรดสามระบบคือ ที่ $r = 0.3$ (ปริมาณน้ำน้อย), $r = 4$ (ปริมาณน้ำปานกลาง) และ $r = 10$ (ปริมาณน้ำมาก) ผลแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อ r เพิ่มขึ้น เกิดการเร่งของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (สมการที่ 2.1)

เนื่องจากที่ระบบ $r = 4$ ภายในเวลา 4 ชั่วโมง ยังพบว่ามีโมโนเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเหลืออยู่ แต่ในกรณีที่ $r = 10$ โมโนเมอร์ทั้งหมดเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสภายในเวลาเพียง 1 ชั่วโมง แสดงว่าที่ค่า r สูงขึ้นไฮโดรไลซิสของโมโนเมอร์เกิดสมบูรณ์ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันจะเกิดขึ้น

นอกจากนี้ Assink และ Kay (1988) พบว่าโดยทั่วไปในภาวะที่เป็นกรด ระบบที่มีค่า r น้อยกว่า 2 มากๆ มักจะเกิดกลไกของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่ผลิตแอลกอฮอล์ (สมการที่ 2.2) แต่ถ้า r มากกว่าหรือเท่ากับ 2 มักจะเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่ผลิตน้ำ (สมการที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลและค่า r ที่อัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอล และ TEOS คงที่ (Klien, 1985)

2.2.2 ปฏิกิริยารีเอสเทอริฟิเคชัน (Reesterification)

แม้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกกระตุ้นทั้งในภาวะที่เป็นกรดและภาวะที่เป็นเบส แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยารีเอสเทอริฟิเคชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอาจเกิดขึ้นได้โดยการแทนที่ของแอลกอฮอล์ที่หมู่ไฮดรอกซิลบนซิลานอลเพื่อสร้างอัลคอกไซด์และน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (ปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการที่ 2.1) ซึ่งนักวิจัยหลายท่าน (Brinker และคณะ 1982, 1984, Knight และคณะ, 1988) พบว่าปฏิกิริยาย้อนกลับนี้เกิดขึ้นได้ดีในภาวะที่เป็นกรดมากกว่าในภาวะที่เป็นเบส เนื่องจากกลไกของการเกิดปฏิกิริยาในภาวะที่เป็นเบสมีขั้นตอนที่เฉพาะ (Inversion of configuration) แต่ในภาวะที่เป็นกรดไม่มี

2.2.3 ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน

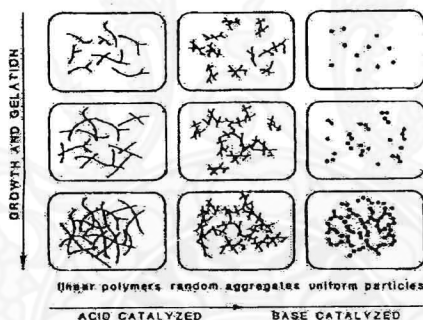
โพลิเมอร์เชนเพื่อสร้างพันธะไซโลเซนเกิดขึ้นได้ทั้งจากปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของแอลกอฮอล์ (สมการที่ 2.2) และปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของน้ำ (สมการที่ 2.3) ผลิตภัณฑ์จากคอนเดนเซชันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นพาร์ติคูลเจลและโพลิเมอร์เจล นอกจากนี้ยังสามารถเกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่เสถียรที่ไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการทดลองดังได้กล่าวไว้ข้างต้น

ปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แบบควบแน่นสามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โครงข่ายโมเลกุลจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เช่นเดียวกับการเกิดโพลิเมอร์ทั่วไป ลักษณะโครงข่ายของโพลิเมอร์เกิดได้หลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ ในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นลักษณะโครงข่ายแบบต่างๆที่เกิดขึ้นได้ในกระบวนการโซล-เจล สามารถแบ่งตามลักษณะโครงข่ายที่เกิดขึ้นดังนี้

1. การเกิดเป็นแบบโครงข่ายอนุภาค (particle networks) เจลที่ได้จากโครงข่ายอนุภาคลักษณะนี้ จะมีความหนาแน่นต่ำและมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการเกาะตัวของกลุ่มก้อนและสามารถเกิดเป็นอนุภาคผงขนาดเล็กได้

2. การเกิดเป็นโครงข่ายกลุ่มก้อน (aggregate networks) เจลที่ได้จากโครงข่ายอนุภาคลักษณะนี้ จะมีความหนาแน่นสูงและมีความไม่สม่ำเสมอ เกิดจากการเกาะตัวของกลุ่มก้อนอนุภาคขนาดเล็กมาเกาะตัวกันอย่างรวดเร็วกลายเป็นโครงข่ายที่แข็งแรงในที่สุด

3. การเกิดเป็นโครงข่ายโพลิเมอร์ (polymer networks) เจลที่ได้จะมีความหนาแน่นสูงและมีความสม่ำเสมอเกิดจากกระบวนการเชื่อมขวางของโพลิเมอร์ [9]



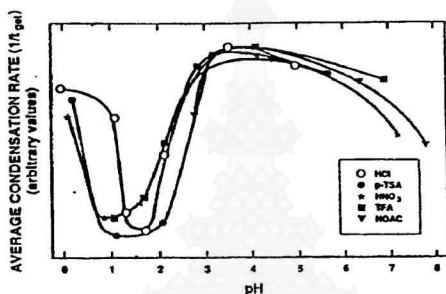
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงข่ายที่แตกต่างกันของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจล (ไพศาล,

2001)

2.2.3.1 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการโซล-เจล ตัวเร่งปฏิกิริยาคอนเดนเซชันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ กรดเกลือ, แอมโมเนีย, เบสที่เกิดจากไฮดรอกไซด์ของโลหะหมู่หนึ่ง และแอนไอออนฟลูออไรด์ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับการกระตุ้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส Assink และ Kay (1988) ศึกษาปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน TMOS ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างแคบๆ ที่ภาวะการกระตุ้นเป็นกรด พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชันแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+ , specific acid) นอกจากนี้ Coltrain และคณะ (1989) ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราเร็วเฉลี่ยของปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันมีค่ามากที่สุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 3.5 เมื่อ

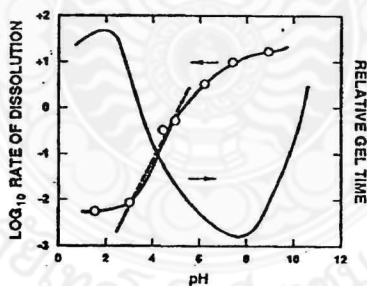
ความเป็นเบสสูงมากขึ้นกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 อนุภาคจะก่อตัวขึ้นจนกระทั่งถึงขนาดวิกฤต และไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้ เนื่องจากอนุภาคเกิดแรงผลักรังกันและกัน (Stober และคณะ, 1968)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างต่ออัตราเร็วเฉลี่ยของปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของกระบวนการโซล-เจลในสารละลายกรดต่างๆ (Coltraine และคณะ, 1989)

2.2.4 ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไอซิสและไฮโดรไลซิสของพันธะไฮโดรเจน

ปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ไอซิสและไฮโดรไลซิสของพันธะไฮโดรเจน (ปฏิกิริยาย้อนกลับของ สมการที่ 2.2 และ 2.3) ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะไฮโดรเจนและสามารถสร้างพันธะขึ้นมาใหม่เป็นวงพอลิเมอร์ที่ใหญ่ขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพันธะไฮโดรเจน (การละลายของซิลิกา) ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.8 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 3 และ 8 อัตราการละลายเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่าในระบบของสารละลายน้ำ อย่างไรก็ตาม Ilcr (1979) พบว่า เมื่อเพิ่มตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เข้าไปในระบบของสารละลายน้ำจะทำให้อัตราการละลายลดลงมาก



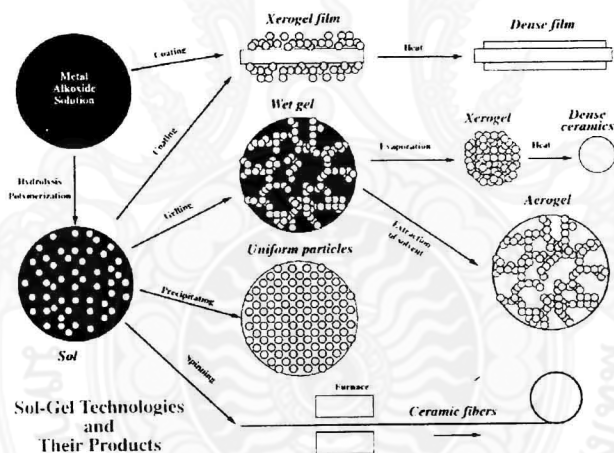
รูปที่ 2.6 ค่าความเป็นกรด-ด่างที่สัมพันธ์กับอัตราการละลายของซิลิกาและเวลาในการเกิดเจลในระบบสารละลายน้ำ (Ilcr, 1979)

2.3 การเกิดเป็นเจล (Gellation) [5]

การเกิดเป็นเจลเกิดจาก

1. ปฏิกิริยาของสารตั้งต้น
2. การเปลี่ยนเคมีของสารละลาย
3. การระเหยของตัวทำละลาย

เจลจะเริ่มเกิดขึ้นในรูปของแฟร็กทัล (Fractal) ที่ได้จากการเกาะกลุ่มของหน่วยย่อยๆ ในสารละลาย ซึ่งอาจเป็นโมโนเมอร์ โอลิโกเมอร์ โพลีเมอร์ หรืออนุภาค กลุ่มก้อนจะโตขึ้นจนถึงจุดที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายต่อเนื่อง การเกิดเจลจากสารละลายอัลคอกไซด์เป็นปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ ต่างจากการเกิดเจลจากคอลลอยด์ที่ผันกลับได้หลังจากเชื่อมเป็นโครงข่ายแล้วเจลที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างคงที่ แต่อาจถูกปรับเปลี่ยนได้ระหว่างการขึ้นรูปเป็นฟิล์มหรือเส้นใยการทำแห้งและการสลายตัวด้วยความร้อน เจลสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ปั้นเป็นเส้นใย พ่นเป็นละอองแล้วสลายตัวด้วยความร้อนกลายเป็นผง หรือทำให้แห้งเป็นวัตถุทรงตัน



