



# วิทยานิพนธ์

การผลิตผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอนจากเส้นไหมด้วยเทคนิค  
สเปรย์ไพโรไลซิส

**PRODUCTION OF SUBMICRON SILK POWDER FROM SILK  
YARN BY SPRAY PYROLYSIS TECHNIQUE**

นายวันกวี กล้วยไม้

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550





# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

## ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอนจากเส้นไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส

Production of Submicron Silk Powder from Silk Yarn by Spray Pyrolysis Technique

นามผู้วิจัย นายวันกวี กล้ายไม้

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

( รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D. )

กรรมการ

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D. )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์วินัย เลียงเจริญสิทธิ์, D.Eng. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์วินัย อัจจงหาญ, M.A. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอนจากเส้นไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรลิซิส

Production of Submicron Silk Powder from Silk Yarn by Spray Pyrolysis Technique

โดย

นายวันกวี กล้วยไม้

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2550

วันกวี กล้วยไม้ 2550: การผลิตผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอนจากเส้นไหมด้วยเทคนิค  
สเปรย์ไฟโรลิ่งสปีด ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรม  
เคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ปรชชานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์  
ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D. 96 หน้า

ในงานวิจัยนี้ ผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอนจะถูกผลิตด้วยเทคนิคสเปรย์ไฟโรลิ่งสปีด ซึ่ง  
ไหมเป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยดูดซับความชื้นได้ดีเป็นอย่างดีและมีความคล้ายคลึงกับ  
โปรตีนในร่างกายมนุษย์ นอกจากนี้ผงไหมที่มีขนาดเล็กยังสามารถแทรกซึมเข้าสู่ชั้นผิวหนังได้  
ง่าย จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอาง โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น  
สองส่วนคือการจัดสร้างเครื่องสเปรย์ไฟโรลิ่งสปีดและการผลิตผงไหมจากเส้นไหม ซึ่งเครื่องสเปรย์  
ไฟโรลิ่งสปีดที่จัดสร้างประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือ การทำละออง, การทำความร้อนและการเก็บ  
อนุภาคโดยสารละลายไหมที่เตรียมจากการละลายเส้นไหมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
จะถูกทำละอองที่ขนาด 1.5-2.0 ไมครอน ด้วยเครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิค จากนั้นละอองที่  
เกิดขึ้นจะถูกทำแห้งโดยผ่านตัวทำความร้อนสองช่วงที่ต่อเนื่องกัน และสุดท้ายอนุภาคผงไหมที่  
ได้ก็จะถูกจับโดยตัวกรองแบบเยื่อแผ่น ด้วยจากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายไหม  
ตั้งต้น, อัตราการไหลของแก๊ส, อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง เป็นสามปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิด  
ของอนุภาคผงไหม โดยตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคผงไหมมากที่สุดก็คือ ความเข้มข้นของ  
สารละลายไหมตั้งต้น ซึ่งเมื่อทำการลดความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้นลงขนาดอนุภาคก็จะ  
ลดลงด้วยเช่นกัน และจากผลการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลายไหมตั้งต้น 0.03 เปอร์เซ็นต์โดย  
ปริมาตรต่อน้ำหนัก อัตราป้อนแก๊สในโตรเจน 20 ลิตรต่อนาที ทำแห้งด้วยอุณหภูมิช่วงแรก 80  
และช่วงที่สอง 175 องศาเซลเซียส สามารถเตรียมผงไหมรูปร่างทรงกลมที่สมบูรณ์ได้ในช่วง  
ขนาด 0.43-1.93 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.91 ไมครอน

Wankawee Kluaymai 2007: Production of Submicron Silk Powder from Silk Yarn by Spary Pyrolysis Technique. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Paisan Kongkachuichay, Ph.D. 96 pages.

In this work, submicron silk powder was produced by a spray pyrolysis technique. Silk is an excellent substance for moisture absorption and is compatible with protein in human body. In addition, the moisture absorptivity of silk powder will be enhanced by its submicron size, therefore it can be used as cosmetic. The experiment was divided into two parts: fabrication of a spray pyrolysis set and production of silk powder from silk yarn. The spray pyrolysis set composed of three main sections: spraying section, heating section, and powder collecting section. The silk solution was prepared by dissolving chopped silk yarn with sodium hydroxide solution which was sprayed into 1.5-2 micron droplets by an ultrasonic nebulizer. Then they were dried by two consecutive heaters. Finally, the obtained dried powder was collected by a membrane filter. It was found that concentration of silk solution, flow rate of carrier gas, and drying temperature were the main factors that influenced on the obtained silk powder. Moreover, the concentration of silk solution had the most effect on the size of the powder. The condition of 0.03 %wt of silk solution, 20 l/min of carrier gas (nitrogen) and 80°C in low temperature zone, 175 °C in high temperature zone yielded the spherical silk powder having size in the range of 0.43-1.93 micron with mean particle size of 0.91 micron.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

\_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ไพศาล คงคาอุยงาย ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาชี้แนะแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. มานพ ไชยเจริญตระกูล กรรมการวิชาเอก รศ.ดร. วินัย เลียงเจริญสิทธิ์ กรรมการวิชาการ และ รศ. พิภพ ลลิตาภรณ์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขและให้คำชี้แนะเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

วันกวี กลัยไม้

มีนาคม 2550

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
การตรวจเอกสาร	3
ใหม่	3
เทคนิคการสเปรย์	13
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย	32
การจัดสร้างเครื่องสเปรย์ไฟโรลิซิส	32
การผลิตผงใหม่	41
ผลและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	52
สรุป	52
ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	54
ภาคผนวก	56
ภาคผนวก ก	57
ภาคผนวก ข	63
ประวัติการศึกษา	96

## สารบัญตาราง

<b>ตารางที่</b>		<b>หน้า</b>
1	ส่วนประกอบของกรดอะมิโนในไหมเซริซิน	8
2	ส่วนประกอบของกรดอะมิโนในไหมไฟโบรอิน	10
3	ความสามารถในการละลายเส้นไหมในโซเดียมไฮดรอกไซด์	45
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ข1	ความสามารถในการละลายของไหมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิลิตร	64
ข2	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min	65
ข3	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c) 14 l/min	67
ข4	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d) 20 l/min	69
ข5	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min	71
ข6	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c) 14 l/min	73

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข7	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d) 20 l/min	75
ข8	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min	77
ข9	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04% w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min	79
ข10	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c) 14 l/min	81
ข11	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04% w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d) 20 l/min	83
ข12	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.03% w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min	85
ข13	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min	87
ข14	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c) 14 l/min	89

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข15	ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d) 20 l/min
	92

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	องค์ประกอบพื้นฐานของกรดอะมิโน	3
2	ส่วนประกอบของเส้นใยไหม	4
3	พอลิเมอร์สายโซ่ตรงของไหม	4
4	โครงสร้างแบบ $\alpha$ -Helix	5
5	โครงสร้างแบบ $\beta$ - sheet	5
6	รูปแบบของกระบวนการทำแห้งแบบสเปรย์	13
7	กลไกการเกิดของเม็ดของเหลวจากตัวทำละอองจากหลักการของแรงดัน	14
8	หัวพ่นของไหลคู่ชนิดผสมภายใน (บน) และผสมภายนอก (ล่าง)	16
9	กลไกการทำเม็ดของเหลวของจานหมุนความเร็วสูง	17
10	กลไกการทำละอองจากคลื่นความถี่สูง	18
11	การทำงานของหัวตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิค	18
12	ชุดเครื่องปฏิกรณ์เอสพี	20
13	ขั้นตอนของกระบวนการเอสพี	20
14	รูปร่างอนุภาคที่ได้จากสารละลาย ZHC ที่ความอิมพัลส์ตัวสัมพัทธ์แตกต่างกัน (A) 0.35 (B) 0.088 (C) 0.018 (D) 0.009	22
15	(A) อนุภาครูพรุน $Al_2O_3$ เตรียมจาก $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ และ (B) อนุภาครูพรุน ZnO เตรียมจาก $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O + 15\%wt$ Polyethleneglycol	23
16	ผลของการใช้สารตั้งผิวต่อการขึ้นรูปเส้นใย ZAC (A) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (B) เติมสารลดแรงตึงผิว	25
17	เส้นใยเซอร์โคเนียเตรียมจาก (A) ZAC+6%wt PVOH มี $ZrO_2$ 24.8% (B) ZAC+6%wt PVOH มี $ZrO_2$ 25.3%	25
18	ส่วนประกอบของเครื่องสเปรย์ไฟโรลีสีส	32
19	เครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิค	33
20	ปั๊มแบบความดันต่ำ	33
21	ท่อแก้วทางเดินแก๊ส	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ส่วนเชื่อมต่อระหว่างตัวทำละอองกับทางเดินแก๊สหลัก	35
23	ท่อแก้วส่วนเชื่อมต่อระหว่างตัวทำละอองกับทางเดินแก๊สหลัก	36
24	ชุดวัดอัตราการไหลของแก๊ส	37
25	ตัวทำความร้อนแบบเทป	37
26	ตู้ควบคุมอุณหภูมิแบบปรับค่าได้	38
27	เตาเผาแบบท่อ	38
28	ท่อแก้วส่วนการหล่อเย็น	39
29	ชุดกรองแบบเยื่อแผ่น	40
30	ชุดโตะวางอุปกรณ์	40
31	ไหมที่ยังไม่ผ่านการลอกกาว	41
32	ไหมที่ตัดเพื่อนำไปทำละลาย	41
33	กวนและให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก	42
34	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่จัดสร้างขึ้น	43
35	ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	46
36	กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหม ที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	46
37	ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	47
38	กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหม ที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	47

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	48
40	กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหม ที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	49
41	ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	50
42	กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหม ที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min	50
43	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้นที่มีผลกับขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด (Minimum Particle Size) ที่อัตราการไหลของแก๊สที่ 6, 14, 20 l/min	51
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	แบบแสดงขนาดของท่อแก้วส่วนเชื่อมต่อหัวด้วทำละอองกับท่อแก้วหลัก (cm)	58
ก2	แบบแสดงขนาดส่วนของการหล่อเย็น (cm)	59
ก3	แบบแสดงขนาดของชุดโต๊ะวางอุปกรณ์ (ด้านหน้า) (cm)	60
ก4	แบบแสดงขนาดของชุดโต๊ะวางอุปกรณ์ (ด้านซ้าย) (cm)	61
ก5	แบบแสดงขนาดของชุดโต๊ะวางอุปกรณ์ (ด้านบน) (cm)	62

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$D_a$	= เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเม็ดของเหลว
$D_j$	= เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฟิลาเมนต์
$L_j$	= ความยาวของฟิลาเมนต์
$n$	= จำนวนจริง
$g$	= ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง
$\psi$	= ความดันของของเหลว
$\Delta P$	= ความดันตกคร่อมช่องแคบ [=] lb/in <sup>2</sup>
$\lambda$	= ความยาวคลื่น
$\mu, \eta$	= ความหนืด
$\rho$	= ความหนาแน่น
$\gamma$	= แรงตึงผิว

# การผลิตผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอนจากเส้นไหมด้วยเทคนิค สเปรย์ไพโรลิซิส

## Production of Submicron Silk Powder from Silk Yarn by Spray Pyrolysis Technique

### คำนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าผลิตภัณฑ์ผ้าไหมของไทย มีความประณีต สวยงาม มีลวดลายที่แสดงความเป็นเอกลักษณ์ไทย ทำให้ได้รับความนิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ มีเกษตรกรจำนวนมากที่ประกอบอาชีพปลูกหม่อน เลี้ยงไหม และทอผ้าไหม ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยมีจำนวนเกษตรกรที่ปลูกหม่อนเลี้ยงไหมประมาณ 150,000 ครัวเรือน ซึ่งจังหวัดที่มีการเลี้ยงไหมมาก ได้แก่ ขอนแก่น บุรีรัมย์ มหาสารคาม โคราช สุรินทร์ ซึ่งเกือบทุกหมู่บ้านจะมีการทอไหม

เส้นไหมจัดเป็นเส้นใยโปรตีนที่ได้จากหนอนไหม (Silkworm) ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* อยู่ในวงศ์ Bombycidae ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นเส้นใยที่แท้จริง (Fibroin Protein) ประมาณ 62 - 67% และส่วนที่เป็นกาว (Sericin Protein) ประมาณ 22 - 25% นอกจากนี้เป็นสารประกอบอื่น ๆ เช่น จี๊ซิ่ง ไจมัน สีธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนที่เป็นกาวและสารประกอบอื่น ๆ จะเกาะอยู่รอบ ๆ เส้นไหม (โมโตอิ มินะกาวะ, 2530) ในการสาวไหมต้องนำรังไหมไปต้ม เซริซิน เมื่อถูกความร้อนจะถูกชะล้างออก เหลือเพียงไฟโบรอินที่ยังคงอยู่ในเส้นไหม

ในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตผงไหมเชิงพาณิชย์ ขณะที่มียุทธศาสตร์การทอผ้าไหมอยู่เป็นจำนวนมาก จึงมีส่วนเหลือทิ้งจากรังไหมที่ผ่านการสาวไหมแล้วและเศษเส้นไหมจากการทออยู่เป็นปริมาณมากเช่นกัน ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำรังและเศษไหมมาใช้ประโยชน์ โดยนำมาผลิตเป็นผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอน ด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรลิซิส (Spray Pyrolysis) เพื่อนำไปใช้เป็นองค์ประกอบของเครื่องสำอาง

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อจัดสร้างเครื่องสเปรย์ไฟโรลิซิสเป็นเครื่องต้นแบบ
2. ผลิตผงไหมขนาดต่ำกว่าไมครอนจากเส้นไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไฟโรลิซิส (Spray Pyrolysis)

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้เส้นไหมที่ยังไม่ผ่านการลอกกาวเป็นวัตถุดิบ
2. ใช้เทคนิคสเปรย์ไฟโรลิซิส ในการทำผงไหม

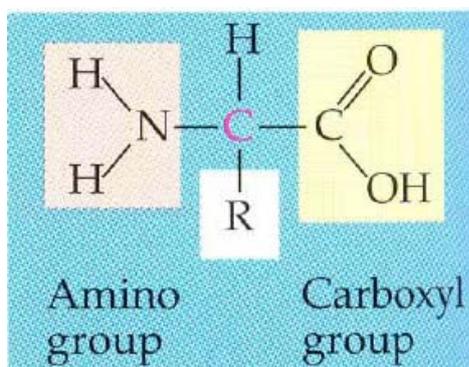
### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้ง ได้แก่ รังไหมที่ผ่านการสาวไหมแล้วและเศษเส้นไหมที่ไม่ได้คุณภาพ
2. ได้เทคโนโลยีต้นแบบในการผลิตผงไหมขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นเครื่องสำอาง
3. สามารถนำเทคโนโลยีต้นแบบไปประยุกต์ เพื่อใช้ในการสังเคราะห์สารอื่นๆ ต่อไป