รูปที่ 2.7 กระบวนการโซล-เจล [ที่มา:www.chemat.com]

2.4 เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง [6]

อิเล็กโทรสปินนิงเป็นเทคนิคหนึ่งในการผลิตเส้นใยซึ่งต่างจากการผลิตเส้นใยในอุตสาหกรรมถึงทอ เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงเกี่ยวข้องกับการให้สนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงต่อเข้ากับปลายแคปิลลารีที่บรรจุสารละลายโพลีเมอร์ ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีสูงถึงแรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงดึงดูดของสาร

ละลายโพลิเมอร์จะทำให้สารละลายโพลิเมอร์พุ่งลงสู่แผ่นรองที่ทำด้วยโลหะ ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กและบาง เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงใช้อุปกรณ์หลักเพียง 3 อย่าง คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความตํ่าศักย์สูง หลอดแคปิลลารีที่ทำจากปิเปตหรือเข็มฉีดยา และแผ่นรองโลหะ ซึ่งทำหน้าที่เป็นท่ีรองรับเส้นใย

2.4.1 หลักการพื้นฐาน

ในการผลิตเส้นใยโพลิเมอร์โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง เราจะให้ความตํ่าศักย์สูงกับสารละลายโพลิเมอร์หรือโพลิเมอร์หลอมเหลวเพื่อให้สามารถพุ่งออกจากแคปิลลารีได้ก่อนสารละลายโพลิเมอร์หรือโพลิเมอร์หลอมเหลวจะมาถึงแผ่นรอง ตัวทำละลายจะระเหยค่อไปหรือโพลิเมอร์หลอมเกิดการแข็งตัวกลายเป็นเส้นใยขนาดเล็ก กองรวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบบนแผ่นรองมีลักษณะเป็นแบบ nonwoven (เส้นใยที่ไม่ถักไม่ทอ มีลักษณะคล้ายแผ่นกระดาษ) โดยปกติเราจะค่อจั่วประจุไฟฟ้าขั้วหนึ่งเข้าไปในสารละลายโพลิเมอร์และอีกขั้วเข้ากับแผ่นรอง แต่โดยมากแผ่นรองจะค่อเข้ากับสายดิน เมื่อเริ่มให้ประจุไฟฟ้าแก่ของเหลวประจุจะเคลื่อนเข้าไปในบริเวณพื้นผิวของของเหลว นั้น เมื่อแรงของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหยคของเหลวที่ปลายแคปิลลารีจะเปลี่ยนรูปร่างจากครึ่งทรงกลมเป็นทรงกรวยหรือที่รู้จักในนาม Taylor cone

เมื่อเพิ่มแรงของสนามไฟฟ้ามากขึ้นจะส่งผลให้แรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวและทำให้ของเหลวพุ่งออกจากปลาย Taylor cone สารละลายโพลิเมอร์ที่พุ่งออกมาจะเกิดความไม่เสถียรและเกิดการยืดตัว ทำให้ลำของเหลว (jet) ขาวขึ้น และเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง ขณะเดียวกับที่ตัวทำละลายระเหยออกไป เหลือไว้แต่เส้นใยโพลิเมอร์

จนถึงปัจจุบันได้มีการนำโพลิเมอร์มากกว่า 50 ชนิดมาขึ้นรูปเป็นนาโนไฟเบอร์ เทคนิคนี้เส้นใยที่ผลิตได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางคั้งแต่ 10 nm ถึง 1 μm

2.4.2 ปัจจัยสำคัญสำหรับเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง [6]

- สมบัติของสารละลาย เช่น ความหนืด การนำไฟฟ้าและแรงตึงผิว
- ปัจจัยที่เราสามารถควบคุมได้ เช่น ค่าความตํ่าศักย์
- สภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมในบริเวณที่เราทำการผลิต

เนื่องจากความหนืดของสารละลายโพลิเมอร์ที่เหมาะสมในการผลิตโพลิเมอร์นาโนไฟเบอร์แต่ละชนิดนั้นแตกต่างกัน โดยปกติเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น ความหนืดก็จะมากขึ้นตามไปด้วย เส้นใยที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีรายงานว่าทำให้สารละลายมีความหนาแน่นประจุ (Charge density) สูงขึ้น จะทำให้ได้เส้นใยมีขนาดเล็กลง ส่วนผลของแรงตึงผิวค่อขนาดของเส้นใยยังหาข้อสรุปไม่ได้

2.4.3 จุดมุ่งหมายหลักของการผลิตเส้นใยโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิงคือ

- 2.4.4.1 สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยให้มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กกว่า 2 μm
- 2.4.4.2 สามารถผลิตเส้นใยที่มีผิวเรียบ
- 2.4.4.3 สามารถผลิตเส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวไปในแนวเดียวกันได้

อย่างไรก็ตาม จากผลการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะได้เส้นใยตามจุดมุ่งหมายทั้ง 3 ประการข้างต้น

2.4.4 การจัดเรียงตัวของเส้นใย

การที่จะผลิตเส้นใยโพลิเมอร์ให้เรียงตัวในแนวเดียวกันยังไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากวิถีการเคลื่อนที่ของลำโพลิเมอร์ซึ่งเป็น 3 มิติ มีความซับซ้อนมาก เกิดจากความไม่เสถียรแบบบิดงอ (Bending instability) จวบจนปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะทำให้เส้นใยเรียงตัวในทางเดียวกัน เช่น การใช้แผ่นรองที่สามารถหมุนด้วยความเร็วสูง การเสริมค่าไฟฟ้า/สนามไฟฟ้า และการใช้วงล้อขอบบาง เป็นต้น วิธีเหล่านี้สามารถทำให้เส้นใยเกิดการเรียงตัวไปในแนวเดียวกันได้ระดับหนึ่ง

2.4.5 สมบัติของไฟเบอร์ที่ผลิตโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

รูปร่างของเส้นใย เส้นใยที่ผลิตได้โดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง บางครั้งมีรูปร่างคล้ายลูกบิด เป็นเส้นใยที่มีรูพรุนหรือบางครั้งก็ได้เส้นใยที่มีรูปร่างแปลก ซึ่งรูปร่างและขนาดของเส้นใยขึ้นอยู่กับชนิดของโพลิเมอร์ สมบัติของตัวทำละลายสภาวะในการผลิต

สมบัติทางกายภาพสมบัติการระบายอากาศและไอน้ำของผืนผ้าที่ทำจากเส้นใยสามารถวัดได้โดยใช้ Dynamic moisture vapor permeation cell (DMPC) ขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยของผืนผ้าแบบไม่ถักทอที่ผลิตด้วยเส้นใยจากการปั่นหลอมถึง 4-100 เท่า ส่งผลให้ความต้านทานการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 156 เท่า แต่การละลายความชื้นไม่ได้ลดลง

สมบัติทางกล เนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กมาก การวัดสมบัติเชิงกลของเส้นใยเดี่ยวขนาดไมโครเมตรโดยใช้เครื่องมือที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป เช่น เครื่องทดสอบเนกประสงค์ ยังไม่ประสบความสำเร็จ

2.5 การประยุกต์ใช้เส้นใยที่ได้จากเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

2.5.1 การประยุกต์ใช้ในด้านกรกรอง

การใช้เส้นใยมาทำเป็นไส้กรองมีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพในการกรองสูงและการต้านทานการไหลของอากาศต่ำประสิทธิภาพในการกรองนั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเส้นใยการดักจับอนุภาคขนาดเล็กกว่าระดับไมโครเมตรตัวกรองต้องมีขนาดเล็กพอๆกับอนุภาคที่ต้องการดักจับวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวกรองวิธีหนึ่งก็คือการใช้ไฟเบอร์เป็นโครงสร้างของไส้กรองเนื่องจากพื้นที่ผิวดอปริมาณสูงมาก ทำให้มีแรงยึดเกาะที่ผิวสูงทำให้ตัวกรองที่มีนาโนไฟเบอร์เป็นองค์ประกอบสามารถดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.5 \mu\text{m}$ ได้ดี

2.5.2 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

ในทางการแพทย์เนื้อเยื่อและอวัยวะของมนุษย์ เช่น กระดูก ฟัน คลอตาเจน กระดูกอ่อนและผิวหนัง มีลักษณะโครงสร้างการเรียงตัวระดับนาโนเมตรหรืออยู่ในรูปของเส้นใยขนาดนาโนเมตรอยู่แล้ว งานวิจัยทางด้านอิเล็กโตรสปินนิงจึงมุ่งเน้นทางด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ เช่น

2.5.2.1 อวัยวะเทียม (Medical prostheses) ได้มีการเสนอให้มีการใช้ไฟเบอร์กับอวัยวะเทียมที่เกี่ยวกับเนื้อเยื่ออ่อน เช่น หลอดเลือดต่างๆ เป็นต้น นอกจากนั้น พิล์มเชื่อมบางจากไฟเบอร์ยังสามารถนำมาติดกับอวัยวะเทียมเพื่อลดความแตกต่างระหว่างความแข็งของเนื้อเยื่อร่างกายมนุษย์กับอวัยวะเทียมที่จะฝังเข้าไปในร่างกายมนุษย์ได้