## การตรวจเอกสาร

### ไหม

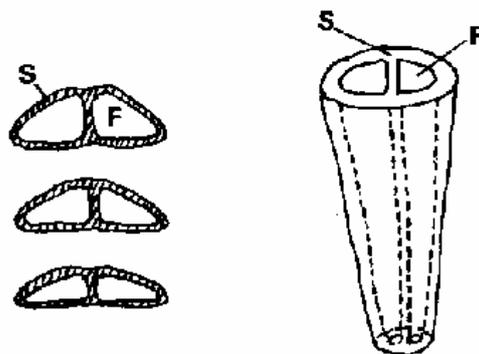
ไหมจัดเป็นเส้นใยของสัตว์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีองค์ประกอบหลักของโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานที่เกิดจากการต่อกันเป็นลูกโซ่ของโมเลกุลยาวของกรดอะมิโน (Amino acid) โดยมีการเชื่อมต่อโมเลกุลด้วยสายโซ่พอลิเพปไทด์ (Polypeptide chain) การต่อกันของลูกโซ่โมเลกุลยาวนี้เองที่มีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของเส้นใยโปรตีนที่มีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้ธาตุหลักที่ประกอบในโมเลกุลได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน (โดยจะแตกต่างจากเส้นใยขนสัตว์ตรงที่ขนสัตว์มีธาตุซัลเฟอร์อยู่ด้วย) เส้นใยโปรตีนมีองค์ประกอบเคมีทั้งที่มีความเป็นด่างและเป็นกรดอยู่ในโครงสร้างเดียวกันเป็นสารประเภท แอมโฟเทอริก (Amphoteric) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของกรดอะมิโน

### 1. โครงสร้างของไหม

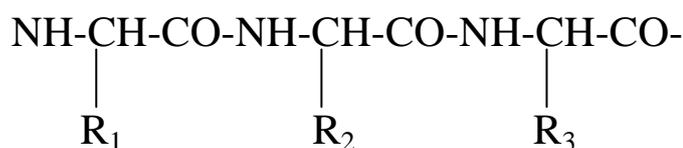
1.1 เส้นใยไหม จัดเป็นเส้นใยโปรตีนที่ได้จากหนอนไหม (Silkworm) ซึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* อยู่ในวงศ์ Bombycidae ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นเส้นใยที่แท้จริง (Fibroin Protein) ประมาณ 62 - 67% และส่วนที่เป็นกาว (Sericin Protein) ประมาณ 22 - 25% นอกจากนี้เป็นสารประกอบอื่น ๆ เช่น จี๊ซิ่ง ไขมัน สีธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนที่เป็นกาวและสารประกอบอื่น ๆ จะเกาะอยู่รอบ ๆ เส้นไหม



**ภาพที่ 2** ส่วนประกอบของเส้นใยไหม (S=sericin, F=fibroin)

1.2 โปรตีนไหม มีเซรีซินและไฟโบรอินเป็นโปรตีนองค์ประกอบหลักของรูปทรงต่างๆ ที่ประกอบขึ้นเป็นเส้นใยของไหม โดยโครงสร้างของโปรตีนในเส้นไหมสามารถอธิบายได้ดังนี้

1.2.1 โครงสร้างปฐมภูมิของไหม คือการจัดเรียงตัวของกรดอะมิโนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ตรงอย่างเป็นระเบียบ



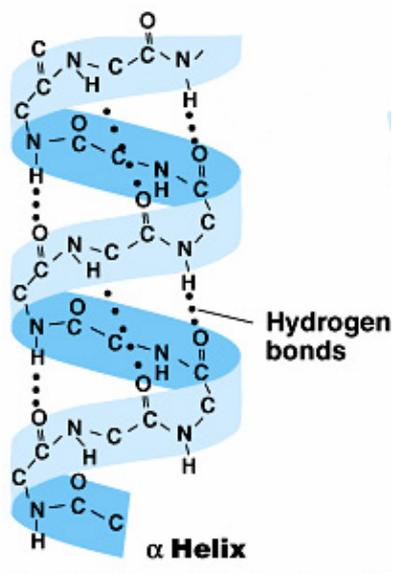
( $\text{R}_1, \text{R}_2, \text{R}_3, \dots$  เป็นโซ่เคียงข้าง)

**ภาพที่ 3** พอลิเมอร์สายโซ่ตรงของไหม

1.2.2 โครงสร้างทุติยภูมิของไหม หมายถึงความสัมพันธ์เชิงสเตอริก (Steric relationship) ระหว่างกรดอะมิโนที่อยู่ใกล้กันในโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้างโมเลกุลแบบทุติยภูมิของโปรตีนไหมแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

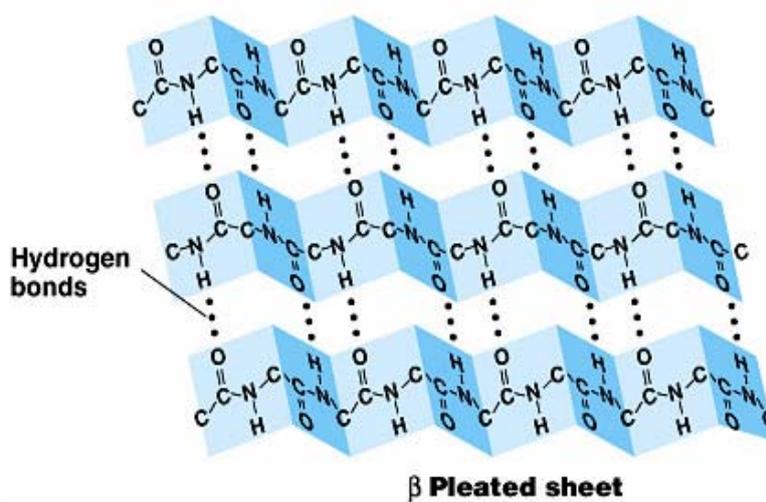
ก. โครงสร้างแบบสุ่ม เป็น ส่วนเล็กๆ ที่อาจเกิดขึ้นในพันธะของสายโซ่เพปไทด์ ซึ่งจะพบได้ใน ไกลซีน (glycine) แต่ก็ถือว่าเป็นส่วนน้อยที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ

ข. โครงสร้างแบบ  $\alpha$ -Helix เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการพันธะไฮโดรเจนกันระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของแต่ละกรดอะมิโน ( $\text{C=O}$ ) กับหมู่เอไมด์ ( $\text{N-H}$ ) ของกรดอะมิโนใกล้เคียง โดยการจัดเรียงตัวได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างแบบ  $\alpha$ -Helix

ค. โครงสร้างแบบ  $\beta$  - sheet การพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของแต่ละกรดอะมิโน ( $\text{C}=\text{O}$ ) กับหมู่เอไมด์ ( $\text{N}-\text{H}$ ) ของกรดอะมิโนใกล้เคียง มีลักษณะดังภาพที่ 5 ซึ่งจะพบโครงสร้างแบบนี้ได้ในไฟโบรอินโปรตีน



ภาพที่ 5 โครงสร้างแบบ  $\beta$  - sheet

### 1.3 คุณสมบัติทางกายภาพของไหม

1.3.1 ลักษณะภายนอก ไหมดิบจะเป็นลักษณะของเส้นใยคู่เกาะติดกันด้วยกาวไหม มีความมัน นุ่มนวล ผิวนอกดูเรียบ แต่ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใยหลังจากลอกกาวออกแล้วจะเป็นเส้นใยเดี่ยวเรียบและมีความมันตึ่มาก สวยงามเหมาะแก่การประดิษฐ์ พื้นที่หน้าตัดเป็นสามเหลี่ยมมุมมน นับเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูง ความยาวปกติทั้งไปอยู่ระหว่าง 1,300-2,000 ฟุต (390-600 เมตร) มีสีเหลืองไปจนถึงสีเทา

1.3.2 ความแข็งแรง ไหมเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงที่สุดด้วยผิวที่เรียบมัน มีค่าทนแรงดึงถึง 3.5-5 จีพีดี ในขณะที่แห้ง และจะมีความแข็งแรงน้อยลงเมื่อเปียก (ลดลงประมาณ 15-25 เปอร์เซ็นต์)

1.3.3 สภาพยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่ยืดหยุ่นตัวได้ อาจแปรไปตามชนิดของพันธุ์และการเจริญเติบโต สามารถยืดได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิม เมื่อเทียบกับเส้นใยขนสัตว์จะพบว่าสภาพยืดหยุ่นของเส้นไหมไม่ดีเท่าขนสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากสภาพโมเลกุลของไหม ไม่มีพันธะมาจับเมื่อเชื่อมเป็น โครงข่ายด้านข้าง ดังนั้นจึงไม่อาจดึงกลับคืนสภาพเดิมได้

1.3.4 การคืนตัวจากแรงอัด ไหมมีความสามารถในการคืนกลับได้ดี ไม่เกิดการยับย่นง่าย สามารถกลับคืนรูปได้ เพียงวางทิ้งไว้

1.3.5 การดูดซึมความชื้น ที่สภาวะมาตรฐานความสามารถในการดูดซึมความชื้นจะอยู่ที่ 11 เปอร์เซ็นต์ ที่ความชื้นอิ่มตัวสามารถดูดซึมได้ถึง 25-35 เปอร์เซ็นต์ นับว่ามีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี ทำให้เป็นประโยชน์มากในการประยุกต์ใช้ในการย้อมสีผ้า ต่างจากเส้นใยตัวอื่นๆที่จะสามารถทำการดูดซึมได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในของเหลว เช่น เกลือของโลหะ เป็นต้น

1.3.6 ความร้อน สามารถทนต่อความร้อนถึงประมาณ 380 องศาฟาเรนไฮต์ (190 องศาเซลเซียส) ในระยะเวลาอันสั้น มิฉะนั้นแล้วจะสลายตัว

1.3.7 ความถ่วงจำเพาะ ไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเพียง 1.25 แต่มีการทิ้งตัวดี

1.3.8 อายุการใช้งานของไหม ไหมอาจจะสีกร่อนหรือถูกทำลายได้โดยออกซิเจนในชั้นบรรยากาศหรือการแรงเหนียวหรือดิ่งที่ละน้อย ถ้าปราศจากการเก็บและบำรุงรักษาที่ดี

#### 1.4 คุณสมบัติทางเคมีของไหม

1.4.1 กรด คล้ายขนสัตว์คือไม่ถูกทำลายด้วยกรดทั่วไป แต่กรดที่มีความเข้มข้นสูงสามารถทำลายไหมได้

1.4.2 ด่าง ไม่อ่อนไหวต่อด่างเท่าขนสัตว์ ต่ออาจถูกทำลายได้ด้วยด่างที่มีความเข้มข้นสูงและอุณหภูมิที่สูงพอ ด่างแก่มีผลทำให้ไหมมีความมันน้อยลง

1.4.3 เกล็ดคลอไรด์ ไหมสามารถถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกล็ดคลอไรด์ผสมอยู่ ได้แก่ เหนือ และน้ำเกลือทั่วไป

1.4.4 สารละลายอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ไหมส่วนใหญ่มักใช้การซักแห้งอยู่เสมอ ดังนั้น น้ำยาซักแห้งจึงไม่ทำลายเส้นไหม

1.4.5 สารซักฟอก ไหมมีความทนต่อสารซักฟอก แต่ถูกทำลายได้ด้วยสารซักฟอกประเภทออกซิไดส์ เช่นพวกที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรด์ผสมอยู่ ส่วนพวกสารซักฟอกประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ โซเดียมเปอร์บอเรต ภายใต้ภาวะปกติจะไม่เกิดผลเสียต่อไหม

1.4.6 ราและแมลง โดยทั่วไปจะไม่เกิดราขึ้นได้ง่าย ยกเว้นถูกทิ้งไว้ในสภาพที่ค่อนข้างเปียกชื้นเป็นเวลานาน

1.4.7 แสง ฟ้าไหมจะอ่อนไหวต่อแสงแดด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถูกแสงแดดโดยตรงเป็นเวลานาน ความแข็งแรงของไหมจะลดลง

## 2. เซรีซิน

ไหมเซรีซินคือส่วนของกาวที่ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยไฟโบรอิน มีอยู่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักไหมดิบ ซึ่งเป็นการประกอบกันของพอลิเพปไทด์ 5-6 เส้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป (ช่วงประมาณ 10-300 kDa) โดยเซรีซินจะถูกสร้างจากกรดอะมิโนมากกว่า 18 ชนิด ซึ่งจะมีหมู่ข้างเคียงที่มาเกาะอยู่ในโมเลกุลโปรตีนที่แข็งแรง เช่น ไฮดรอกซิล , คาร์บอกซิล และหมู่อะมิโน และกรดอะมิโนส่วนใหญ่ที่พบในเซรีซิน ได้แก่ เซรีน (serine) กรดแอสพาร์ติก (aspartic acid) และไกลซีน (glycine) ประมาณ 31.9, 13.8 และ 12.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของกรดอะมิโนในไหมเซรีซิน)

เซรีซินมีรูปร่างในแบบที่เรียกว่ากลอบูลาร์ (Globular; เป็นรูปทรงกลมเล็กๆ) เป็นโครงสร้างผสมระหว่างโครงสร้างแบบ  $\alpha$ -Helix, โครงสร้างแบบ  $\beta$  - sheet และ โครงสร้างแบบลุ่ม ซึ่งโครงสร้างแบบทรงกลมเล็กที่ซับซ้อนนี้จะแสดงถึงหน้าที่สำคัญในการเร่งของปฏิกิริยาและบ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะของโมเลกุล

**ตารางที่ 1** ส่วนประกอบของกรดอะมิโนในไหมเซริซิน

Amino Acid	<i>B.mori</i> cocoon	Tussah <i>A. pernyi</i> cocoon
Non-polar Amino acids		
Glycine	127.0	149.9
Alanine	55.1	27.8
VAline	26.8	11.9
Leucine	7.2	9.9
Isoleucine	5.5	8.0
Proline	5.7	19.1
Phenylalanine	4.3	6.0
Tryptophan	-	-
Oxy amino acid		
Serine	319.7	226.3
Threonine	82.5	149.6
Tyrosine	34.0	49.2
Acidic amino acid		
Aspartic acid	138.4	122.5
Glutamic acid	58.0	67.4
Basic amino acid		
Lysine	32.6	14.7
Arginine	28.6	54.5
Histidine	13.0	25.0
Sulfur-complex Amino acid		
Methionine	0.5	1.3
(Cysteine)	1.4	1.8

ที่มา: วิวัฒน์ (2548)

เซรีซินเมื่อถูกผ่านกระบวนการย่อยสลายทางกายภาพ ทางเคมีหรือโดยการใช้น้ำร้อนแล้ว เซรีซินจะแตกตัวเป็นเพปไทด์ บางเพปไทด์อาจมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 20 kDa (ปกติจะไม่น้อยกว่า 5 kDa) โดยเพปไทด์ของเซรีซินเหล่านี้สามารถที่จะละลายน้ำได้ ดูดซับความชุ่มชื้นได้เป็นอย่างดี และยังสามารถนำไปใช้เกี่ยวกับปฏิกิริยาทางด้านชีวภาพที่สำคัญ เช่น แอนติออกซิเดชัน (antioxidation) หรือนำมาใช้ในทางด้านยารักษาโรค เช่น สารต้านการจับตัวเป็นก้อนของเลือด และสารต้านมะเร็ง เป็นต้น ส่วนเพปไทด์ของเซรีซินที่แตกตัวแล้วยังมีน้ำหนักของโมเลกุลสูง (20-300 kDa) จะสามารถละลายได้ในน้ำเดือด และโปรตีนในเซรีซินนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials) หรือนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านเส้นใยหรือสิ่งทอต่างๆ

### 3. ไฟโบรอิน

ไฟโบรอินมีความแตกต่างกับเซรีซินตรงที่ไม่สามารถละลายน้ำได้และไฟโบรอินจะประกอบด้วย 3 พอลิเพปไทด์ (1) สายโซ่ที่มีน้ำหนักมาก (High-molecular weight, “H-chain”) ประมาณ 350 kDa (2) สายโซ่ที่มีน้ำหนักน้อย (Low-molecular weight, “L-chain”) ประมาณ 26 kDa (3) ไกลโคโปรตีนหรือไฟโบรเฮกแซมเมอร์อิน (Glycoprotein or Fibrohexamerin, “fhx”) ประมาณ 25 kDa โดยอัตราส่วนของโมลลาร์เป็น 6:6:1 ตามลำดับ เกาะกันโดยพันธะดิสซัลไฟด์ (Disulfide bond) แบบไม่มีขั้ว (Non-covalent) ซึ่งองค์ประกอบกรดอะมิโนของไหมไฟโบรอินเป็นดังที่แสดงในตารางที่ 2 โดยจะมีกรดอะมิโนส่วนใหญ่เป็น ไกลซีน, อะลานีน, เซรีน 44.6, 29.4, 12.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สายโซ่ไฟโบรอินจะลักษณะโดยทั่วไปเป็นเส้นตรงตามแนวแกนขนานไปกับเส้นใยของไหม โดยสายโซ่ที่เรียงตัวอยู่ใกล้กันจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน และบางช่วงของแต่ละสายโซ่ที่มีการเรียงต่อกันเป็นรูปแบบ - (ala-gly)<sub>n</sub> - ติดกัน จะเกิดลักษณะโครงสร้างที่เรียกว่า  $\beta$  - sheet ซึ่งจะเป็นโครงสร้างซ้ำๆ ในโปรตีนที่มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยจะเป็นลักษณะเฉพาะและบ่งบอกถึงคุณสมบัติทางกลต่างๆ เช่น ความแข็งแรงของเส้นใย

**ตารางที่ 2** ส่วนประกอบของกรดอะมิโนในไหมไฟโบรอิน

Amino Acid	<i>B.mori</i> cocoon	Tussah <i>A. pernyi</i> cocoon
Non-polar Amino acids		
Glycine	446.0	265.0
Alanine	294.0	441.0
VAline	22.0	7.0
Leucine	5.3	8.0
Isoleucine	6.6	-
Phenylalanine	6.3	6.0
Proline	3.6	3.0
Tryptophan	1.1	11.0
Oxy amino acid		
Serine	121.0	118.0
Threonine	9.1	1.0
Tyrosine	51.7	49.0
Acidic amino acid		
Aspartic acid	13.0	47.0
Glutamic acid	10.2	8.0
Basic amino acid		
Lysine	3.2	1.0
Arginine	4.7	26.0
Histidine	1.4	8.0
Sulfur-complex Amino acid		
Methionine	1.0	-
(Cysteine)	2.0	-
	Gly > Ala	Gly < Ala

ที่มา: วิวัฒน์ (2548)

#### 4. การประยุกต์ใช้โปรตีนใหม่

4.1 การประยุกต์ใช้เกี่ยวกับเครื่องสำอาง เนื่องจาก 80 เปอร์เซ็นต์ของกรดอะมิโนในเซรีซิน และไฟโบรอินมีหมู่ข้างเคียงเป็นไฮโดรฟิลิก ซึ่งช่วยให้โปรตีนใหม่มีความสามารถในการดูดซับน้ำ ได้เป็นอย่างดีและสามารถซึมผ่านชั้นผิวหนังได้ จึงจัดเป็นตัวดูดซับความความชุ่มชื้น (Moisture) ที่มีประสิทธิภาพสูง นอกจากนั้นยังเป็นสารต่อต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งการเสื่อมสภาพของเซลล์ผิว และป้องกันแสงจากรังสียูวี ดังนั้นจึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในส่วนของผู้ผลิตภัณฑ์สำหรับดูแล สุขภาพผิว หรือแม้แต่เส้นผม โปรตีนใหม่ก็จะช่วยดูแลได้ โดยที่เมื่อนำเซรีซินมาใช้กับ เส้นผมแล้วจะทำให้ผมมีความเงางามและมีน้ำหนักมากขึ้น

4.2 การประยุกต์ใช้เป็นวัสดุที่สลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable material) ในการทำวัสดุ ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นจะใช้เซรีซินเป็นวัตถุดิบที่นำไปผสมกับเรซิน โดยให้เกิดปฏิกิริยากัน ระหว่างสารละลายของเซรีซินหรือผงเซรีซินกับสารละลายพอลิโอยด์ (Polyol : a foaming agent + a foam-shaping agent + catalyst + fire retardant ) ซึ่งจากปฏิกิริยาที่จะเกิดความร้อนและเกิดขึ้นตาม กระบวนการผลิตวัสดุพอลิเมอร์หรือโฟมทั่วไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกจากจะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตามจุดประสงค์ของการผลิตแล้ว ยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดียิ่งกว่าผลิตภัณฑ์ที่ ปราศจากเซรีซินหลายเท่า และนอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลและทางความร้อนได้อีก ด้วย ตัวอย่างเช่น ภาชนะบรรจุอาหารชนิดต่างๆ

4.3 การประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเยื่อแผ่น (Membrane material) เซรีซินและไฟโบรอินสามารถ ที่จะนำมาทำเป็นเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการแยก ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถสร้างเป็นเยื่อแผ่นได้ด้วย ตัวเอง แต่ก็สามารถที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือเป็นพอลิเมอร์ร่วมกับสารชนิดอื่นได้ จาก คุณสมบัติของโปรตีนใหม่ที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นของกรดอะมิโนจำนวนมากที่มี หมู่ของไฮโดรฟิลิก ดังนั้นการใช้งานของเยื่อแผ่นที่มีส่วนประกอบของโปรตีนใหม่จึงเหมาะที่จะ นำไปใช้ เช่น การแยกแอลกอฮอล์จากสารละลายที่มีน้ำผสมกับแอลกอฮอล์ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น

4.4 การประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterial) โปรตีนใหม่ทั้งสองชนิดสามารถที่จะ นำมาเปลี่ยนรูปร่างให้กลายเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ เคลือบกับวัสดุที่ต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพที่ บริเวณพื้นผิวนั้นๆ เช่น การเคลือบบนผิวของอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ

ทำงานของเครื่อง โดยในอนาคตอาจจะมีการพัฒนาจนสามารถที่จะนำไหมมาเคลือบบนวัสดุเพื่อช่วยในเรื่องของความทนทาน, ทนต่อสภาพอากาศ, ช่วยในเรื่องของการซึมผ่าน เป็นต้น

4.5 การประยุกต์ใช้ทางด้านเส้นใย (Function fibers) การประยุกต์ใช้ทางด้านเส้นใย ถ้าเป็น เซริซินจะใช้เป็นตัวนำไปปรับปรุงคัดแปลงเส้นใยสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น เส้นใยของพอลิเอสเทอร์ ทำการคัดแปลงโดยการผสมเซริซินเพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างสาย โഴ้ของโมเลกุล (Cross-linked) หรือการเคลือบเซริซิน บนเส้นใยไนลอน (6-nylon) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติการซึมผ่านของอากาศ ส่วนไฟโบรอินจะเน้นไปทางด้านความแข็งแรงของเส้นใย ซึ่งไฟโบรอินเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงมาก (ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องคุณสมบัติของเส้นไหม) ดังนั้นจึงเหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานสิ่งทอหรือเส้นใยต่างๆ

## 5. เศษเหลือทิ้งของไหม

เนื่องจากไหมเป็นเส้นใยที่ตัวไหมสำรองออกมาใช้มาสร้างเป็นรังไหมเพื่อเป็นเกราะป้องกันตัวเองจากศัตรูก่อนที่จะตัวหนอนไหมจะพัฒนาเป็นดักแด้ และช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศด้วย แต่รังไหมที่ได้จากการสร้างของตัวไหมนั้น ก็ใช้ว่าจะสมบูรณ์ทั้งหมด ดังนั้นส่วนที่ไม่สมบูรณ์ก็จะถือว่าเป็นเศษเหลือทิ้งของไหม เพราะรังไหมที่มีคุณภาพดีนั้นต้องแข็งแรง และมีขนาดของรังเท่า ๆ กัน มีเส้นใยมาก ฟูรังน้อยและสาวออกได้ง่าย นอกจากรังไหมที่ไม่สมบูรณ์แล้วเศษเหลือทิ้งของไหมก็ยังมาจากส่วนอื่นอีก ซึ่งเมื่อทำการแบ่งประเภท จะได้เป็น 3 ประเภท

### 5.1 เศษไหมที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของรังไหม

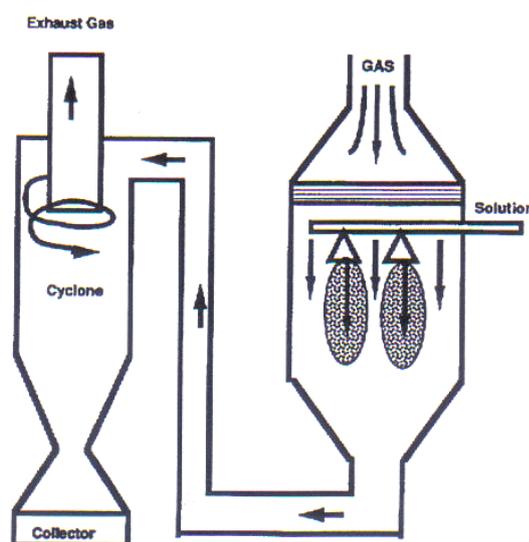
5.2 เศษไหมที่เกิดจากกระบวนการผลิตนับตั้งแต่การลอกทอ การสาวไหม การปั่นด้ายไปจนถึงการทอผ้า

5.3 เศษไหมที่ได้จากการดึง (Pulling) หรือสาว (garneting) ออกจากเศษผ้าไหมทอเส้น โดยไหมที่สาวด้วยเครื่องจักรจะนำมาใช้เป็นเส้นยืนในการทอผ้าไหม

## เทคนิคการสเปรย์

### 1. การทำแห้งแบบสเปรย์

การทำแห้งแบบสเปรย์เป็นกระบวนการทางอุตสาหกรรม ที่ใช้ในการผลิตผงแห้งจากของเหลว หรือสารแขวนลอย และเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ทำผงอนุภาคของแข็งและผงเซรามิกส์ โดยสารป้อนอาจเป็นสารละลาย ที่มีอนุภาคของแข็งกระจายตัวอย่างในของเหลว หรือเจลที่ยังอยู่ในสภาพที่เหลวพอ สารป้อนจะถูกสเปรย์เป็นละออง (Atomization) ทางด้านบนของตัวอย่างเครื่องทำแห้ง (ภาพที่ 6) ซึ่งตัวทำละอองมีอยู่หลายแบบ อาจใช้เป็นแบบจานหมุนความเร็วสูง (High Speed Rotating Disc) หัวพ่นแบบของไหล 2 ชนิด (Two-Fluid Nozzle) หัวพ่นแบบของไหลเดี่ยว (Single Fluid Nozzle) หรือ ตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic Nebulizer) ตัวทำละอองมีหน้าที่ทำสารป้อนให้มีขนาดเม็ดเล็กๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นระหว่างการทำแห้ง ขนาดและการกระจายตัวของขนาดเม็ดของเหลวที่สร้างขึ้นจะเป็นตัวกำหนดขนาดและการกระจายตัวของขนาดของผงแห้งได้ เม็ดของเหลวหรือสารแขวนลอยที่เกิดจากการทำละอองจะไปด้วยแรงโน้มถ่วงผ่านกระแสน้ำร้อนที่อาจไหลในทิศทางเดียวกัน (Cocurrent) หรือ ไหลสวนทางกัน (Countercurrent) ผงแห้งจะได้ไหลออกด้านล่างของส่วนทำแห้ง (Drying Chamber)

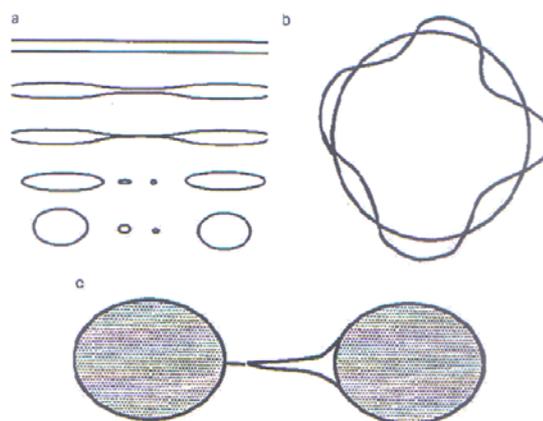


ภาพที่ 6 รูปแบบของกระบวนการทำแห้งแบบสเปรย์

ที่มา: ไพศาล (2542)

และในกระบวนการเนื่องจากเม็ดของเหลวมีขนาดเล็กมากจึงใช้เวลาไม่กี่วินาทีในการทำแห้ง โดยเฉลี่ยเม็ดของเหลวจะถูกระเหยของเหลวออกจนกลายเป็นผงแห้งภายในเวลาไม่เกิน 30 วินาที กระแสลมร้อนถ่ายโอนความร้อนให้เม็ดของเหลวเพื่อให้เกิดกระบวนการระเหยของเหลวให้กลายเป็นไอ, เกิดปฏิกิริยาเคมี หรือตกผลึกภายในเม็ดของเหลวและเพิ่มอุณหภูมิให้กับผงของแข็งที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังถ่ายโอนความร้อนให้กับผนังของเครื่องทำแห้งเพื่อลดเซชความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม ระดับอุณหภูมิของลมที่ใช้ต้องสูงมากพอที่จะป้องกันไม่ให้ไอที่เกิดขึ้นควบแน่นกลับเป็นของเหลวตลอดช่วงการทำแห้ง

1.1 การทำละออง (Atomization) วัตถุประสงค์ของการทำละออง คือการทำให้สารป้อนการเป็นเม็ดเล็กจำนวนมาก เพื่อที่เม็ดของละอองจะได้ถูกทำให้แห้งภายในเวลาอันสั้น โดยประเภทของตัวทำละอองในที่นี้จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวทำละอองที่ใช้หลักการของแรงดันเป็นตัวทำให้เกิดละออง และตัวทำละอองที่ใช้หลักการของความถี่สูงมาใช้ในการทำให้เกิดละออง ซึ่งในกลุ่มแรกนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท (1) หัวพ่นแรงดันสูง (2) หัวพ่นแบบของไหลคู่ (3) จานหมุนความเร็วสูง ซึ่งทั้ง 3 แบบ มีราคาไม่แพง ทำเม็ดที่มีการกระจายตัวของขนาดกว้าง และค่อนข้างมีประสิทธิภาพต่ำ โดยจากพลังงานที่ใช้มีเพียงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวของกระแสให้กลายเป็นละออง ส่วนที่เหลือทั้งหมดสูญเสียไปในรูปของความร้อนให้กับระบบเม็ดของเหลวที่ได้อยู่ในช่วง 2-500 โดยประมาณ หัวพ่นทั้ง 3 แบบนี้ทำให้เกิดเม็ดของเหลวตามกลไกที่แสดงดังภาพที่ 7