2.5.2.2 โครงร่างรองรับของเนื้อเยื่อ (Tissue template) การออกแบบโครงร่างที่สามารถจำลองโครงสร้างและหน้าที่ของ Natural extracellular matrix (ECM) ยังเป็นสิ่งที่ท้าทายการวิศวกรรมแพทย์อยู่ เซลล์ของมนุษย์สามารถยึดติดและทำหน้าที่ได้บนเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดของเซลล์ ด้วยเหตุนี้ โครงร่างรองรับที่ทำจากเส้นใยสามารถนำมาใช้เป็นแม่แบบสำหรับการเลี้ยงเซลล์ได้

2.5.2.3 วัสดุปิดแผล (Wound dressing) โพลิเมอร์สามารถพันลงบนบาดแผลไฟไหม้ได้โดยตรง ซึ่งช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น โดยปกติแผ่นผ้าอัดทอจากไฟเบอร์จะมีรูพรุนขนาด 500-1000 μm ซึ่งเล็กพอที่จะปกป้องแผลจากแบคทีเรีย พื้นที่ผิวสูงถึง 5-100 m^2/g ยังช่วยในการดูดซับของเหลวและทำให้การให้ยาทางผิวหนังมีประสิทธิภาพดีขึ้น

2.5.2.4 ด้านเวชภัณฑ์ โดยปกติแล้วยังมีขนาดเล็กเท่าโครงสร้างของมนุษย์ก็สามารถดูดซับได้ง่ายเท่านั้น การให้ยาผ่านโพลิเมอร์อาศัยหลักการที่ว่า อัตราการละลายของอนุภาคยาจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นของยา หรือ พาหะ (Carrier) อย่างไรก็ตามงานวิจัยเรื่องการส่งผ่านยาโดยใช้ไฟเบอร์ยังอยู่ในขั้นเริ่มต้น

2.5.2.5 การประยุกต์ใช้ในการทหาร การมีเครื่องช่วยหายใจหรือชุดปกป้องร่างกาย (Protective clothing) จากเชื้อโรคหรือก๊าซพิษไม่ให้เข้าสู่ร่างกาย ทั้งทางหายใจหรือการซึมผ่านทางผิวหนังเป็นสิ่งที่คนทั่วโลกให้ความสนใจเป็นพิเศษ ชุดปกป้องร่างกายที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ใช้ถ่านเป็นตัวดูดซับ ซึ่งมีข้อจำกัดในการระบายความชื้นและมีน้ำหนักมากขึ้น ผลของการใช้เทคนิคคือเล็ก ไทโรสปีนนิ่ง ทำให้ได้ไฟเบอร์ที่เรียงตัวเป็นชั้น ซึ่งมีความพรุนสูงแต่ขนาดเล็ก ทำให้มีความต้านทานการทะลุทะลวงสารเคมีของสารเคมีที่ปนมากับอากาศสูง มีความต้านทานการระบายอากาศและความชื้นต่ำกว่าเส้นใยที่ใช้กันโดยปกติ แต่มีประสิทธิภาพในการดักจับสารปนเปื้อนในอากาศสูงกว่า

2.6 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

Xinwenzhu และคณะ [14] ศึกษาการแพร่ที่มีผลอะลูมินาในซิลิกาโซล โดยศึกษาผลของค่า pH ความเข้มข้นของซิลิกาโซล และปริมาณของแข็งต่อค่าความหนืด พบว่า อะลูมินา ซิลิกาโซลมีความหนืดค่าที่ต่ำสุด ที่ pH เท่ากับ 3-4 และมากที่สุดที่ pH เท่ากับ 6 เมื่อปริมาณอะลูมินาในซิลิกาโซลน้อยกว่า 68% ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มมากขึ้นและยังพบว่าที่ pH เท่ากับ 10 ความหนืดจะมีค่าลดลง เมื่อซิลิกาโซลมีความแข็งเพิ่มขึ้นและเขายังได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของความหนืดในการเตรียม Silicon carbide reticulated torus ceramics (RPCs) ของการแพร่ของ mixed powder ($\text{SiC}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{bentonite}$) ในซิลิกาโซลพบว่า ที่ pH เท่ากับ 10 ความหนืดมีค่าลดลงเมื่อ

ความเข้มข้นของซิลิกาโซลเพิ่มขึ้น โดยความหนืดจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อความเข้มข้นของซิลิกาโซลเท่ากับ 5-10% wt และความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่อ Shear rate เพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Shear stress เพิ่มขึ้น

Jung-Kyum Hong และคณะ [12] ศึกษาอิทธิพลของความหนืดต่อ microstructure ของ SiO_2 (xerogel) พบว่าฟิล์มของ SiO_2 (xerogel) ที่รูปพรุน 47.5-73.5% เตรียมได้จากโซลที่มีความหนืด 10-40 cP และ microstructure ของ SiO_2 (xerogel) ที่ได้จะแปรผันค่าความหนืด

นพรัตน์ วงศ์เกิดสุข และคณะ [4] ได้ศึกษางานวิจัย ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการเปลี่ยนรูปของ สารละลายซิลิกาโซล-เจล ทำการศึกษาวิธีการวัดความหนืดของสารละลายโซล ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่ง เปลี่ยนไปเป็นเจล ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อความหนืด เช่น อุณหภูมิ เวลาในการบ่มสาร pH และ ปริมาณ ZrO_2 ที่เติมในสารละลายซิลิกาโซล-เจลโดยใช้ TEOS เป็นสารตั้งต้นสภาวะที่เกิดขึ้นเป็นเจลที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำต่อ TEOS (r) = 8 และอุณหภูมิในการบ่ม 60°C เพราะไม่มากเกินไปและจนเกินไปและควรเลือกทำการทดลองที่ pH เท่ากับ 1.6 จึงสรุปว่า สารละลายซิลิกาโซลจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญดังนี้ อัตราส่วนเชิงโมลของสารตั้งต้น อุณหภูมิและค่า pH โดยอัตราส่วนเชิงโมลจะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาและ pH ที่แสดงความเป็นกรดสูงจะ ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็ว

Sung-Seen Choi, Seung Goo Lee [13] ได้ศึกษาการทำเส้นใยซิลิกาด้วยกรรมวิธีโซลเจล โดย ศึกษ ส่วนโซลและสภาวะที่เจริญเต็มที่ โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยอัตราส่วนของโซลเป็นดังนี้ $\text{TEOS}:\text{EtOH}:\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}$ เท่ากับ 1:2:2:0.01 ในอัตราส่วนโดยโมล บ่มที่ 80°C เป็นเวลา 30 นาที

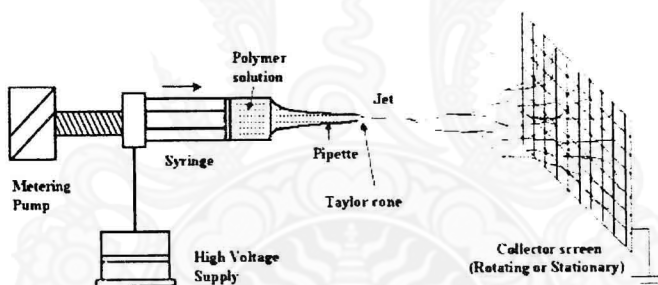
วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน [7] การผลิตโพลิเมอร์ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงและศึกษาสมบัติที่ผิว ของเส้นใย วัตถุประสงค์ของรายงานวิจัยนี้ คือ การนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาการเกิด Surface segregation ของฟลูออรีน มาใช้ในการพิจารณาการผลิตเส้นใย Electrospun ที่ยังคงมีสมบัติทางเคมีที่ผิว สอดคล้องกับ Thin Film เมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

จันทร์นภา โอหารรุ่งเรือง และสาวตรี จงเจริญ [2] ได้ศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาโดยวิธีโซล-เจลโดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราส่วนของสาร โซลที่ใช้ ในการผลิตเส้นใยตาราง

ตารางที่ 2.3 แสดงอัตราส่วนของสารเชิงโมลของงานวิจัยจันทร์นภาและสาวตรี

ตัวอย่าง	จำนวนโมล (โมล)				r
	TEOS	EtOH	H ₂ O	HCl	
1	1	2	2	0.1	2
2	1	2	2	0.05	2
3	1	2	2	0.01	2

ซึ่งวัตถุประสงค์ที่นํานงานวิจัยนี้มา คือ เพื่อนําเอาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเส้นใยซิลิกาผลิตเส้นใยซิลิกาโดยแปรผันตัวแปรที่ต่างๆซึ่งอัตราส่วนที่เลือกใช้คือ 1:2:2:0.01 โมล



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของเครื่องมืออิเล็กโตรสปินนิง [7]

บทที่ 3

วิธีการทำงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

- | | | | | |
|---|--------------------|---------------------------|---------|----|
| (1) บีกเกอร์ | (Beaker) | ขนาด | 250.0 | ml |
| (2) บิวเรต | (Burette) | ขนาด | 25.0 | ml |
| (3) ปิเปต | (Pipette) | ขนาด | 0.1 | ml |
| (4) กระบอกตวง | (Cylinder) | ขนาด | 10.0 | ml |
| (5) แท่งแก้วคนสาร | (Stirrer) | | | |
| (6) ช้อนตักสาร | (Spoon) | | | |
| (7) ขวดน้ำกลั่น | (Inject bottle) | | | |
| (8) เทอร์โมมิเตอร์ | (Thermometer) | | | |
| (9) เครื่องกวนแม่เหล็ก | (Magnetic stirrer) | | | |
| (10) อ่างควบคุมอุณหภูมิ | (Water bath) | | | |
| (11) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง | (high voltage) | ของบริษัทเจริญทรัพย์ไชน่า | เทรคคิง | |

จำกัด ที่ความต่างศักย์ 5.0, 6.0, 7.5, 9.0 และ 15.0 kV

- (12) Syringe pump ยี่ห้อ KD-Scientific รุ่น KDS 100 ของบริษัท H.A. RESEARCH

Co.,Ltd.

- (13) หลอดแคปิลลารีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm
- (14) แผ่นสแตนเลส ขนาด 20×20 cm
- (15) หลอดบรรจุสารขนาด 3 ml
- (16) คลิปสายไฟ
- (17) อลูมิเนียมฟอยล์

3.1.2 สารเคมี

- | | |
|--|--------|
| (1) เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethyorthosilicate; TEOS) | 98.0 % |
| (2) เอทานอล (Ethanol) | 99.8 % |
| (3) กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid; HCl) | 36.0 % |
| (4) น้ำกลั่น | |

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมสารละลาย

- (1) เตรียมสารละลายไฮดรอกซิลในอัตราส่วนเชิงโมล $\text{TEOS:H}_2\text{O:EiOH:HCl}$ เป็น 1: 2 :2: 0.01
- (2) นำ TEOS ผสมกับน้ำตามอัตราส่วนในข้อ(1) กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 5 นาที
- (3) หยดกรดไฮโดรคลอริกตามอัตราส่วนในข้อ(1) แล้วกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที
- (4) เติมน้ำตามอัตราส่วนในข้อ(1) แล้วกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที
- (5) นำสารละลายที่ได้กวนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 50°C แล้วกวนเป็นเวลา 60 นาที
- (6) เมื่อครบ 60 นาที นำสารละลายที่ได้ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 นาที

3.2.2 การทดลองฉีดสารละลายไฮดรอกซิลที่เตรียมได้ด้วยชุดอิเล็กทรอนิกส์

- (1) นำหลอดบรรจุสารวางไว้ตรงตำแหน่งที่วางบนเครื่อง syringe pump
- (2) ต่อสายไฟกับขั้วลบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเข้ากับแผ่นสแตนเลส ที่มีอุณหภูมิเย็นพอใช้คืออยู่
- (3) ต่อสายไฟกับขั้วบวกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเข้ากับปลายหลอดแคปิลลารี
- (4) ตั้งระยะห่างระหว่างปลายหลอดแคปิลลารีกับแผ่นสแตนเลสเป็นระยะ 7.5 cm
- (5) ปรับอัตราการป้อนสารที่ 9/h และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง 15 kV
- (6) บรรจุสารละลายซิลิกาไฮดรอกซิลลงในหลอดบรรจุสาร
- (7) กดปุ่ม run ที่เครื่อง syringe pump และ เปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายกระแสไฟไปยังขั้วบวกและขั้วลบที่ต่อไว้
- (8) สารละลายจะพุ่งออกจากปลายหลอดแคปิลลารีเกิดเป็นเส้นใยและ ไปสู่แผ่นโลหะ
- (9) เก็บเส้นใยตัวอย่างที่ได้ไว้ในที่มืดชื้นและ ไม่มีความชื้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง SEM
- (10) ทำการทดลองซ้ำโดยการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่แปรผันในการทดลอง

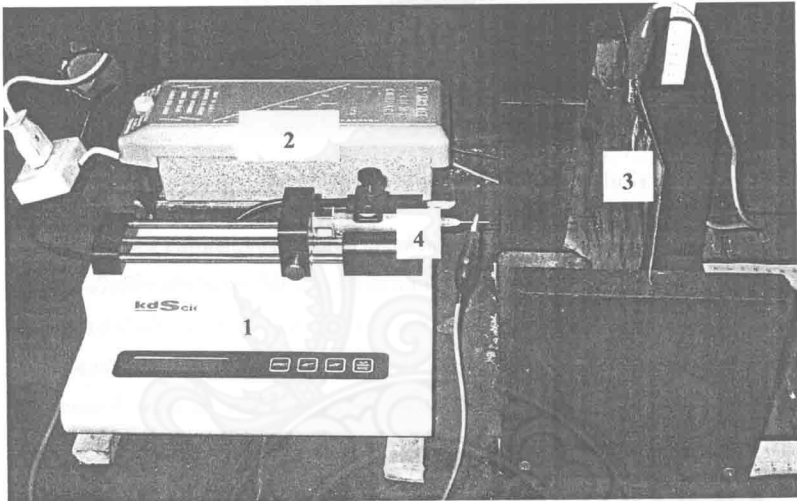
ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (kV)	อัตราการป้อนสาร (/h)			
15.0	3.0	5.0	7.0	9.0
9.0	3.0	5.0	7.0	9.0
7.5	3.0	5.0	7.0	9.0
6.0	3.0	5.0	7.0	9.0
5.0	3.0	5.0	7.0	9.0

3.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพ และ เคมีของเส้นใยที่ผลิตได้

นำเส้นใยตัวอย่างที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพโดยใช้เครื่อง SEM (Scanning Electron microscope) และวิเคราะห์หมู่หน้าที่ทางเคมีโดยใช้เครื่อง FT-IR (Fourier transforms infrared)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การสร้างชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์ป้อนนิ่ง



รูปที่ 4.1 ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์ป้อนนิ่ง

ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์ป้อนนิ่งประกอบด้วยเครื่องมือหลัก 4 ส่วน คือ

1. เครื่อง Syringe pump
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง
3. แผ่นสแตนเลส
4. หยอดแคปิลารี

4.2 ผลการติดเส้นใยซิลิกาและวิเคราะห์ผลทางกายภาพและเคมีของเส้นใยที่ผลิตได้

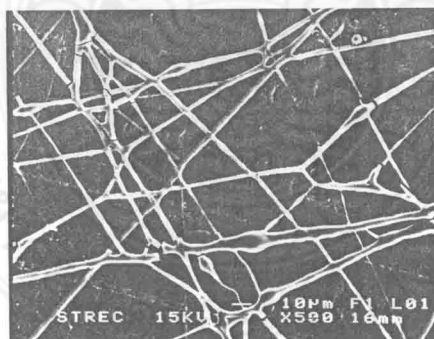
4.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยซิลิกาด้วยเครื่อง SEM (Scanning electron microscope)

จากการทดลองโดยใช้ชุดอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น พบว่าสามารถฉีดสารละลายโซลให้เส้นใยได้ โดยเลือกอัตราส่วนเชิงโมลของ TEOS : EtOH : H₂O : HCl ที่อัตราส่วน 1 : 2 : 2 : 0.01 แปรผันตัวแปร 2 ตัวแปร คือ ค่าความต่างศักย์สูง ที่ 5.0, 6.0, 7.5, 9.0 และ 15.0 kV และ อัตราการป้อนสารที่ 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0/h ผลได้ดังนี้

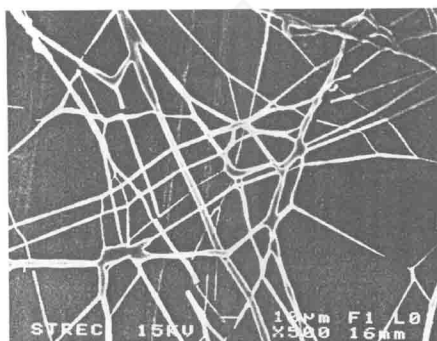


รูปที่ 4.2 เส้นใยที่ได้จากการฉีดด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

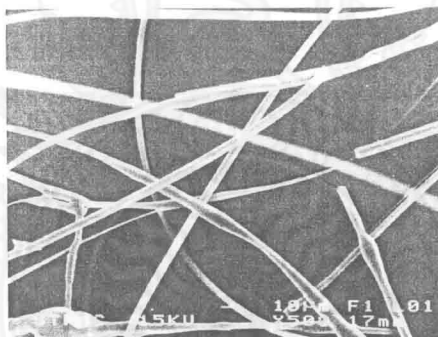
จากรูปที่ 4.2 ลักษณะของเส้นใยที่ถึงมองด้วยตาเปล่าจะสังเกตเห็นลักษณะเส้นใยมีสีขาวคล้ายใยแมงมุม วางเรียงซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบรวมกันอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ มีขนาดเล็ก ในบางตัวอย่างพบว่าเส้นใยมีความเปราะ ไม่แข็งแรง เช่นตัวอย่างที่เตรียมจากสภาวะ 9.0 kV ที่อัตราการป้อน 3/h (ดังรูปที่ 4.14) เป็นต้น และตัวอย่างที่สภาวะ 5.0 kV ที่อัตราการป้อน 9.0/h ไม่สามารถถ่ายภาพได้เพราะมีลักษณะแตกหักหลังจากการเตรียมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM จากนั้นนำเส้นใยที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Model JEOL JSM-5800LV ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



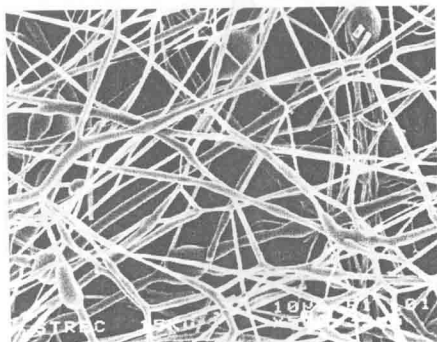
รูปที่ 4.3 เส้นใยที่ฉีดได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 kV และอัตราการป้อนสาร 3.0/h กำลังขยาย 500 เท่า