**ภาพที่ 7** กลไกการเกิดของเม็ดของเหลวจากตัวทำละอองจากหลักการของแรงดัน

ที่มา: ไพศาล (2542)

เมื่อของเหลวอยู่ในรูปทรงกระบอก (ภาพที่ 7 a) มีความยาว (L) มากกว่า 1.5 เท่าของรัศมีทรงกระบอกหรือฟิลาเมนต์ (Filament) จะไม่เสถียรและแตกตัวเป็นเม็ด ความไม่เสถียรอาจเกิดมาจากการสั่นโดยธรรมชาติหรือทำขึ้นภายในของเหลว ความสั่นจะเพิ่มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ถ้าความยาวคลื่นของการสั่น ( $\lambda$ ) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวของฟิลาเมนต์ ( $\lambda = nL$ ) หรือจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $\lambda = nD_j$ ) ดังแสดงในภาพที่ 7 b เม็ดของเหลวที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.89 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิลาเมนต์ ( $D_d = 1.89D_j$ ) แต่สำหรับของเหลวที่หนืดมากๆ เม็ดของเหลวที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่า โดยคำนวณจากสมการ

$$D_d = 1.89D_j \left[ 1 + \frac{3\mu_l}{(\gamma\rho_l D_j g)^{1/2}} \right]^{1/6} \quad (1)$$

ในระหว่างการแยกของเหลวออกจากกันและการเปลี่ยนรูปร่างเป็นเม็ดทรงกลมจะเกิดหางเล็กๆ เชื่อมระหว่างเม็ดทรงกลม (ภาพที่ 7c) และจากหางส่วนนี้จะกลายเป็นเม็ดขนาดเล็กกว่า ไมครอนเกิดขึ้นพร้อมกับเม็ดใหญ่ ดังภาพที่ 7a

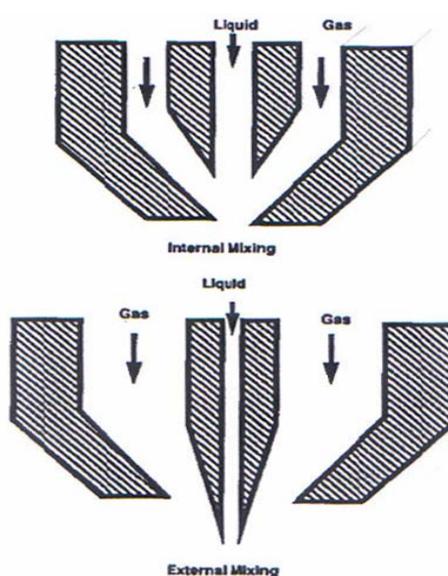
1.1.1 ตัวทำละอองแบบหัวพ่นแรงดันสูง ของเหลวจะถูกขับด้วยแรงดันสูง (50-300 kPa) ผ่านช่องแคบ (Orifice) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-5.0 มิลลิเมตร ทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเสียง (Sonic Velocity) ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วที่ทางออกของช่องแคบหาได้จากสมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation)

$$\frac{v_2^2}{2} = \frac{\Delta P}{\rho_l} \quad (2)$$

เนื่องจากของเหลวมีความเร็วสูงมากขณะผ่านช่องแคบ ดังนั้นส่วนที่เป็นช่องแคบต้องทำจากวัสดุที่ทนแรงดันสูงๆ และทนต่อการสึกหรอ โดยเฉพาะเมื่อสารป้อนเป็นแบบของเหลวผสมอนุภาคผง ขนาดเฉลี่ยของเม็ดของเหลวที่ได้จากการพ่นแบบของไหลเดี่ยว (แรงดันสูง) ประมาณค่าได้จากสูตร

$$D_d = \frac{(500\mu m)(psi)^{1/3}}{\sqrt[3]{\Delta P}} \quad (3)$$

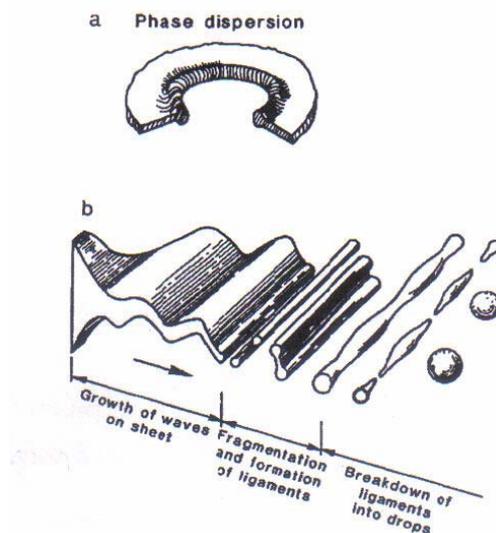
1.1.2 ตัวทำละอองแบบหัวพ่นของไหลคู่ ของเหลวที่มีความดันต่ำ (0-60 พีเอสไอ) กับ แก๊ส (ส่วนใหญ่ใช้อากาศ) ความดันสูง (ประมาณ 100 พีเอสไอ) ถูกขับผ่านช่องแคบ 2 ชั้น ดังรูปที่ 8 ซึ่งหัวพ่นนี้ถูกออกแบบอย่างหลากหลาย แต่แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบผสมภายใน และแบบผสมภายนอก หัวพ่นชนิดนี้ใช้หยดของเหลวขนาดเล็กกว่า และมีการกระจายตัวของขนาดกว้างกว่า ชนิดแรงดันสูง โดยขนาดของเม็ดของเหลวจะเป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนกับความเร็วตามผิว (Superficial Velocity) และคุณสมบัติของไหล สำหรับสารเหลวข้น (Slurry) ที่ไม่สามารถทำให้เป็น ละอองด้วยหัวพ่นแรงดันสูงได้ต้องใช้หัวพ่นชนิดนี้ในการทำแห้ง



ภาพที่ 8 หัวพ่นของไหลคู่ชนิดผสมภายใน (บน) และผสมภายนอก (ล่าง)

ที่มา: ไพศาล (2542)

1.1.3 ตัวทำละอองแบบจานหมุนความเร็วสูง โดยจะเหวี่ยงของเหลวออกมาเป็นแผ่นบาง จากแผ่นบางของเหลวจะก่อรูปเป็นฟิลาเมนต์ และแตกตัวเป็นเม็ดทรงกลมในที่สุด ดังภาพที่ 9 จานหมุนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5 เซนติเมตร ถึง 21 เซนติเมตร และหมุนด้วยความเร็วรอบระหว่าง 3,000 ถึง 50,000 รอบต่อนาที ข้อดีของจานหมุนความเร็วสูง คือ ใช้กับสาร ป้อนอนุภาคของแข็งแขวนลอยในของเหลวที่มีความข้นมากๆ ซึ่งอาจทำความเสียหายต่อหัวพ่น 2 แบบแรกได้ นอกจากนี้ยังใช้งานได้ที่อัตราการป้อนและความเร็วรอบหลากหลาย โดยไม่เป็นการกระจายตัวของเม็ดของเหลวที่ได้มากนัก



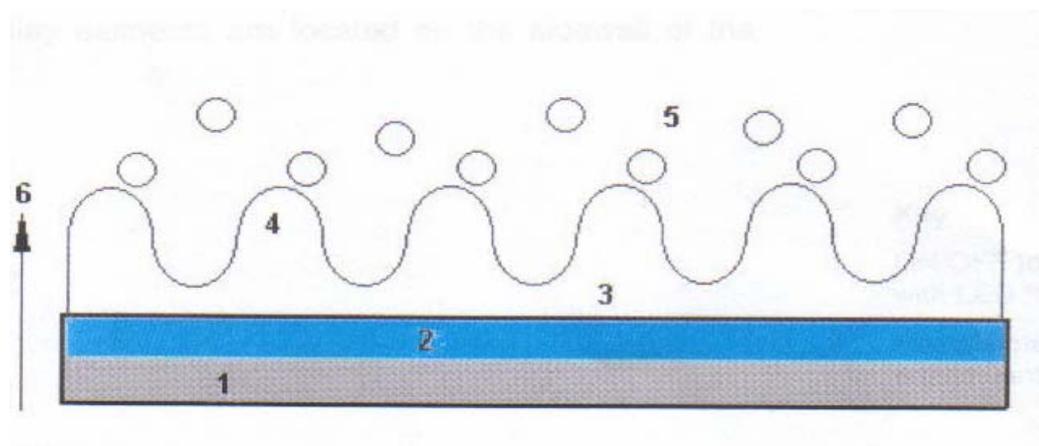
**ภาพที่ 9** กลไกการทำเม็ดของเหลวของงานหมุนความเร็วสูง

ที่มา: ไพศาล (2542)

1.1.4 ตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิค การทำละอองจะอาศัยหลักการของความถี่สูง โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการกำเนิดความถี่สูง แล้วส่งสัญญาณความถี่สูงไปตามสายส่งที่เชื่อมต่อกับหัวที่ใช้ในการทำละออง ซึ่งที่บริเวณหัวตัวทำละอองจะเป็นตัวที่สัมผัสกับของเหลวที่ต้องการทำละอองตามกลไกการเกิดละอองในภาพที่ 10 และจากนั้นละอองก็จะถูกพ่นออกมาตามลักษณะของภาพที่ 11 ซึ่งการสั่นแบบความถี่สูงจะช่วยให้การกระจายตัวของหยดของเหลวที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่ต่ำ และได้หยดของเหลวที่มีขนาดเล็ก สามารถนำไปใช้ในทิศทางที่ต้องการได้ง่าย โดยใช้อุปกรณ์ช่วยอื่นๆ สามารถที่จะทำละอองได้แม้กับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงและสารที่มีความแตกต่างกันระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายมาก เช่น สารละลายชั้นบางๆ ที่มีตัวถูกละลายตกตะกอนอยู่ที่ผิวหน้า ถือว่าเป็นเทคนิคการทำละอองที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานที่หลากหลาย แต่ราคาจะสูงกว่าตัวทำละอองที่ใช้หลักการของแรงดัน

สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง เรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้นเช่น คลื่นความถี่ 300 เฮิร์ตซ์ ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรเศษๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไป

มากมายคลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่นแต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิก อย่างเช่น 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มิลลิเมตร เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากคลื่นเสียงจะไม่มี การเลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบ ๆ หรือที่เราเรียกว่า มีทิศทาง



**ภาพที่ 10** กลไกการทำละอองจากคลื่นความถี่สูง (1) Oscillating element (2) Glass plate (3) Liquid (4) Capillary waves (5) Aerosol (6) Ultrasound



**ภาพที่ 11** การทำงานของหัวตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิก

1.2 ขั้นตอนการทำแห้ง\_ข้อดีประการหนึ่งของเทคนิคการทำแห้งแบบสเปรย์ คือ ได้ผงทรงกลม ซึ่งไหลได้ง่ายและเหมาะสำหรับการขึ้นรูปแบบอัดแห้ง (Dry Pressing) ผงที่ได้ส่วนใหญ่จะมีรูกลวง เนื่องจากการระเหยของไอที่เกิดขึ้น โดยสรุปมีอยู่ 4 กลไกที่ก่อให้เกิดรูกลวงในเม็ดของแข็งที่ได้ คือ

1.2.1 การทำแห้งสารละลายเจล เกิดการก่อตัวของฟิล์มเจลรอบหยดของเหลวทำให้อัตราการระเหยลดลง

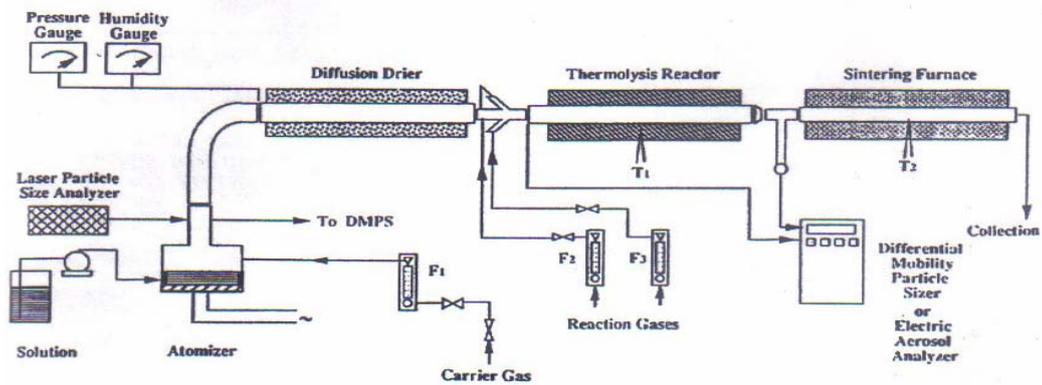
1.2.2 การทำแห้งสารละลายเกลือ ขณะที่เกิดการระเหยตัวทำละลายที่ผิวของหยดของเหลว ตัวทำละลายจากด้านในจะไหลขึ้นมาทดแทนส่วนที่ถูกระเหยไป ในขณะที่ผิวตัวถูกละลายที่บริเวณด้านนอกจะแพร่กลับเข้าไปยังส่วนกลางของหยดของเหลว ถ้าอัตราการระเหยสูงกว่าอัตราการแพร่ของตัวถูกละลายจะเกิดการตกผลึก และเกิดเป็นเปลือกของแข็งซึ่งจะลดอัตราการทำแห้ง

1.2.3 การทำแห้งสารเหลวข้น ขณะที่ของเหลวไหลไปที่ผิวจะพาเอาอนุภาคของแข็งติดไปด้วย ทำให้เกิดเค็กรองที่ผิวของหยดของเหลว ถ้าชั้นเค็กรองมีค่าการซึมผ่านต่ำพอจะชะลอการระเหยที่ผิวของหยดของเหลว

1.2.4 อากาศที่ถูกกักไว้ในหยดของเหลว ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดรูกลวงได้

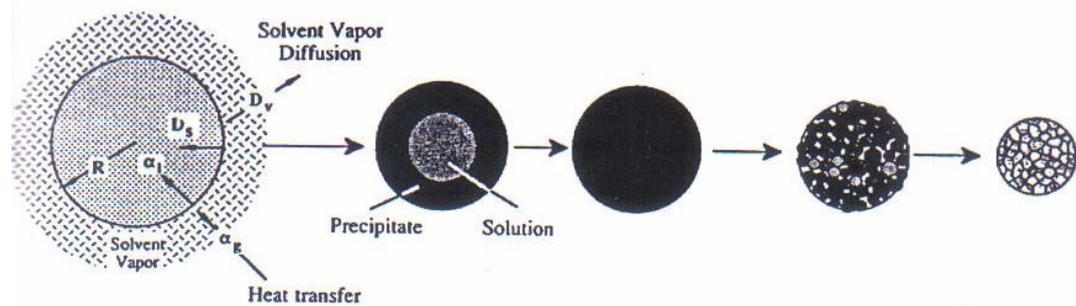
## 2. สเปรย์ไฟโรลลิ่ง

การแยกสลายด้วยความร้อนแบบสเปรย์ เรียกว่า “กระบวนการเอสพี” เป็นกระบวนการที่รวมรวมขั้นตอนการตกตะกอน การแตกตัวด้วยความร้อนและการเผาผลาญเข้าด้วยกัน ขั้นตอนทั้งสามเกิดเรียงตามลำดับ จากอุณหภูมิต่ำไปสูงภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เรียงต่อกัน ดังภาพที่ 12 กระบวนการเริ่มจากการทำหยดสารละลายแล้วผ่านการระเหยตัวทำละลายจนเกิดการตกตะกอนภายในหยดสารละลาย การทำแห้งของอนุภาคของแข็ง การสลายตัวด้วยความร้อนของอนุภาคของแข็งและก่อรูปเป็นอนุภาคที่มีรูพรุน ซึ่งในที่สุดจะถูกกำจัดรูพรุนกลายเป็นอนุภาคทรงกลมตันด้วยกระบวนการเผาผลาญ (ภาพที่ 13) ในระหว่างกระบวนการ เวลาที่อนุภาคชนกันสั้นเกินไปที่จะเกิดการเชื่อมต่อของอนุภาคได้ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้สังเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคขนาดนาโนเมตร