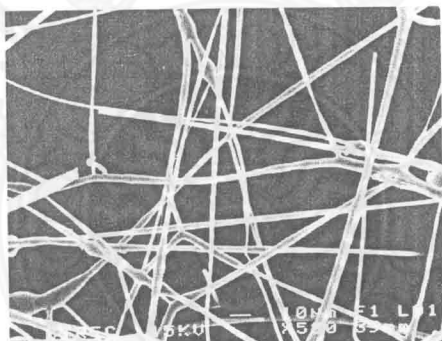
รูปที่ 4.4 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0 kV และอัตราการป้อนสาร 5.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



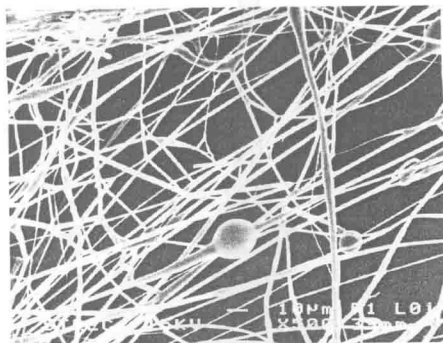
รูปที่ 4.5 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 5.0 kV และอัตราการป้อนสาร 7.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



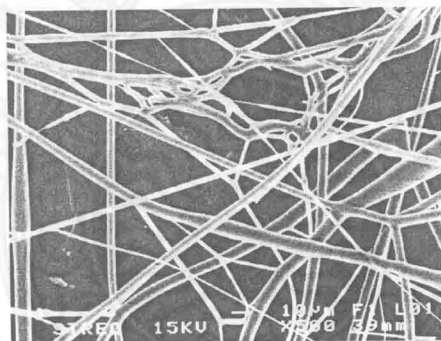
รูปที่ 4.6 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 6.0 kV และอัตราการป้อนสาร 3.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



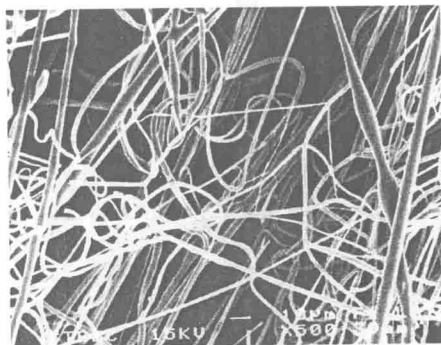
รูปที่ 4.7 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 6.0 kV และอัตราการป้อนสาร 5.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



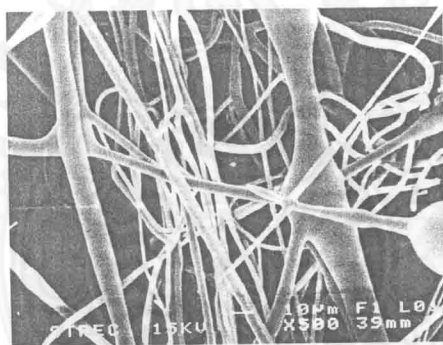
รูปที่ 4.8 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 6.0 kV และอัตราการป้อนสาร 7.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



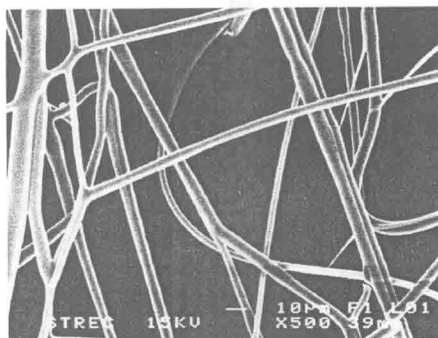
รูปที่ 4.9 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 6.0 kV และอัตราการป้อนสาร 9.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



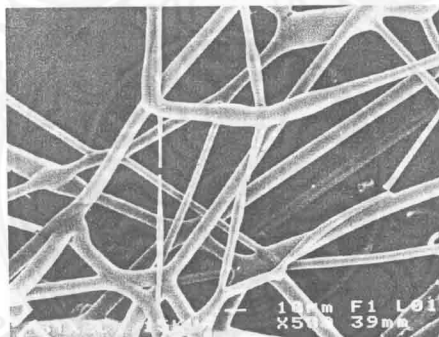
รูปที่ 4.10 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความดันสัคย์ 7.5 kV และอัตราการป้อนสาร 3.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



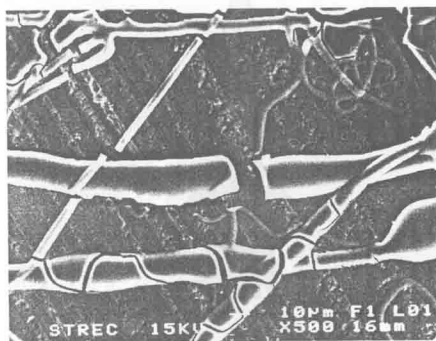
รูปที่ 4.11 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความดันสัคย์ 7.5 kV และอัตราการป้อนสาร 5.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



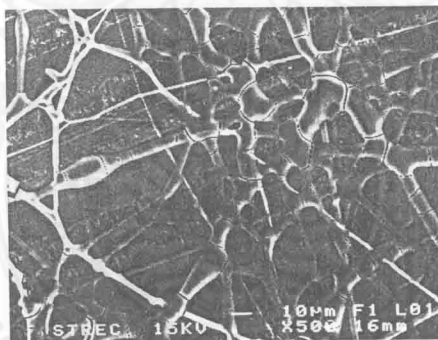
รูปที่ 4.12 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 7.5 kV และอัตราการป้อนสาร 7.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



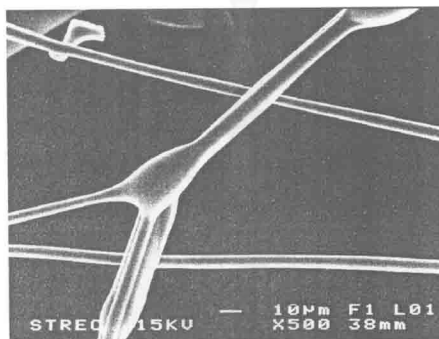
รูปที่ 4.13 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 7.5 kV และอัตราการป้อนสาร 9.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



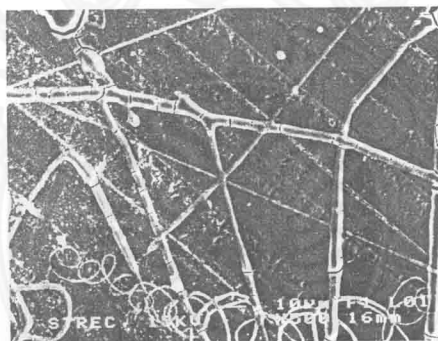
รูปที่ 4.14 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 9.0 kV และอัตราการป้อนสาร 3.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



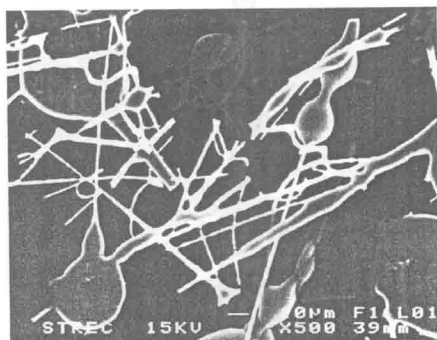
รูปที่ 4.15 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 9.0 kV และอัตราการป้อนสาร 5.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



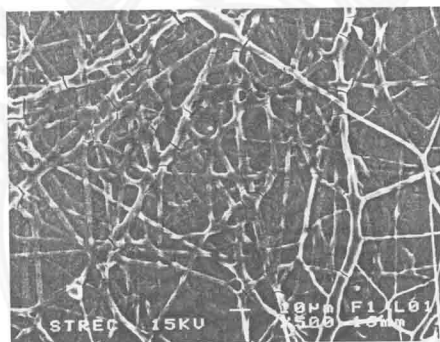
รูปที่ 4.16 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 9.0 kV และอัตราการป้อนสาร 7.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



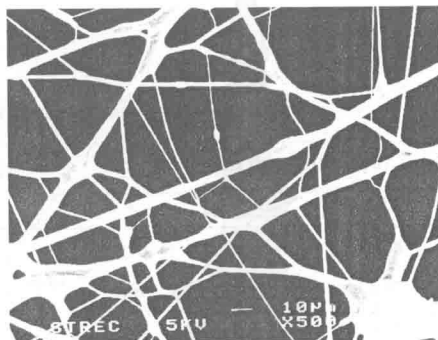
รูปที่ 4.17 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 9.0 kV และอัตราการป้อนสาร 9.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



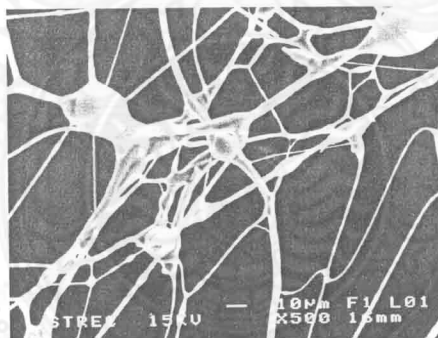
รูปที่ 4.18 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 15.0 kV และอัตราการป้อนสาร 3.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.19 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 15.0 kV และ อัตราการป้อนสาร 5.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.20 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 15.0 kV และอัตราการป้อนสาร 7.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า