ภาพที่ 12 ชุดเครื่องปฏิบัติการเอสพี

ที่มา: ไพศาล (2542)



ภาพที่ 13 ขั้นตอนของกระบวนการเอสพี

ที่มา: ไพศาล (2542)

ส่วนที่ให้ความร้อนแก่อนุภาคอาจเป็นเตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace) หรือเตาเผาพลาสมา ทั้งแบบคลื่นความถี่วิทยุ (RF) และไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

### 3. การประยุกต์ใช้

ด้วยกระบวนการเอสพี สามารถสังเคราะห์อนุภาคผงที่มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีตามที่ต้องการได้ดังนี้

3.1 การสังเคราะห์อนุภาคทรงตันการนำไปใช้ ตัวอย่างเช่น งานทางด้านเซรามิกส์ขั้นสูง ลักษณะผงเซรามิกส์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตควรมีความบริสุทธิ์เป็นเนื้อเดียวกัน(Homogeneity) สูง มีความหนาแน่นสูงมีขนาดเล็ก มีรูปร่างสมมาตร และไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อนซึ่งลักษณะเหล่านี้สามารถทำได้ด้วยกระบวนการเอสพี ยกเว้นเรื่องปัญหาเรื่องการเกิดรูกลวงหรือเปลือกของแข็ง ส่วนปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการเกิดรูกลวงของอนุภาคได้แก่

3.1.1 ความอึดตัวสัมพัทธ์ของตัวละลายในหยดสารละลาย สารละลายที่มีความอึดตัวสัมพัทธ์เริ่มต้นต่ำจะทำให้อนุภาคทรงกลมตันที่มีขนาดเล็กต่างจาก สารละลายที่มีความอึดตัวสัมพัทธ์สูงที่ให้อนุภาคขนาดใหญ่ที่มีรูกลวงและมีชั้นเปลือกของแข็ง ดังรูปที่ 14 ซึ่งอนุภาคที่ได้จากการนำสารละลายเซอร์โคเนียไฮดรอกซีคลอไรด์ (ZHC) ที่มีความอึดตัวสัมพัทธ์เริ่มต้น 0.009 ถึง 1.4 (อึดตัวยิ่งยวด) ไปทำเป็นหยดด้วยหัวพ่นของไหลคู่ในเตาเผาอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส ที่ความอึดตัวสูงอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่และมีรูกลวง (ภาพที่ 14 A,B) ขณะที่ความอึดตัวต่ำ อนุภาคเป็นทรงกลมตันขนาดเล็กกว่า (ภาพที่ 14 C, D)

3.1.2 อัตราการระเหย เมื่อต้องการให้เกิดการตกตะกอนสม่ำเสมอภายในหยดสารละลายเพื่อให้ได้อนุภาคทรงตัน ควรควบคุมอัตราการระเหยให้ต่ำ เพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้นภายในหยดสารละลายก่อนที่จะถึงจุดที่เกิดการตกตะกอน และควรใช้อุณหภูมิต่ำกว่าหรือเท่ากับจุดเดือดของตัวทำละลาย

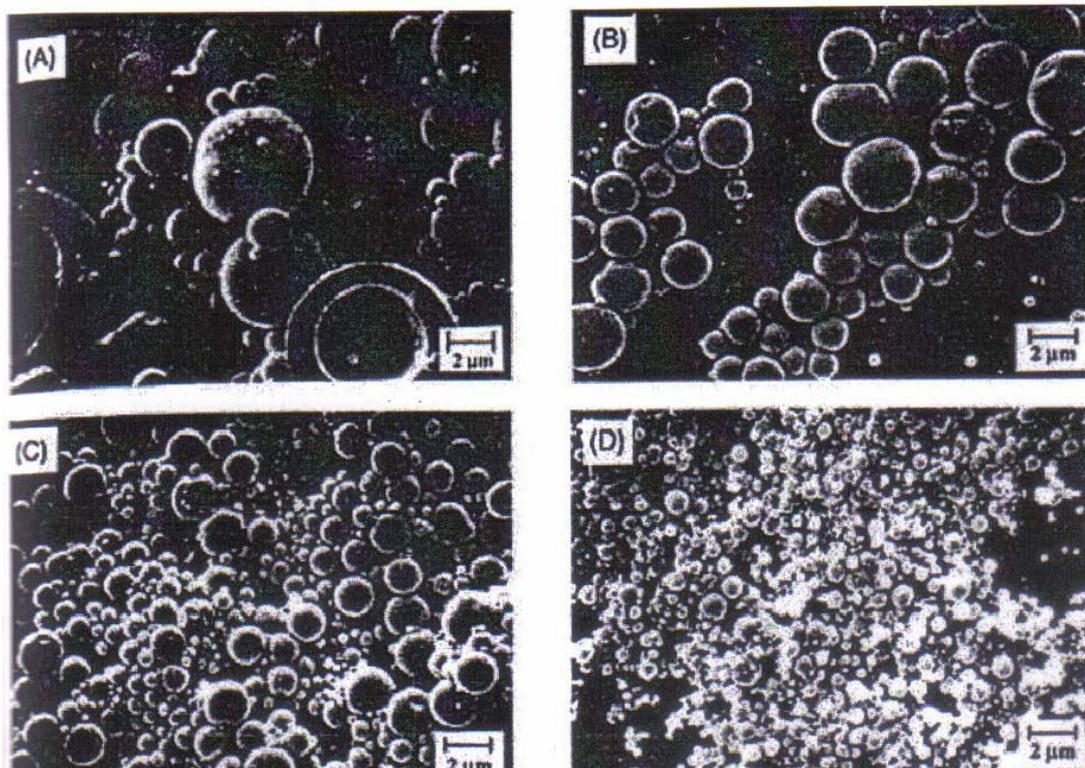
3.1.3 ขนาดเริ่มต้นของหยดสารละลายที่ได้จากเครื่องทำละออง หยดสารละลายที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มจะเกิดขนาดของอนุภาคของแข็งแบบมีรูกลวง หรือเกิดเปลือกของแข็งมากกว่าหยดสารละลายที่มีขนาดเล็ก

3.1.4 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหยดสารละลาย หยดสารละลายที่มีความเร็วสูงจะใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์สั้น ดังนั้นต้องระเหยตัวทำละลายด้วยความเร็วสูง ซึ่งนำไปสู่การเกิดรูกลวงหรือเปลือกของแข็งได้ง่าย

3.1.5 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการละลายได้ของสารละลายตั้งต้น สำหรับเกลือที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของสภาพการละลายได้ (Temperature Coefficient of Solubility) เป็นบวก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความอึดจะสูงขึ้นไปด้วย ทำให้การตกตะกอนของเกลือถูกชะลอให้เกิดล่าช้าออกไป โอกาสที่จะเกิดอนุภาคทรงตันจะมีมาก

ในการควบคุมกระบวนการเพื่อให้ได้อนุภาคทรงตัน ตัวละลายที่เลือกใช้ควรมีเป็นตัวละลายที่มีความอึดตัวยิ่งยวดวิกฤตต่างจากค่าความอึดตัวสมดุลมากๆ มีสภาพละลายได้สูง และมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของสภาพการละลายได้ (Temperature Coefficient of Solubility) เป็นบวก

ส่วนของแข็งที่ตกตะกอนควรมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ และต้องใช้ตัวทำละอองที่ทำให้เม็ดสารละลายขนาดเล็ก และมีความเร็วต่ำ เช่น เครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิค

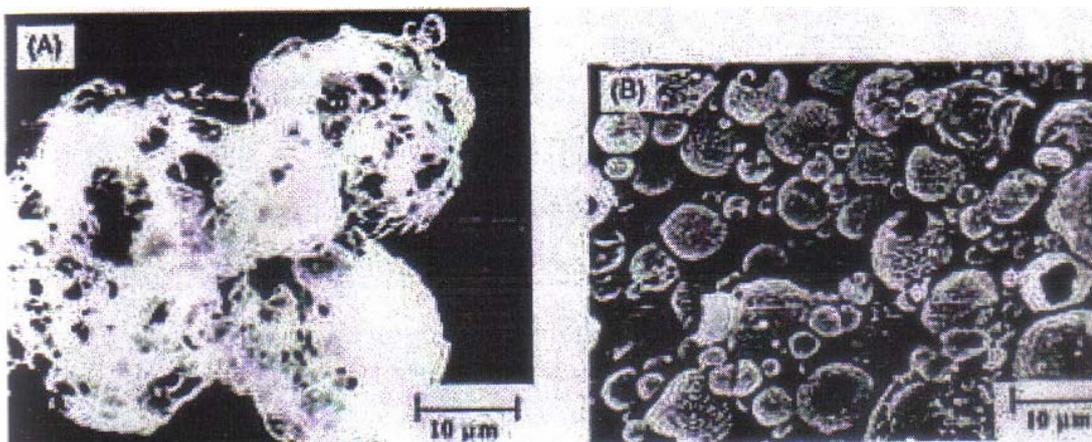


**ภาพที่ 14** รูปร่างอนุภาคที่ได้จากสารละลาย ZHC ที่ความเข้มข้นตัวสัมพัทธ์แตกต่างกัน (A) 0.35 (B) 0.088 (C) 0.018 (D) 0.009

ที่มา: Messing (1993)

3.2 การสังเคราะห์อนุภาครูพรุน สามารถใช้อนุภาครูพรุนหรืออนุภาคกลวงทำเป็นฉนวนความร้อน หรือตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา การทำให้ได้อนุภาครูพรุนควรเลือกใช้ตัวทำละลาย และการควบคุมภาวะของกระบวนการใช้ตรงข้ามกับกรณีแรก เช่น ใช้เกลือโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์  $Al_2O_3$  จากสารละลาย  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  เมื่อความเข้มข้นที่ผิวของหยดสารละลายเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความเข้มข้นวิกฤต จะเกิดเปลือกของแข็งขึ้น ที่อุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส อนุภาค  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  ละลายในน้ำส่วนที่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้อนุภาคอยู่ในสภาพที่หลอมเหลวและปล่อยแก๊สไนโตรสออกไซด์ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 76 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำในหยดสารละลายถูกระเหยเพิ่มมากขึ้น มีผลให้ความหนืดของ  $Al(NO_3)_3$  เพิ่มมากขึ้น และเกิดฟองอากาศ

ขึ้นภายในอนุภาค (ภาพที่ 15A) นอกจากนี้การเติมตัวทำฟอง (Foaming Agent) ตัวอย่างเช่น เอธิลีนไกลคอล ลงในสารละลายก็สามารถทำให้เกิดรูพรุนในเม็ดของแข็งได้เช่นกัน (ภาพที่ 15B) โดยเอธิลีนไกลคอลจะเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 198 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งรูพรุนไว้ในเม็ดของแข็ง



**ภาพที่ 15** (A) อนุภาครูพรุน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เตรียมจาก  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  และ (B) อนุภาครูพรุน  $\text{ZnO}$  เตรียมจาก  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 15\% \text{wt Polyethleneglycol}$

ที่มา: Messing (1993)

3.3 การสังเคราะห์อนุภาคเชิงประกอบ เมื่อพิจารณาจากลักษณะสมบัติของสารตั้งต้นสามารถจำแนกการสังเคราะห์อนุภาคเชิงประกอบได้ 4 ประเภท คือ

3.3.1 การตกตะกอนร่วมตามลำดับ (Sequential Coprecipitation) ถ้าตัวละลายในสารละลายตั้งต้นมีสภาพละลายได้แตกต่างกันมาก ตัวละลายที่สภาพละลายได้ต่ำกว่าจะตกตะกอนก่อน ส่วนตัวทำละลายที่สภาพละลายได้สูงกว่าจะตกตะกอนบนผิวของอนุภาคตัวแรกด้วยกลไกแบบวิวิธพันธุ์ ทำให้อนุภาคเชิงประกอบประกอบด้วยผลึกขนาดใหญ่ของตัวละลายตัวแรกล้อมด้วยผลึกเล็กๆ ของตัวละลายตัวที่สอง ตัวอย่างเช่น อนุภาคเชิงประกอบอลูมินา/แพลตตินัม สังเคราะห์จากสารละลายของ 0.5 โมลต่อลิตรของ  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{H}_2\text{PtCl}_6$  (มี Pt 2.5 % โคนน้ำหนัก) ที่ 950 องศาเซลเซียส ผงที่ได้ประกอบด้วยผลึกทรงสี่เหลี่ยมขนาด 4-5 นาโนเมตร ของแพลตตินัมกระจายตัวเป็นพื้นผิวของอนุภาคทรงกลมขนาด 400 นาโนเมตร ของ  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

3.3.2 การตกตะกอนพร้อมกัน (Simultaneous Coprecipitation) เมื่อตัวทำละลายมีสภาพละลายที่ใกล้เคียงกัน ตัวทำละลายทั้งสองจะตกตะกอนพร้อมกันหรือในช่วงเวลาที่ใกล้เคียง

กัน กรณีจะได้อนุภาคผงที่ประกอบด้วยผลึกเล็ก (ระดับนาโนเมตร) ของตัวทำละลายทั้งสอง กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น อนุภาคเชิงประกอบเซอร์โคเนีย/แพดตินัม เตรียมจาก สารละลายของ 0.5 โมลต่อลิตรของ ZHC และ  $H_2PtCl_6$  (10% โดยน้ำหนัก) ที่ 950 องศาเซลเซียส

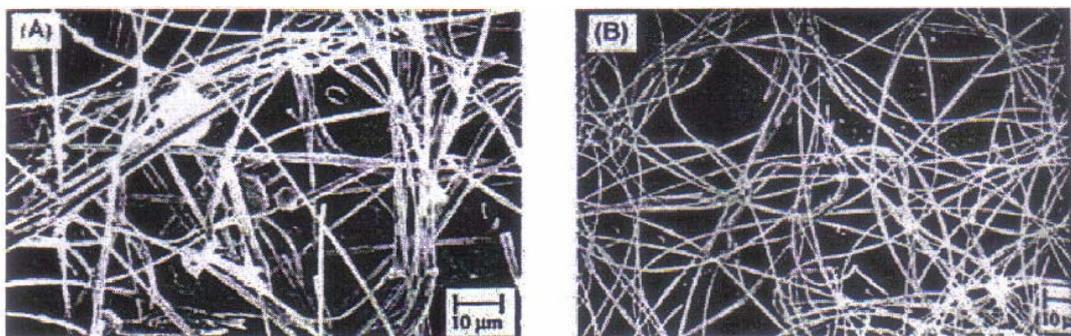
3.3.3 การตกตะกอนของสารละลาย-คอลลอยด์ (Colloid-Solution Precipitation) เป็นระบบลูกผสมระหว่างสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ คอลลอยด์ และสารละลายของเกลือโลหะ หรือ สารอินทรีย์โลหะ ตัวอย่างเช่น อนุภาคเชิงประกอบ  $\lambda$ - $Al_2O_3$ /แพดตินัม สังเคราะห์จากสารละลาย  $H_2PtCl_6$  ผสมกับโซลโบฮีไมท์ (Boehmite) ที่พีเอช 3