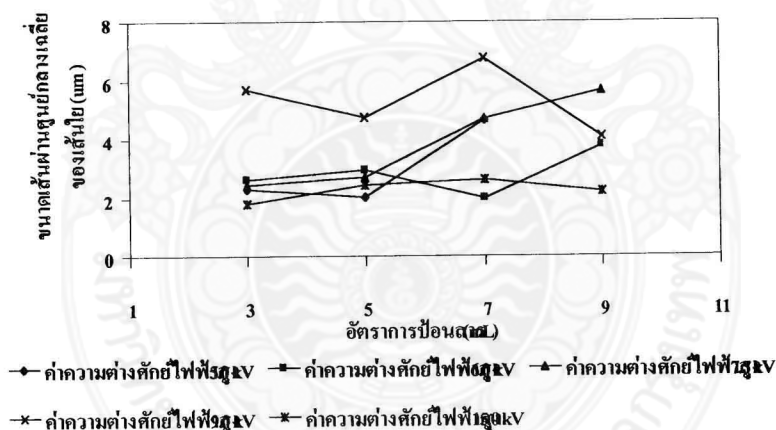


รูปที่ 4.21 เส้นใยที่ผลิตได้โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 15.0 kV และอัตราการป้อนสาร 9.0/h
กำลังขยาย 500 เท่า

จากการนำไปวิเคราะห์สามารถได้ภาพถ่ายที่ถ่วงขยาย 500 เท่า สามารถเห็นลักษณะของเส้นใย และขนาดของเส้นใยโดยจะนำมาทำการวัดขนาดเส้นใยจากภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรม Ruler By George ได้ผล ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm)

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (kV)	อัตราการป้อนสาร (/h)			
	3	5	7	9
5.0	2.30	2.01	4.65	N/A
6.0	2.61	2.95	1.97	3.75
7.5	2.44	2.69	4.70	5.65
9.0	5.70	4.73	6.75	4.10
15.0	1.81	2.45	2.61	2.19



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm) กับอัตราการป้อนสาร (/h) ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

เมื่อได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยแล้วได้ทำการคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นใยได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นใย

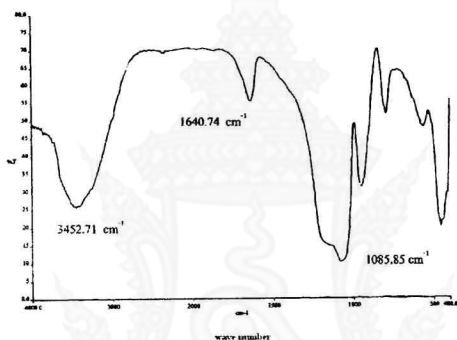
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (kV)	อัตราการป้อนสาร (/h)			
	3	5	7	9
5.0	0.04	0.03	0.05	N/A
6.0	0.14	0.04	0.04	0.06
7.5	0.07	0.09	0.09	0.08
9.0	0.08	0.12	0.08	0.05
15.0	0.01	0.04	0.05	0.05

จากผลการทดลองที่แสดงในตาราง 4.1 และรูปที่ 4.22 พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะซึ่งแสดงว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและอัตราการป้อนสารมีอิทธิพลต่อการผลิตเส้นใยซิลิกา โดยจากการสังเกตผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพบว่าเส้นใยมีการเรียงตัวกันอย่างมีนัยสำคัญกล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนสารแนวโน้มของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่ามากขึ้น ซึ่งสภาวะที่เกิดลักษณะเช่นนี้คือที่สภาวะที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.5 และ 15.0 kV ที่ทุกอัตราการป้อนสาร นอกจากนี้จากการคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 จะพบว่าทุกค่าอัตราการป้อนสารที่สภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้า 7.5 และ 15.0 kV ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าค่อนข้างคงที่แสดงถึงเส้นใยที่ผลิตได้มีลักษณะดังกล่าวนี้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีความใกล้เคียงกันในแต่ละกลุ่มตัวอย่างเหมาะที่จะใช้เป็นสภาวะในการผลิตเส้นใยซิลิกาในการทดลองต่อไป อย่างไรก็ตามที่สภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้า 15.0 อัตราการป้อนสาร 3.0/h เส้นใยมีการแตกหักแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งลักษณะที่เกิดอาจเกิดจากขั้นตอนในการเคลือบทองคำก่อนตรวจด้วยเครื่อง SEM ซึ่งเส้นใยจะถูกเป่าด้วยลมและผ่านความร้อนสูง หรืออาจเกิดจากเส้นใยที่สภาวะนี้มีความเปราะไม่แข็งแรงจึงทำให้เกิดการแตกหักได้

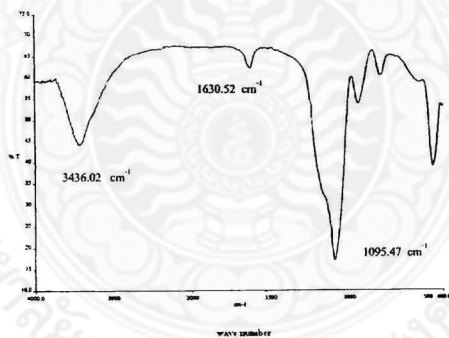
นอกจากนี้ที่สภาวะอื่นๆ ตัวอย่างก็สามารถถูกฉีกเป็นเส้นใยได้แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแต่ละตัวอย่างไม่มีการเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ โดยเฉพาะที่สภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้า 9.0 kV อัตราการป้อนสาร 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0/h พบว่าเส้นใยมีความเปราะและแตกหักง่ายซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุเดียวกับที่สภาวะ 15.0 kV ที่อัตราการป้อนสาร 3.0/h หรืออาจเกิดจากสาเหตุจากการระเหยก่อนของตัวทำละลายหรือน้ำในระหว่างที่เส้นใยเดินทางจากปลายหลอดแคปิลลารีจึงอาจทำให้เส้นใยที่ได้มีความเปราะ

4.2.2 การศึกษาการวิเคราะห์หมู่หน้าที่ของเส้นใยซิลิกาด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier transforms infrared)

จากรูปที่ 4.23 พบว่าสารตั้งต้นที่เป็นสารละลายโซล และ หลังจิดที่เป็นเส้นใยซิลิกาถูกตรวจพบว่าหมู่หน้าที่มีหมู่หน้าที่ใกล้เคียงกันโดยประกอบด้วยหมู่หน้าที่ดังนี้ หมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 3452.71 cm^{-1} และ 3436.02 cm^{-1} หมู่ซิลิกา (Si-O-Si) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1085.85 cm^{-1} และ 1095.47 cm^{-1} และ หมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1640.74 cm^{-1} และ 1630.52 cm^{-1}



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 อินฟราเรดสเปกตรัม (ก) สารละลายโซล (ข) เส้นใยซิลิกา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ที่สภาวะที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.0, 6.0, 7.5, 9.0 และ 15.0 kV ที่อัตราการป้อนสาร 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0/h สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 ชุดทดลองอิเล็กโตรสปินนิง

จากการสร้างชุดการทดลองมีอุปกรณ์ที่ต้องใช้ดังนี้

1. เครื่อง Syringe pump ยี่ห้อ KD-Scientific รุ่น KDS 100 ของบริษัท H.A. RESEARCH Co.,Ltd.
2. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง(High voltage generator)ของบริษัท เจริญทรัพย์ ไซน์เทคคิง จำกัด จำนวน 5 เครื่อง 5.0, 6.0, 7.5, 9.0 และ 15.0 kV
3. แผ่นสแตนเลส ขนาด 20 x 20 cm จำนวน 1 แผ่น
4. หลอดแคปิลารี ขนาด 1.2 mm พร้อมกระบอกฉีดขนาด 3 ml

5.2 ลักษณะเส้นใยที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM model JEOL JSM-5800LV

1. จากรูปที่ 4.2 พบว่าเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นที่มีขนาดเล็กคล้ายใยแมงมุม แต่รูปลักษณะของเส้นใยบางสภาวะมีลักษณะเส้นใยที่มีเนื้อสารคล้ายแก้ว แต่บางสภาวะเนื้อสารขุ่นขาวบาง
2. จากรูปถ่ายจากเครื่องวิเคราะห์ SEM พบว่าเส้นใยบางสภาวะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นนัยสำคัญ แต่ในบางสภาวะเส้นใยมีลักษณะเปราะ และในบางสภาวะเส้นใยมีการแตกหัก
3. จากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยใช้โปรแกรม Ruler By George พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 1.81 ถึง 9.45 μm
4. จากการคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่ามีค่าความเบี่ยงเบนของเส้นใยอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.14

5.3 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier transforms infrared)

1. สารละลายโซล และ เส้นใยซิลิกา มีหมู่หน้าที่ใกล้เคียงกัน โดยสรุปได้ว่ามีหมู่หน้าที่คล้ายกัน 3 หมู่ หน้าที่คือ หมู่ไฮดรอกซิล (O-H) ที่ความยาวคลื่น 3452 และ 3436 cm^{-1} หมู่ซิลิกา (Si-O-Si) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1085 และ 1095 cm^{-1} และ หมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 1640 และ 1630 cm^{-1} ตามลำดับ

5.4 อิทธิพลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและอัตราการป้อนสาร

1. ในสภาวะที่ 7.5 และ 15.0 kV ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีการเรียงตัวอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนสารแนวโน้มของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่ามากขึ้น ในขณะที่สภาวะอื่นๆ ก็สามารถคิดเป็นเส้นใยได้ แต่เส้นใยที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอในด้านของขนาด และความแข็งแรง

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมสารตั้งต้นควรเตรียมสารให้มีอัตราส่วนที่ถูกต้องตามที่กำหนด และควบคุมสภาวะต่างๆ ให้ตรงที่กำหนด
2. ควรเตรียมอุปกรณ์ในการฉีดให้พร้อมเนื่องจากสารตั้งต้นเกิดการแข็งตัวเร็วซึ่งจะทำให้ไม่สามารถฉีดสารได้