3.3.4 การตกตะกอนแบบเหนียวน้ำ (Vapor-phase Induced Precipitation) มีเกลือของ โลหะบางชนิด โดยเฉพาะเกลือของโลหะทรานซิชันที่ตกตะกอนได้ง่ายในรูปของไฮดรอกไซด์ หรือ ไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายมีพีเอชเปลี่ยนไป จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$  (ANN) มีจุดหลอมเหลวต่ำ และเป็นเหตุให้เกิดรูกลวงและรูปร่างผิดปกติของอนุภาค  $Al_2O_3$  ที่ได้ วิธีหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหานี้คือ เติม  $NH_3$  เข้าไปในกระแสแก๊ส ตัวพาท่อนที่อนุภาคจะมีอุณหภูมิถึงจุด หลอมเหลวของ ANN  $NH_3$  จะละลายไปในหยดสารละลายทำให้พีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 7 และ เกิดปฏิกิริยากับ ANN เป็น  $Al(OH)_3$  ตกตะกอนภายในหยดสารละลาย

3.4 การสังเคราะห์เส้นใย กระบวนการเอสพีสามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยที่ไม่ ต่อเนื่องได้ ด้วยการควบคุมความหนืด แรงตึงผิว และความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นให้ เหมาะสม พร้อมกับการใช้เครื่องทำละอองแบบของไหลสองชนิด สารละลายตั้งต้นที่มีลักษณะ สมบัติเหมาะสมเมื่อถูกดันผ่านหัวฉีดของเครื่องทำละอองจะยึดตัวออกเป็นเส้น เพื่อรักษารูปร่างที่ เป็นเส้นใยไว้จำเป็นต้องมีกลไกทั้งด้านกายภาพและด้านเคมีมาช่วย มิฉะนั้นเส้นใยจะเสียรูปร่าง และกลายเป็นหยดของเหลวที่สุด เช่นต้องรีบกำจัดตัวทำละลายให้เร็วที่สุดก่อนที่เส้นใยจะไหลเข้าสู่ ส่วนเตาเผา

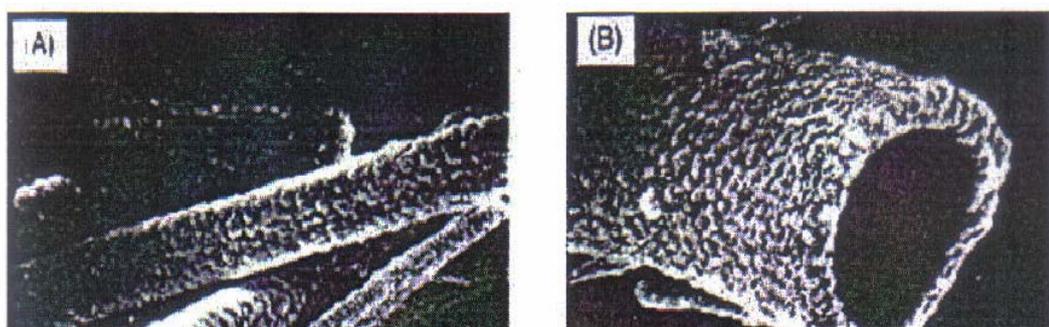
สำหรับสารละลายที่มีความหนืดต่ำ อัตราส่วนระหว่างแรงตึงผิวกับความหนืดของสารตั้ง ต้นเป็นตัวกำหนดกลไกการเกิดเส้นใย ตัวอย่างเช่น การเตรียมเส้นใยเซอร์โคเนียจากสารละลาย เซอร์โคเนียมอะซิเตรท ( $Zr(CH_3COO)_4$ , ZAC) ซึ่งมี  $ZrO_2$  25% โดยน้ำหนัก ผสมพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (PVOH) 6% โดยน้ำหนัก มีค่าความหนืด 0.120 Pa.s และแรงตึงผิวอยู่ระหว่าง 0.056 ถึง 0.04 นิวตันต่อเมตร โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว ( $C_{16}H_{33}(OC_2H_4)_{20}OH$ ) จนถึง  $10^{-3}$  โมลต่อลิตร เส้นใยที่ได้รูปร่างดังแสดงในภาพที่ 16 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วน  $\gamma/\eta$  ลดลงเส้นใยที่ได้จะยาวขึ้น และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง

นอกเหนือจากการช่วยลดอัตราส่วน  $\gamma/\eta$  แล้ว PVOH ยังทำหน้าที่เป็นโครงร่างระหว่างการแข็งตัวของเส้นใย โดยเข้ายึดเกาะกับเกล็ดของโลหะในสารละลาย ในทำนองเดียวกับการสังเคราะห์อนุภาคผงที่มีรูกลวง นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์เส้นใยกลวงได้โดยการควบคุมภาวะการเตรียมและคุณสมบัติของสารละลายตั้งต้น ถ้าใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ใช้อัตราส่วนการไหลต่ำ และอัตราการให้ความร้อนต่ำจะทำให้ได้เส้นใยทรงตัน อย่างเช่นที่แสดงในภาพที่ 17A ถ้าเริ่มต้นด้วยความเข้มข้นสูง พร้อมกับเลือกใช้อัตราการไหลสูง และให้ความร้อนเร็ว เส้นใยที่ได้จะมีรูกลวง ดังภาพที่ 17B



**ภาพที่ 16** ผลของการใช้สารตั้งผิวต่อการขึ้นรูปเส้นใย ZAC (A) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (B) เติมสารลดแรงตึงผิว

ที่มา: Messing (1993)



**ภาพที่ 17** เส้นใยเซอร์โคเนียเตรียมจาก (A) ZAC+6%wt PVOH มี  $ZrO_2$  24.8% (B) ZAC+6%wt PVOH มี  $ZrO_2$  25.3%

ที่มา: Messing (1993)

3.5 การสังเคราะห์แผ่นฟิล์ม กระบวนการเอสพีสามารถใช้สังเคราะห์แผ่นฟิล์ม เคลือบบนผิววัตถุขนาดใหญ่ที่ไม่เป็นระนาบแบน อย่างเช่น เส้นลวดได้เป็นอย่างดี โดยมีข้อดีในแง่ความง่ายของกระบวนการและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น อย่างเช่น การเคลือบผิวภายใต้ภาวะสุญญากาศ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ การทำแผ่นฟิล์มสารกึ่งตัวนำประเภทออกไซด์ ซัลไฟด์ และเซเลไนต์ โดยมีความหนาแน่นระหว่าง 0.2 ถึง 1 ไมโครเมตร และแผ่นฟิล์มสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ขั้นตอนการเคลือบผิว เริ่มจากสารละลายตั้งต้นถูกพ่นออกมาเป็นละอองหยดเล็กๆ แล้วตกลงบนผิวของตัวรองรับที่ถูกทำให้ร้อน หยดสารละลายจะถูกระเหยตัวทำละลายออกด้วยความร้อนที่ถ่ายโอนมาจากตัวรองรับจนกลายเป็นอนุภาคของแข็ง ต่อเนื่องด้วยการสลายตัวและการเผาผลาญหรือหลอมเหลวบนผิวของตัวรองรับนั้น ตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิของตัวรองรับ อัตราการไหลของแก๊สตัวพา อัตราการไหลของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ขนาดของหยดสารละลาย และระยะห่างระหว่างตัวทำละลายกับผิวหน้าของตัวรองรับ ภาวะที่ดีที่สุดในการเคลือบผิว คือ ภาวะที่หยดสารละลายตกลงบนผิวตัวรองรับพอดีกับที่ตัวทำละลายถูกระเหยหมด

อุณหภูมิที่ผิวของตัวรองรับเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะมีผลต่อการทำแห้งหยดสารละลาย การสลายตัวของเกลือโลหะ การเผาผลาญ การหลอมเหลว การกลายเป็นผลึก และการโตของเกรน ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะมีผลต่อเนื่องไปยังคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้ นอกจากนี้ขั้นตอนการทำละอองก็เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะการเกิดแผ่นฟิล์มบนตัวรองรับขึ้นอยู่กับรูปแบบของการตกของหยดสารละลายบนผิวตัวรองรับ อัตราเร็วของการทำระเหยตัวทำละลาย และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในหยดสารละลาย ซึ่งทั้งหมดนี้สัมพันธ์กับขนาดหยดสารละลายที่ทำขึ้น และความเร็วของหยดสารละลายที่ออกจากตัวพ่น

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อประมาณ 70 ปีมาแล้ว บริษัทเครื่องสำอาง “คานเน โบ” ของญี่ปุ่นนำไฟโบรอินมาหลอมให้อยู่ในรูปของสารละลายก่อนที่จะทำเป็นผง และครีม ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง การผลิตผงไหมในปัจจุบัน เริ่มที่ญี่ปุ่นเมื่อปี 2530 โดยศาสตราจารย์ ดร.คิโยชิ ฮิราบายาชิ (Dr. Kiyoshi Hirabayashi) แห่งมหาวิทยาลัยชินชู (Shinshu University) ประสบความสำเร็จในการผลิตผงไหม จากไหมป่าอีรี (Eri Silk) เป็นผงไหมชนิดที่ละลายน้ำและรับประทานได้ ต่อมาในปี 2532 บริษัทเครื่องสำอางคานเน โบ ได้ผลิตผงไหมชนิดไม่ละลายน้ำเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องสำอาง (พรรณนีย์, 2547)

ผงไหมที่ผลิตอยู่ในปัจจุบัน มี 3 ชนิด คือ

- ผงไหมจากหนอนไหม โดยการนำหนอนไหมวัย 5 อายุ 3 วัน มาเข้าเครื่องฟรีซดราย (Freeze dry) แล้วบดให้เป็นผง

- ผงไหมเซริซิน (Sericin) โดยการนำโปรตีนเซริซินที่หุ้มเส้นใยไหมมาผลิตด้วยกรรมวิธีในห้องปฏิบัติการ ได้ผงไหมที่ละลายน้ำได้ ผงไหมชนิดนี้จึงนำมาใช้ประโยชน์ในการทำโพลีเมอร์อุ้มน้ำ

- ผงไหมไฟโบรอิน (Fibroin) ผงไหมชนิดนี้มีทั้งในรูปละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำ ชนิดที่ไม่ละลายน้ำทำโดยลอกกาวยูรีนออกจากเส้นไหมก่อน แล้วบดให้เป็นผง ร้อนด้วยตะแกรง เพื่อให้ได้ผงไหมขนาดต่างๆ ตามต้องการ อีกวิธีหนึ่งคือ การนำเส้นไหมไปฉายรังสีในระดับต่างๆ แล้วนำมาบดจนได้ผงละลายน้ำ

สำหรับประเทศไทย เริ่มมีการวิจัยเพื่อผลิตผงไหมเป็นครั้งแรกที่ ศูนย์วิจัยหม่อนไหมศรีสะเกษ เมื่อปี พ.ศ. 2540 เป็นผงไหมชนิดไม่ละลายน้ำ โดยใช้เส้นไหมพันธุ์นางน้อย ศรีสะเกษ 1 ได้ผงไหมขนาด 200-400 ไมโครเมตร ซึ่งยังมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ในหนังสือ “100 ปีหม่อนไหม สายใยแผ่นดิน” ซึ่งจัดพิมพ์โดยสถาบันวิจัยหม่อนไหม กรมวิชาการเกษตร ได้บรรยายละเอียดการผลิตผงไหมที่ได้ทำการศึกษาวิจัยของนักวิจัยไทยไว้ดังนี้

การผลิตผงไหมชนิดละลายน้ำ โดยนำรังไหมที่ได้ตัดเอาดักแด้และคราบหนอนไหมที่อยู่ภายในรังไหมออกให้หมด ตัดเปลือกรังไหมให้มีขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร นำมาลอกกาวยูรีนออกด้วยสารละลายของโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 0.5 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วน 1:100 ต้มที่อุณหภูมิ 98.2 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ต้ม 2 ครั้ง แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาดผึ่งลมให้แห้งในที่ร่ม จะได้สารไหมไฟโบรอิน (Fibroin) ต้มสารไหมไฟโบรอินด้วยสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) กับน้ำและเอทิล แอลกอฮอล์ (สัดส่วนของโมล 1:8:2) โดยใช้สารไหมไฟโบรอิน 15 กรัม ต่อสารละลายผสม 100 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารละลายไหมที่ได้ลงในถุงเซลลูโลส นำไปไฮโดรไลส์ด้วยน้ำที่สะอาด 3 วัน ทำให้เป็นน้ำแข็งแล้วนำเข้าเครื่องฟรีซดราย ต่อจากนั้นบดด้วยเครื่องบด จะได้ผงไหมมีลักษณะคล้ายแป้งสีขาว สัมผัสด้วยมือมีความลื่นมัน ชิมดูไม่มีรส และไม่มีกลิ่น สารไหมไฟโบรอินจากเปลือกรังไหมสีขาว 50 กรัม ได้ผงไหม 36.5 กรัม หรือคิดเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของผงไหมที่ได้ 5-10 ไมครอน มี 50 เปอร์เซ็นต์ 15-20 ไมครอน มี 37.8 เปอร์เซ็นต์ และขนาด 25 ไมครอน ขึ้นไปมี 11.7 เปอร์เซ็นต์

การผลิตไหมชนิดไม่ละลายน้ำ โดยทำการลอกกาชิริชินด้วยโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์ ต้มไหมที่อุณหภูมิ 90.5 องศาเซลเซียส นาน 90-120 นาที จำนวน 3 ครั้ง สามารถสกัดชิริชินในเส้นไหมและรังไหมไทยได้ร้อยละ 30-34 เปอร์เซ็นต์ ได้สารไฟโบรอิน 66-70 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการบดด้วย โฮโมจีไนเซอร์ (Homoginizer) ความเร็ว 29,000 รอบต่อนาที แล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 เมช (mesh) จากนั้นเข้าเครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกชั้นผงไหมอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้ผงไหมที่มีความละเอียดตั้งแต่ 10-80 ไมครอน การผลิตผงไหมจากรังไหมป่าจะได้ผงไหมที่ละเอียดมากกว่า เนื่องจากมีกาชิริชินน้อยและเส้นใยมีความเหนียวต่ำกว่าไหมไทยศูนย์วิจัยหม่อนไหมศรีสะเกษ เมื่อปี พ.ศ. 2540 เป็นผงไหมชนิดไม่ละลายน้ำ โดยใช้เส้นไหมพันธุ์นางน้อย ศรีสะเกษ 1 ได้ผงขนาด 200-400 ไมครอน ซึ่งยังมีขนาดค่อนข้างใหญ่

จากการสำรวจเอกสารไม่พบการใช้เทคนิคสเปร์ย์ไฟโรลิซิสในการทำผงไหม แต่มีการใช้เทคนิคสเปร์ย์ไฟโรลิซิสในการสังเคราะห์อนุภาคนิกเกิลออกไซด์ โดย Lenggoro และคณะ (2003) ซึ่งได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ และการควบคุมขนาดของอนุภาค โดยสารตั้งต้นที่ใช้คือ  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiCl}_2$ , และ  $\text{Ni}(\text{HCO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  อุณหภูมิที่ใช้ตั้งแต่ 400-900 องศาเซลเซียส และภายใต้สภาวะดังกล่าวสามารถสังเคราะห์ได้อนุภาคที่มีขนาด 20 นาโนเมตร

Kim et al. (2004) นำเทคนิคสเปร์ย์ไฟโรลิซิสมาใช้ในการสังเคราะห์นิกเกิลจากนิกเกิลในเตตระทังแบบเติมสารยูเรียและไม่เติมสารยูเรีย โดยในงานวิจัยนี้ใช้นิกเกิลในเตตระทังที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร กับแก๊สไฮโดรเจน เวลาที่ใช้ภายในเครื่องประมาณ 19 วินาที เพื่อให้ นิกเกิลในเตตระทังทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นนิกเกิลและนิกเกิลออกไซด์ จากนั้นนิกเกิลออกไซด์ก็จะเปลี่ยนเป็นนิกเกิลที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส และกลายเป็นอนุภาคที่สมบูรณ์โดยการเผาผลาญที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ส่วนผลของการเติมยูเรียเข้าไปนั้นจะช่วยให้อนุภาคที่ได้มีความแข็งและมีผิวเรียบมากขึ้น และยังพบอีกว่ายูเรียมั้นสามารถช่วยให้การเตรียมอนุภาคนิกเกิลนั้นไม่จำเป็นต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนอีกด้วย

Wang et al. (2004) ทำการสังเคราะห์อนุภาคนิกเกิลขนาดนาโนเมตรจากนิกเกิลในเตตระทังด้วยกระบวนการสเปร์ย์ไฟโรลิซิสที่ความดันต่ำ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบและอิทธิพลของความดัน, อัตราการไหลของแก๊ส และความเข้มข้นของสารตั้งต้น ที่มีต่อขนาดและรูปร่างของอนุภาคนิกเกิลที่จะเกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าความดันและอัตราการไหลของแก๊สมิ

ผลต่อการเปลี่ยนแปลงของนิเกิลออกไซด์ไปเป็นนิเกิลในกระบวนการสเปรย์ไฟโรลีสที่ความดันต่ำนี้ และความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ต่ำจนเกินไปก็ไม่สามารถสังเคราะห์ให้เกิดอนุภาคนาโนได้ ส่วนตัวทำละลายร่วมที่สามารถใช้แทนแก๊สไฮโดรเจนเพื่อช่วยในปฏิกิริยารีดักชันได้ ก็มี กรดฟอร์มิก และเอทานอล จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าฟีกของนิเกิลมีความชัดเจนมาก ต่างจากฟีกของนิเกิลออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนที่เกิดขึ้นง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชันไปเป็นนิเกิล ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากพื้นที่ผิวที่สูงกว่า

Chen et al. (2006) ใช้เครื่องอัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรลีสเพื่อศึกษาถึงลักษณะของหยดสารตั้งต้นที่มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคที่เกิดขึ้น โดยในการทดลองนี้ใช้เซอร์โคเนียและซีเรียเปรียบเทียบกับ จากการทดลองพบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคบ่งบอกได้ชัดเจนว่ามีผลจากการเปลี่ยนแปลงกลไกของแก๊สที่ผ่านไปสู่อุณหภูมิ ส่วนลักษณะที่เกิดขึ้นของเซอร์โคเนียและซีเรียที่ได้มีความแตกต่างกัน ซึ่งพบว่าอนุภาคเซอร์โคเนียที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีผิวเรียบ ในขณะที่ซีเรียได้อนุภาคที่มีลักษณะคล้ายขามและผิวไม่เรียบ ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากความสามารถในการละลายของสารตั้งต้นที่ต่างกัน แต่ทั้งสองความแตกต่างของสารตั้งต้นนี้สามารถสังเคราะห์อนุภาคที่มีการกระจายตัวได้ที่ระดับต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเป็น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Gurmen et al. (2006) ใช้อัลตราโซนิคสเปรย์ไฟโรลีสในการเตรียมอนุภาคทรงกลมขนาดนาโนเมตรของโคบอลต์ โดยสารตั้งต้นที่ใช้เป็นโคบอลต์ไนเตรทกับแก๊สไฮโดรเจน ขนาดของอนุภาคที่ผลิตได้สามารถควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งขนาดของอนุภาคโคบอลต์ที่ได้อยู่ในช่วง 158 ถึง 1001 นาโนเมตร จากอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ที่ 800 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการลดความเข้มข้นของโคบอลต์ไนเตรทพบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคก็จะลดลง โดยอยู่ที่ 596 ถึง 480 นาโนเมตร แต่ถ้าผลการทดลองที่ได้เกิดความแตกต่างกันระหว่างทฤษฎีและการทดลองนั้นนี้อาจจะหมายความว่ามีการรบกวนกันของหยดสารละลายจากการทำละอองเกิดขึ้น

Hee Ju et al. (2006) เตรียมอนุภาคแมงกานีสออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยใช้เทคนิคสเปรย์ไฟโรลีส โดยเริ่มจากอนุภาคทรงกลมของหยดสารตั้งต้นขนาดไมโครเมตรที่เกิดขึ้นจากการพ่นสารละลายแมงกานีสอะซิเตทเตตระไฮเดรทกับกรดซัลฟูริกและเอทิลีนไกลคอลเพื่อที่จะเปลี่ยนให้เป็นอนุภาคแมงกานีสออกไซด์ขนาดนาโนเมตรภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจากผลการ

ทดลองอนุภาคที่ถูกเตรียมจากการใช้แก๊สที่มีอัตราการไหลสูงนั้นพบว่าจะมีขนาดและรูปร่างที่ดี โดยขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็น 90 และ 250 นาโนเมตร ตามลำดับ และในการเตรียมอนุภาคแมงกานีสออกไซด์ด้วยเทคนิคนี้ถ้าปราศจากการเติมสารอินทรีย์ (Organic Additive) จะทำให้อนุภาคที่ได้มีรูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ดี

Hsiao et al. (2006) ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์อนุภาคโครงสร้างนาโนของอะลูมิเนียมที่อยู่ในซิงค์ออกไซด์ (AZO) โดยใช้เทคนิคสเปร์ย์ไฟโรลิซิส ซึ่งหยดละอองของสารผสมระหว่างซิงค์และอะลูมิเนียมในเตาทจะถูกปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นที่ 0.06-3.0 โมลต่อลิตร และเมื่อหยดของสารละลายผสมเข้าไปสู่ส่วนทำความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการสลายตัวด้วยความร้อนในอากาศที่อุณหภูมิช่วง 500-800 องศาเซลเซียส โดยอนุภาค AZO ที่ผลิตจะแบ่งออกเป็นชั้นปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งได้ขนาดของอนุภาคเป็น 15-30 นาโนเมตร และ 1-3 ไมโครเมตร ตามลำดับ และจากการทดลองยังพบอีกว่าขนาดของอนุภาคที่ได้ในชั้นปฐมภูมิจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้น และอนุภาคที่ถูกสังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นสูงก็มีแนวโน้มที่จะกลายเป็นอนุภาคกลางหรืออนุภาคที่มีรูพรุน ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก

Reuge et al. (2006) ทำการศึกษาการระเหยและการตกตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนสเปร์ย์ไฟโรลิซิส โดยจะทำการคาดคะเนถึงเวลาที่ใช้ในการระเหยของตัวละลายและอิทธิพลของตัวแปรสำคัญๆ ที่มีผลต่อกระบวนการที่เกิดขึ้น เพื่อความสอดคล้องของสภาวะในการผลิตทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งขั้นตอนหลักของช่วงเวลาที่ทำการระเหยนั่นคือการถ่ายเทพลังงานและความร้อนจากผนังของเครื่องปฏิกรณ์ไปสู่แก๊สที่อยู่ภายใน ด้วยความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนี้นำไปสร้างเป็นสมการเพื่ออธิบายการระเหยที่เกิดขึ้น จากนั้นก็ทำการตั้งสมมติฐานต่อเพื่อหาสมการที่ใช้คาดคะเนช่วงเวลาในการตกตะกอน ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีความสำคัญมากในการขั้นตอนการผลิต

Jokanovic et al. (2007) ได้ทำการศึกษาถึงข้อมูลของอนุภาคซิลเวอร์ไอโอไดด์จากการเตรียมสารตั้งต้นจากกลุ่มสารที่มีองค์ประกอบของซิลเวอร์และไอโอไดด์ที่มีความเสถียร ด้วยกระบวนการอัลตราโซนิคสเปร์ย์ไฟโรลิซิส ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แล้ว ขั้นตอนการคัดเลือกอนุภาคซิลเวอร์ไอโอไดด์จะทำในน้ำด้วยการกรอง (Ultra-Filtration) ซึ่งการเก็บตัวอย่างนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง เก็บหลังจากที่ทำการสังเคราะห์เสร็จ และเก็บหลังจากทำการทิ้งไว้ 2 อาทิตย์ ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของช่วงเวลาที่ส่งผลต่อรูปร่างและคุณสมบัติของอนุภาคซิลเวอร์ไอโอไดด์

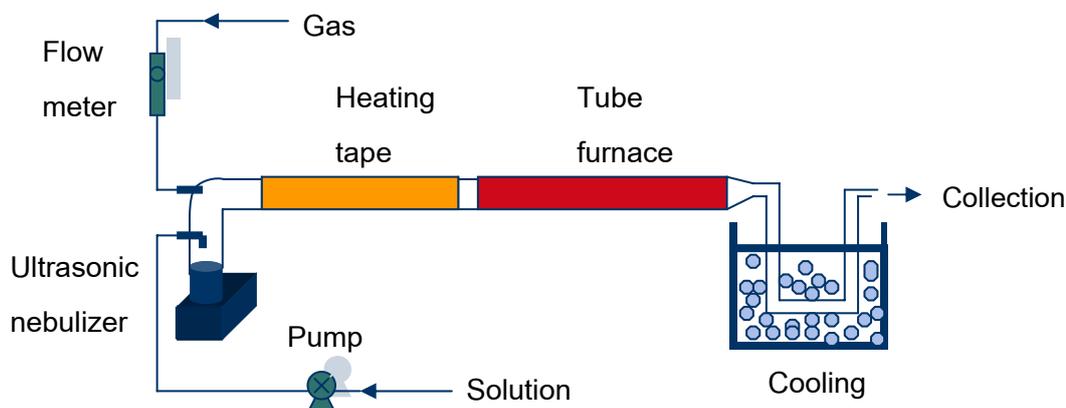
ที่ได้ โดยจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ารูปทรงของอนุภาคที่ได้จะเปลี่ยนไปเมื่อทิ้งตัวอย่างไว้ในน้ำ 2 อาทิตย์ คือ เปลี่ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงหกเหลี่ยม (Spherical to Hexagonal) และขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นก็เช่นกัน

## อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

### การจัดสร้างเครื่องสเปรย์ไฟโรลิซิส

#### 1. การออกแบบ

เมื่อทำความเข้าใจถึงระบบการทำงานของเครื่องสเปรย์ไฟโรลิซิสในส่วนของทฤษฎีแล้ว จากนั้นก็ถึงการออกแบบจริงที่ต้องทำการเลือกอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบในขั้นตอนต่างๆ ของระบบ ซึ่งจะมีลักษณะดังภาพที่ 18 โดยจะเห็นว่าส่วนของการทำความอุณหภูมินั้นจะมีเพียงสองส่วน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่มีปฏิกิริยาเคมีและการเผาไหม้เกิดขึ้น การออกแบบส่วนของการทำความร้อนจึงมีเพื่อใช้ระเหยตัวทำละลายในช่วงแรกและทำแห้งให้เกิดเป็นอนุภาคผงใหม่ในช่วงที่สองที่มีอุณหภูมิสูงกว่า และอีกส่วนที่มีการออกแบบเพิ่มเข้ามาคือส่วนของการหล่อเย็น (Cooling) เนื่องจากการเก็บอนุภาคทำโดยการกรองด้วยชุดกรองแบบเยื่อแผ่น (Membrane Filtration) ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อเยื่อกรอง จึงทำการลดอุณหภูมิของแก๊สที่ออกมาก่อนทำการเก็บอนุภาคที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 18 ส่วนประกอบของเครื่องสเปรย์ไฟโรลิซิส

#### 2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Nebulizer) (ภาพที่ 19) ผลิตโดยบริษัท Hielscher รุ่น UM20-1.6 สามารถทำละอองขนาด 1.5-2.0 ไมโครเมตร ความถี่ของการทำงานอยู่ที่

1.6 เมกกะเฮิร์ต สามารถทำละอองได้ 200-500 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยการทำละอองจะเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ผิวในการทำละออง (Active Atomization Surface) ของหัวเครื่องทำละออง ซึ่งเมื่อทำการหยดของเหลวลงไปบริเวณนั้นหนึ่งหยด การทำละอองก็จะเกิดขึ้นหนึ่งครั้ง ซึ่งเป็นการทำงานแบบเป็นจังหวะ

2.2 ปั๊มความดันต่ำ (Peristaltic pump) ผลิตโดยบริษัท Watson-Marlow Bredel Pumps รุ่น 313S เป็นปั๊มที่สามารถปรับอัตราการไหลได้ ในช่วง 0-16 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีสายยางลำเลียงของเหลวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังนั้นของเหลวที่ออกมาจึงมีลักษณะเป็นหยด

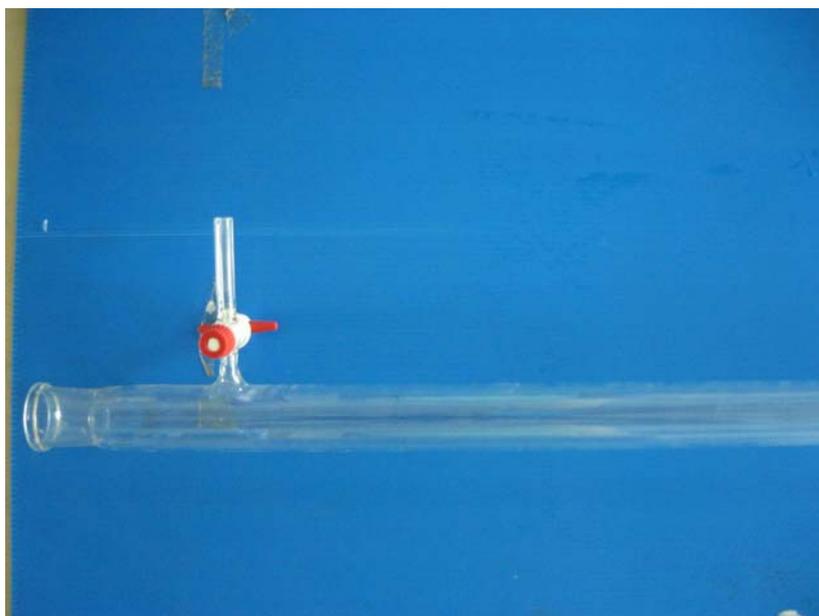


ภาพที่ 19 เครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิค



ภาพที่ 20 ปั๊มแบบความดันต่ำ

2.3 ท่อทางเดินแก๊ส ทำจากแก้วไพเรกซ์ (Pyrex) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแก้ว อยู่ที่ 30 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร สามารถทนความร้อนได้สูงมาก เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อนต่ำ ทนต่อการกัดกร่อนด้วยน้ำ, กรด, สารละลายพวกเกลือต่างๆ, ฮาโลเจน, สารละลายอินทรีย์ และสารละลายพวกอัลคาไลน์ได้ดี นอกจากนั้นแก้วยังมีลักษณะโปร่งแสง สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงภายใน และสามารถถอดล้างทำความสะอาดได้ง่าย