เอกสารอ้างอิง

1. เกษม พิพัฒน์ปัญญานุกุล, 2541, “การควบคุมคุณภาพ”, พิมพ์ครั้งที่ 9, สำนักพิมพ์ประกอบเมโทร, กรุงเทพฯ, หน้า 38.
2. จันทร์นภา โอฬารรุ่งเรือง และสาวตรี จงเจริญ, 2547, การสังเคราะห์เส้นใยซิลิกาโดยวิธีโซล-เจล โดยใช้เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ
3. ชฎาภา ขยามานนท์, ปณิญา รัตนสัมฤทธิ์ และพงษ์ศักดิ์ วัฒนจรูญโรจน์, 2544, การสังเคราะห์สารดูดความชื้นด้วย Sol-Gel เทคโนโลยี, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4. นพรัตน์ วงศ์เกิดสุข, ขจรเกียรติ อมรพิทักษ์วงศ์ และสมบัติ ไชยสุทธกัมม, 2545, การศึกษาพฤติกรรมการไหลและการเปลี่ยนรูปของสารละลายซิลิกาโซล-เจล, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
5. ปกรณ์ อุ่มอยู่, 2545, การแยกก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซไนโตรเจนโดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกที่ผลิตจากวิธีโซล-เจล, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
6. วลัยพร หงษ์โรจน์วิวัฒน์, 2547, “โพลีเมอร์นาโนไฟเบอร์โดยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง”, MTEC, หน้า 17-20.
7. วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน, 2547, “การผลิต polymer nanofibres ด้วยกระบวนการ Electrospinning และการศึกษาสมบัติที่ผิวเส้นใย”, Colourway, ฉบับที่ 51, หน้า 25-26, ฉบับที่ 52, หน้า 43-52.
8. วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ, 2543, “เครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น”, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 289-305.
9. สุภวัฒน์ วาจาเกียรติ, 2545, การเตรียมอะลูมินาโดยกระบวนการโซล-เจล, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
10. C.J.Brinker, G.W.Scherer, 1990, Sol-Gel Science, Academic Press, San Diego
11. Hao Fong and Darrel H.reneker, 2000, “Electrospinning and the Formation of Nanofibers”, Struture Formation in Polymeric Fibers, pp.225-245.
12. Jung-Kyun Hong, Hong-Ryul Kimm and Hyung-Ho Park, 1998, Thin Solid Films, pp.449-454.
13. Sung-Seen Choi, Seung Goo Lee, 2003, Silica Nanofibers from Electrospinning/Sol-Gel Process, Journal of Materials Science Letters, Vol 22, pp.891-893.

14. XinwenZhu,Donhliang Jiamg, shouhong Tan and Zhaoquan Zhang,2001,**Journal of The European Ceramic Society**,Vol 21, pp.2879-2885.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

ก.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง [8]

ในเครื่อง SEM ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source)
2. อิเล็กโตรแมกเนติกเลนส์ (Electromagnetic lens) หรือขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน
3. ปัมป์สุญญากาศและระบบควบคุมความดัน (Control pressure system)
4. ห้องใส่ตัวอย่าง (Specimen chamber)
5. ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal detector)
6. อุปกรณ์สร้างภาพ (Imaging devices)

ก.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์และการศึกษาการใช้เครื่อง SEM เพื่อให้ได้ภาพที่ดีนั้น นอกจากจะขึ้นกับประสิทธิภาพหรือความสามารถของเครื่องแล้วยังขึ้นกับชนิดของตัวอย่างและเทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมอีกด้วย ซึ่งสิ่งที่ควรคำนึงถึงในการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาโดยเครื่อง SEM มีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

ก.2.1 ประเภทตัวอย่าง

เป็นวัสดุตัวอย่างหรือผงวัสดุตัวอย่างที่เป็นของแข็งความดันต่ำกว่า 10^{-3} ทอรั

ก.2.2 ขนาด

ขนาดของตัวอย่างถูกจำกัดโดยขนาดของห้องใส่ตัวอย่างและแท่นวางตัวอย่างของเครื่อง SEM ซึ่งแตกต่างกันแต่บริษัทและรุ่นที่ผลิต โดยในบางรุ่นอาจวางตัวอย่างขนาดใหญ่ได้ถึงประมาณ 15 ถึง 30 cm อย่างไรก็ตามขอบเขตของการส่องกราดของลำอิเล็กตรอนจะจำกัดอยู่ในวงพื้นที่ไม่เกิน 4 ถึง 8 cm

ก.2.3 การเตรียมตัวอย่าง

- การติดตัวอย่างบนแท่นวางตัวอย่าง

กรณีตัวอย่างเป็นชิ้นงาน ก่อนนำเข้าศึกษาในเครื่องต้องทำการตัดชิ้นงานเข้ากับก้านวางตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่ทำด้วยโลหะ มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมมีก้านที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเหมาะสมใส่ได้พอดีกับช่องว่างในฐาน วางตัวอย่างและใช้สารยึดติดตัวอย่างเข้ากับก้านวางตัวอย่าง วิธีการทำโดยการทาหรือติดสารยึดติดตัวอย่างลงบนแผ่นหน้าของก้านวางตัวอย่างและติดตัวอย่างด้านที่ไม่

ต้องการศึกษาลงบนแผ่นหน้าก้านวางตัวอย่าง เพื่อให้ติดสนิทหรือแห้งดีระยะหนึ่ง ในกรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า ต้องนำตัวอย่างนั้นไปผ่านขั้นตอนการฉาบด้วยโลหะก่อนนำไปศึกษา

กรณีตัวอย่างเป็นผงมักใช้สารยึดติดตัวอย่างจำพวกที่เป็นเทปกาวยสองหน้า ติดด้านบนของก้านวางตัวอย่างและโรยผงตัวอย่างให้กระจายลงบนด้านหน้าของก้านวาง จากนั้นใช้ลงยางเป่าลมและปิดฝุ่นและเศษของผงตัวอย่างที่ไม่ยึดติดบนก้านวาง จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง SEM เพื่อทำการศึกษาต่อไป หรือทำการฉาบผิวด้วยโลหะ กรณีตัวอย่างไม่นำไฟฟ้า

- การเคลือบ (Coating) ผิวชิ้นงาน

ในการเคลือบหรือฉาบผิวตัวอย่างนิยมใช้สารตัวนำไฟฟ้าจำพวกโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น คาร์บอน ทอง และโลหะผสมทอง-พัลลาเดียม เป็นต้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับตัวอย่าง ทั้งนี้หลักการเบื้องต้นของการฉาบผิวคือ ต้องกระทำภายใต้ภาวะสุญญากาศและให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อให้โลหะหนักเปลี่ยนสภาพจากแท่งโลหะมาเป็นโมเลกุล และตกลงบนผิวตัวอย่างในอัตราส่วนเดียวกัน ทำให้โลหะฉาบผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกัน

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)

ข.1 หลักการของเครื่อง

ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ใช้วิธีวัดที่ต่างไปจากเครื่องมือสเปกโทรสโกปีทั่วไป คือ วัดความเข้มของแสงต่อความยาวคลื่น หรือ กำลังขยายที่ความยาวคลื่นต่างๆ กันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกว่า Time-domain Spectroscopy จากนั้น Time-domain spectrum จะถูกเปลี่ยนเป็น frequency-domain spectrum ด้วย fourier transform จากการใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ สิ่งทีสเปกตรัมทั้งสองแตกต่างกันจริงๆ ก็คือ frequency-domain spectrum เป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ กันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาอันหนึ่งแต่ fourier transform spectrum ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ กันพร้อมกันหมด ดังนั้น fourier transform จึงช่วยทำให้การวิเคราะห์รวดเร็วขึ้น การแยก (resolution) ก็ดีขึ้น หรือเป็นการทำให้ signal-to-noise ratio ดีวิธีธรรมดา เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นแบบวัดทีละความถี่ (sequentially) แต่ FT-IR วัดที่ความถี่ต่างๆ อย่างต่อเนื่อง (simultaneously) เรียกว่า Fellgett's advantage สามารถใช้ circular entrance aperture แทน entrance slit ได้ ทำให้กำลังแสงสูงขึ้นด้วย ทำให้การแยกดีขึ้น และการวิเคราะห์ง่ายและสะดวกด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน อย่างไรก็ดี เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์มีราคาแพงและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูงเนื่องจากต้องเก็บในห้องควบคุมความชื้นตลอดเวลา

ข.2 การเตรียมตัวอย่าง

การวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยไม่มีผลของตัวทำละลายหรือสารอื่นๆ ผสมอยู่เกี่ยวข้อง นั่นคือมีแค่เฉพาะตัวอย่างเท่านั้น จำเป็นจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีลักษณะบางมากๆ เป็นฟิล์ม ที่หนาประมาณ 0.01-0.1 mm เพื่อให้แสงผ่านได้ เทคนิคต่างๆ ที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของสารนั้นด้วย เทคนิคต่างๆ มีดังต่อไปนี้

1. ใช้วิธีอัดและรีดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยโลหะบนแผ่นโลหะเรียบ หรือแผ่นพลาสติก หรือบนแผ่นที่ฉาบด้วยพวกพอลิเมอร์ที่ทนความร้อน เมื่อนำสารตัวอย่างไปอัดและรีดจนได้แผ่นบางๆ หรืออาจให้ความร้อนในขณะอัดและรีดด้วยก็ได้ เทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นพลาสติก ถ้าสารตัวอย่างไม่แข็งมากนัก อาจใช้ windows 2 แผ่น รีดสารตัวอย่างก็ได้ แต่จะต้องระวังการแตกของ windows ด้วย

2. ใช้วิธีหลอม ถ้าสารตัวอย่างมีมวลโมเลกุลต่ำ อาจหลอมเหลวได้ง่าย แล้วนำสารตัวอย่างที่หลอมเหลวเทลงไปในบนแผ่นโลหะเรียบให้เป็นแผ่นบางๆ หรือเทลงไปในระหว่างแผ่น windows 2 แผ่นประกบกัน แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3. ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นพวกชีวสาร พลาสติก หรือขี้ผึ้ง เป็นต้น อยู่ในรูปเป็นก้อนหรือเป็นแท่งสามารถใช้ไมโครโทมตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ได้

4. ใช้วิธีทำให้เป็นสารละลาย โดยให้สารตัวอย่างละลายในตัวทำละลายที่ระเหยง่ายๆ แล้วนำสารละลายนั้นเทลงบนแผ่นกระจก หรือแผ่นโลหะที่ขัดมัน หรือแผ่นพลาสติก หลังจากตัวทำละลายระเหยออกไปแล้ว ใช้มีดตัดแผ่นฟิล์มออกมา ถ้าสารตัวอย่างนั้นไม่ละลายน้ำให้นำแผ่นฟิล์มจุ่มลงในน้ำหลังจากทำให้แห้งแล้วสังเกตเห็นว่าแผ่นฟิล์มตรงกลางจะบางกว่าที่ขอบ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังคงมีตัวทำละลายหลงเหลืออยู่อีกบ้างเล็กน้อย

5. ใช้ Mull technique วิธีนี้ได้รับความนิยมมากสำหรับการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ใช้สารตัวอย่าง 2-3 mg บดให้ละเอียดด้วยโกร่งอะเกต หรือ ball mill เล็กๆ แล้วหยด Nujol ลงไป 1-2 หยด แล้วบดต่อไปจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำสารตัวอย่างที่บดได้นี้ไปใส่ลงบน NaCl window หรือ window อื่นๆ เพียงเล็กน้อย แล้วเอาอีกแผ่นประกบ หนีไปมาจนทั่วแผ่น นำไปใส่ใน sample holder เพื่อวิเคราะห์ต่อไป

6. ใช้ KBr-pellet technique นับว่าเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากอีกเทคนิคหนึ่ง โดยใช้สารพวกอัลคาไลเฮไลด์ เช่น KBr ที่เป็นของแข็งผสมกับสารตัวอย่าง บดให้เข้ากันในโกร่งอะเกต แล้วนำไปอัดจะได้สารเป็นแผ่นใส สามารถนำไปวิเคราะห์ได้เลย ส่วนวิธีทำ KBr-pellet ใช้สารตัวอย่างประมาณ 2.0 mg ผสมกับ KBr 100-200 mg ในโกร่งอะเกต หรือ Ball mill แล้วบดให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน ตามปกติการทำ KBr-pellet ควรให้มวลสารตัวอย่างเข้มข้นประมาณ 0.1-2 % แต่ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงปริมาณได้ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างนั้น คุณลักษณะของอินฟราเรดได้ดีเพียงใด เมื่อบดได้แล้วนำไปใส่ในเครื่องอัดซึ่งเรียกว่า die หลังจากเปิดปั๊มดูดอากาศออกประมาณ 1 นาที จึงจะเริ่มอัดด้วยเครื่องอัด ซึ่งอาจเป็น hydraulic press อัดประมาณ 10 ตัน หลังจากลดความดันและปลดปั๊มออกจาก die แล้ว จึงนำตัวอย่างที่เป็น pellet ใส่บางออกมาอย่างระมัดระวัง เพราะอาจแตกหรือหักได้ จากนั้นใส่ลงใน disc holder เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณทางสถิติ

ค.1 การคำนวณค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่วัดได้ [1]

ตัวอย่างการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดแคปิลลารี 1.2 mm, ค่าความต่างศักย์ 15 kV และอัตรา
การป้อนสาร 3/h

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_n}{N}$$

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{0.15 + 0.15 + 0.15 + \dots + 0.1}{20}$$

$$\bar{X} = 0.1225$$

ค.2 การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอย่างการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดแคปิลลารี 1.2 mm, ค่าความต่างศักย์ 15 kV และอัตรา
การป้อนสาร 3/h

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{(0.15 - 0.1225)^2 + (0.15 - 0.1225)^2 + \dots + (0.1 - 0.1225)^2}{20 - 1}}$$

$$s = 0.047$$

ภาคผนวก ง

ลักษณะเส้นใยที่ผลิตได้ที่สังเกตด้วยตาเปล่า

ค่าความต่างศักย์ (kV)	อัตราการปั่นสาร (/h)	ลักษณะเส้นใยที่สังเกตได้
15	3	เส้นใยมีลักษณะเป็นสีใสด้ายแก้ว มีปริมาณน้อย
15	5	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
15	7	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
15	9	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
9	3	เส้นใยมีลักษณะเป็นสีใสด้ายแก้วแต่มีรูปร่างที่สังเกตเป็นเส้นใยที่เปราะ มีปริมาณน้อย
9	5	เส้นใยมีลักษณะเป็นสีใสด้ายแก้วแต่มีรูปร่างที่สังเกตเป็นเส้นใยที่เปราะมีปริมาณน้อย
9	7	เส้นใยมีลักษณะเป็นสีใสด้ายแก้วแต่มีรูปร่างที่สังเกตเป็นเส้นใยที่เปราะมีปริมาณน้อย
9	9	เส้นใยมีลักษณะเป็นสีใสด้ายแก้วแต่มีรูปร่างที่สังเกตเป็นเส้นใยที่เปราะมีปริมาณน้อย

ค่าความต่างศักย์ (kV)	อัตราการป้อนสาร (/h)	ลักษณะเส้นใยที่สังเกตได้
7.5	3	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
7.5	5	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
7.5	7	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
7.5	9	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
6	3	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
6	5	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
6	7	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
6	9	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
5	3	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
5	5	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
5	7	เส้นใยที่ได้มีปริมาณมาก ลักษณะของเส้นใยคล้ายใยแมงมุม
5	9	เส้นใยมีลักษณะเป็นสีกาคล้ายแก้วแต่มีรูปร่างที่เป็นเส้นใยที่เปราะ

ประวัตินักวิจัย

- 1 ชื่อ และ นามสกุล นายไชยันต์ ไชยชนะ
MR. CHAIYAN CHAIYA
- 2 หมายเลขบัตรประชาชน 3-1202-00156-44-0
- 3 ตำแหน่งปัจจุบัน
ตำแหน่งทางวิชาการ อาจารย์ 1 ระดับ 5
สาขาที่ทำการวิจัย สาขาวิศวกรรมเคมี

4 สถานที่ติดต่อ

ที่ทำงานปัจจุบัน สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ
รหัสไปรษณีย์ 10120 โทรศัพท์ 0 2286 3991-5 ต่อ 1195, 1210
ที่อยู่ปัจจุบัน 10/26 หมู่ 1 ต.บางกรวย อ.บางกรวย จ.นนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11130
E-mail address cchaiya@gmail.com

5 ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาเอก	Ph.D.	Environmental Technology	Joint Graduate school of Energy and Environment (JGSEE)	2547	ไทย
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมเคมี	ม. เทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี	2543	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมเคมี	ม. ศรีนครินทรวิโรฒ	2540	ไทย

6 สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ วิศวกรรมเคมี และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

7 ผลงานทางวิชาการพิมพ์เผยแพร่ บทความทางวิชาการ (ระบุชื่อเรื่อง แหล่งที่พิมพ์ ปีที่พิมพ์)

Boonamnuayvitaya V., Chaiya C. and Jarudilokkul S., Removal of heavy metals by adsorbent prepared from pyrolyzed coffee residues and clay, Separation and Purification Technology, 35, 11-22.

Boonamnuayvitaya V., Chaiya C. and Tanthapanichakoon W., The preparation and characterization of activated carbon from coffee residue, Journal of Chemical Engineering of Japan, 37, 1504-1512.

8 การประชุมวิชาการ

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2000. The Adsorption of Heavy Metal Ions with Adsorbent Comprised of Coffee Residue, Proceedings of the 1st Asian Particle Technology Symposium, Bangkok, Thailand, 66.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Adsorption of Toluene Vapor under Humid Condition by Activated Carbon Produced from Coffee Residue, Proceedings of the 2nd Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment, Phuket, Thailand, 2 : 1079-1085.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Adsorption of Toluene Vapor under Humid Condition by Activated Carbon produced from Coffee Residue, proceedings of the Regional Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, 22-25 July 2003, Le royal meridian hotel, Bangkok.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Production and Characterization of Activated Carbon from Coffee Bean Residuals, Proceedings of the Materials Development and Particle Technology (MaDPart2003), The Center of the Excellence in Particle Technology, 14 Oct 2003, Mandarin hotel, Bangkok.

Chaiya, C. and Boonamnuyvitaya, V. 2003. Preparation of Activated Carbon from Coffee Residue : Characterization and Toluene Vapor Adsorption under Humidity, Proceedings of the 2nd Asian Particle Technology Symposium, Department of Chemical & Process Engineering, Universiti Kebangsaan, 16-19 Dec 2003, Penang, Malaysia.

ไชยยันต์ ไชยยะ และ วิโรจน์ บุญอำนวชวิทยา, การผลิตถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่, 2546, การประชุมวิชาการและงานแสดงผลดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์และเทคโนโลยีสู่ประเทศไทย ครั้งที่ 29, 20-22 ตุลาคม 2546, ศูนย์ประชุมเอนกประสงค์กาญจนาภิเษก, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, จังหวัดขอนแก่น

ไชยยันต์ ไชยยะ ทวีวรรณ เกษอินทร์ และอลิษา ใจเอื้อ, การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ซิงค์คลอไรด์, 2548, การประชุมสัมมนาทางวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 21, 28-30 มีนาคม 2548, โรงแรมเชียงใหม่ภูคำ, จังหวัดเชียงใหม่