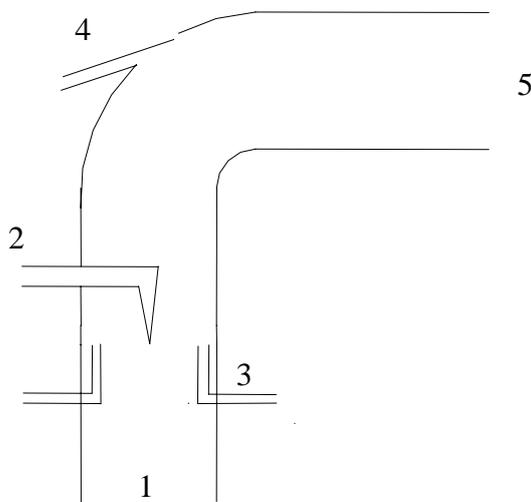


**ภาพที่ 21** ท่อแก้วทางเดินแก๊ส

2.4 ส่วนเชื่อมต่อระหว่างตัวทำละอองกับทางเดินแก๊สหลัก ทำจากแก้วไพเรกซ์ โดยอุปกรณ์ส่วนนี้ เป็นส่วนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับจังหวะและความต่อเนื่องของการเกิดละออง ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของการทำงานในอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่เชื่อมต่ออยู่ (ภาพที่ 22)

หมายเลข 1 คือส่วนที่ต่อเข้ากับหัวของตัวทำละออง

หมายเลข 2 คือส่วนที่ต่อเข้ากับปั๊มป้อนสารละลายใหม่ ซึ่งสายยางของปั๊มจะเป็นส่วนที่เชื่อมต่อเข้ากับส่วนนี้ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายท่อหมายเลข 2 นี้ เพื่อการหยดที่เป็นจังหวะตามการทำงานของเครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิค ดังนั้นตามภาพจึงเห็นปลายท่อมีลักษณะแหลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร



**ภาพที่ 22** ส่วนเชื่อมต่อระหว่างตัวทำละอองกับท่อแก้วหลัก

หมายเลข 3 และ 4 คือ ส่วนทางเข้าของแก๊สตัวพา (ไนโตรเจน) ซึ่งทางเข้าแก๊สนี้จะมีทั้งหมดสามทาง จากภาพจะเห็นว่าหมายเลข 3 มีทางเข้าแก๊สที่มีลักษณะเหมือนกันอยู่ 2 ทาง หน้าที่ก็เพื่อที่จะนำละอองทั้งหมดที่เกิดจากการทำละอองของเครื่องทำละออง ผ่านขึ้นไปสู่ท่อหลักที่เป็นทางเดินของแก๊ส ซึ่งเมื่อละอองขึ้นไปสู่ท่อหลักแล้ว จะมีทางเข้าแก๊สหมายเลข 4 ที่เป็นตัวป้อนแก๊สเพื่อที่จะพาละอองผ่านไป ตามทางเดินสู่ปลายทางของระบบ ที่สำคัญต้องวางตำแหน่งของทางเข้าแก๊สทั้งสามนี้ให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้ไปรบกวนขั้นตอนของการทำละอองและเพื่อให้การลำเลียงหยดของเหลวไปในทิศทางที่ถูกต้อง สังเกตได้จากทางเข้าแก๊สหมายเลข 4 ที่เอียงทำมุมประมาณ 25 องศา กับแนวนอน เพื่อป้องกันละอองที่จะพุ่งขึ้นมาชนกันผนังท่อ (ดูภาคผนวก ก)

หมายเลข 5 คือ ส่วนที่ต่อเข้ากับท่อแก้วหลัก ซึ่งส่วนนี้เป็นการต่อกันระหว่างแก้วกับแก้ว จะทำโดยการหลอมส่วนข้อต่อแก้ว (Glass Joint) เข้ากับปลายท่อหมายเลข 5 และบริเวณปลายของท่อหลัก เพื่อที่จะสามารถนำมาเชื่อมต่อกันได้ ส่วนความแน่นหนาของการเชื่อมต่อเข้ากับท่อหลักนี้จะใช้ตัวยึดจับแก้ว ที่ติดอยู่ที่ชุดโต๊ะวางอุปกรณ์เป็นตัวเพิ่มความแข็งแรง เพื่อป้องกันการรั่วไหลในการเดินเครื่องที่สภาวะความดันสูง

ในส่วนเชื่อมต่อระหว่างตัวทำละอองกับท่อแก้วหลักนี้มีเงื่อนไขในการออกแบบ ก็คือ ต้องการให้ละอองที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กที่สุด และให้เกิดการรวมตัวกันของละอองนั้นน้อยที่สุด ดังนั้นนอกจากประสิทธิภาพของเครื่องทำละอองแล้ว ในการออกแบบจึงควรที่จะมีส่วนที่ยื่นเข้าไปภายในอุปกรณ์ชิ้นนี้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันการชนกันของละออง โดยถ้ามีความจำเป็นต้องมีส่วนที่ยื่นเข้าไปภายในตัวอุปกรณ์ชิ้นนี้ จึงพยายามทำให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ (ดูภาคผนวก ก)



**ภาพที่ 23** ท่อแก้วส่วนเชื่อมต่อระหว่างตัวทำละอองกับทางเดินแก๊สหลัก

2.5 ชุดวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow meter) ผลิตโดยบริษัท Cole-Parmer รุ่น CZ-03266-36 ขนาด 65 มิลลิเมตร สามารถปรับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนได้ในช่วง 0 - 23 ลิตรต่อนาที จำนวน 2 ตัว

2.6 เหมปทำความร้อน ขนาด 30 x 1000 มิลลิเมตร ทำความร้อนได้ไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส นำมาใช้เป็นส่วนทำความร้อนในช่วงแรกที่มีอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature) โดยช่วงในการทำความร้อนยาวประมาณ 30 มิลลิเมตร

2.7 ตู้ควบคุมอุณหภูมิแบบปรับค่าได้ (Controller broad) จะใช้ในการเปิดปิดและปรับอุณหภูมิในส่วนของเหมปทำความร้อน โดยภายในตู้ควบคุมจะประกอบด้วยตัวควบคุมและแสดงอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Digital Temperature Controller) เครื่องถ่ายทอดกระแสไฟฟ้า (Relay) สวิตช์เปิดปิด สัญลัษณ์ไฟกระพริบเพื่อบอกในขณะที่เครื่องเริ่มทำงานและหัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ต่อออกมาเพื่อวัดอุณหภูมิโดยจะนำไปทำการเทียบไว้ระหว่างเหมปทำความร้อนกับท่อแก้ว

2.8 เตาเผาแบบท่อ ผลิตโดยบริษัท Vecstar Ltd รุ่น VCTF3 อุณหภูมิสูงสุดในการทำงาน 1150 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 38 มิลลิเมตร ยาว 400 มิลลิเมตร



ภาพที่ 24 ชุดวัดอัตราการไหลของแก๊ส



ภาพที่ 25 ตัวทำความร้อนแบบเทป



ภาพที่ 26 ตู้ควบคุมอุณหภูมิแบบปรับค่าได้



ภาพที่ 27 เตาเผาแบบท่อ

2.9 ส่วนการหล่อเย็น (Cooling) ทำจากแก้วไฟเรซัลลักษณะเป็นรูปตัวยู โดยรูปตัวยูนี้จะต้องมีการออกแบบขนาดของความยาวและความกว้าง ซึ่งขนาดจะถูกกำหนดด้วยถึงที่นำมาบรรจุน้ำหล่อเย็น (แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต้องไม่เล็กเกินไปเพื่อป้องกันการชนกันของอนุภาค ซึ่งคูได้รายละเอียดจากภาคผนวก ก)

2.10 ชุดกรองแบบเยื่อแผ่น (Membrane-Filtration) แผ่นกรองทำจากเทฟลอน (PTFE Membrane) มีรูขนาด 0.2 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ใส่อยู่ในตัวยึดจับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร โดยมีข้อต่อทางเข้าออกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว ช่วงอุณหภูมิสูงสุดในการทำงานที่ 85 องศาเซลเซียส ความดันไม่เกิน 2.8 บรรยากาศ

2.11 ชุดโต๊ะวางอุปกรณ์ เป็นส่วนที่จะต้องรองรับส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่อง โดยการออกแบบจะต้องรู้ถึงข้อมูลและลักษณะของเครื่องมือและอุปกรณ์ทั้งหมดที่จะนำมาใช้ นอกจากนั้นชุดโต๊ะวางอุปกรณ์นี้ยังมีส่วนสำคัญที่จะช่วยให้การประกอบชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องเข้าด้วยกันเกิดความแข็งแรงและมั่นคงอีกด้วย ในการทดลองนี้ทำโดยใช้เหล็กฉากกว้างประมาณ 4 เซนติเมตรหนา 2 มิลลิเมตร มาประกอบให้ได้เค้าโครงที่ต้องการ และใช้ไม้ที่ติดฟอรัมมาวางเป็นชั้นสำหรับรองรับอุปกรณ์ (ดูรายละเอียดจากภาคผนวก ก)



ภาพที่ 28 ท่อแก้วส่วนการหล่อเย็น



ภาพที่ 29 ชุดกรองแบบเชื่อมต่อ



ภาพที่ 30 ชุดโต๊ะวางอุปกรณ์

## การผลิตผงไหม

### 1. การเตรียมสารละลายไหม

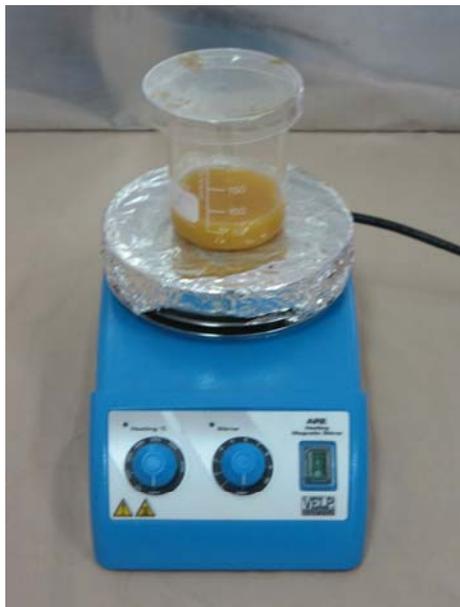
ทำโดยการนำไหม (เส้นไหมพันธุ์พื้นเมือง บริษัทจุลไหมไทย จำกัด) ที่ยังไม่ผ่านการลอก กาว มาละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2, 1, 0.5 และ 0.25 โมลต่อลิตร กวนและให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิ 50 และ 75 องศาเซลเซียส แล้ว ทำการหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักไหมที่ละลายได้ต่อปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)



ภาพที่ 31 ไหมที่ยังไม่ผ่านการลอกกาว



ภาพที่ 32 ไหมที่ตัดเพื่อนำไปทำละลาย



**ภาพที่ 33** กวนและให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนแบบแท่งแม่เหล็ก

## **2. การเตรียมผงไหม**

นำสารละลายไหมที่ได้มาผลิตเป็นผงไหม โดยทำการแปร ความเข้มข้นของสารละลายไหม (0.03, 0.04, 0.05 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักต่อปริมาตร), อัตราการไหลของแก๊ส (3, 6, 14, 20 ลิตร ต่อนาที) และอุณหภูมิในการทำแห้งในส่วนแรกคงที่ที่ 80 องศาเซลเซียส ส่วนที่สอง แปรค่าอยู่ในช่วง 150-175 องศาเซลเซียส โดยผงไหมที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์รูปร่างด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) และวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยโปรแกรม Image Analyzer (Version 3)

## ผลและการวิจารณ์

### 1. ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องสเปรย์ไฟโรลชีส

ทดสอบการทำงานของเครื่องสเปรย์ไฟโรลชีสที่สร้างเสร็จแล้ว (ภาพที่ 34) โดยวัดประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 34 เครื่องสเปรย์ไฟโรลชีสที่จัดสร้างขึ้น

1.1 ผลการทำละอองและการพาละออง ระบบการทำละอองทำงานได้ดี ด้วยจังหวะการทำละอองที่เหมาะสม ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ในส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างหัวตัวทำละอองกับท่อหลัก เครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิค และปั๊มแบบความดันต่ำ โดยปั๊มความดันต่ำนี้เป็นปัจจัยหลักสำคัญที่จะควบคุมจังหวะและความต่อเนื่องของการทำละออง ด้วยการปรับอัตราการไหลที่เหมาะสม ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ที่ 0.8 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนการพาละอองไปตามท่อนั้นยังมีปัญหาจากการควบแน่นกลับลงมาของละออง จึงได้แก้ไขโดยการลดความสูงของท่อแก้วที่เชื่อมต่อระหว่างหัวตัวทำละอองกับท่อแก้วหลักลงจาก 20 เซนติเมตร เหลือเพียง 15 เซนติเมตร เพื่อให้แก๊สพาละอองที่เกิดขึ้นไปได้มากที่สุด

1.2 ผลการทำอุณหภูมิ ซึ่งการทำอุณหภูมิตั้งแรก (Low Temperature) ด้วยตัวทำความร้อนแบบเทปที่มีผู้ควบคุมนั้นปรากฏว่า สามารถปรับตั้งอุณหภูมิไปที่ 80 องศาเซลเซียส ได้อย่างรวดเร็ว และคงที่ที่อุณหภูมินี้โดยที่กระแสไฟฟ้าไม่ตก ส่วนการทำความร้อนในช่วงที่สอง (High Temperature) ด้วยเตาเผาแบบท่อพบว่าการทำอุณหภูมิตั้งที่จุดที่ต้องการ (150-175 °C) นั้น ยังต้องอาศัยความชำนาญในการปรับตั้งเนื่องจากเตาเผาได้ออกแบบมาเพื่อการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูงมาก ดังนั้นจึงควรระวังมิให้อุณหภูมิเกินจากที่ต้องการ

1.3 ผลการหล่อเย็นและการกรองอนุภาค จากการทดลองพบว่า การหล่อเย็นสามารถลดอุณหภูมิของแก๊สลงเหลือที่ประมาณ 35-40 องศาเซลเซียส โดยเมื่อทำการสังเกตแผ่นกรอง พบว่าสามารถจับอนุภาคได้โดยไม่ทำให้เกิดการเสียหายของแผ่นกรอง แต่การใช้ชุดกรองนี้ยังมีข้อเสียตรงที่ข้อต่อของท่อเข้าออกแก๊สมีขนาดเล็กมากจึงทำให้เกิดการสูญเสียแรงดัน (Pressure Drop) เป็นสาเหตุทำให้การจับอนุภาคนั้นเกิดได้ในขอบเขตที่จำกัด และนอกจากนั้นอนุภาคที่ติดอยู่บนกระดาษกรองยังเกิดการบีบตัว ทำให้นำไปวิเคราะห์ทั้งรูปร่างและขนาดได้ยาก ดังนั้นในอนาคตจึงมีแนวโน้มที่จะนำเครื่องจับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตมาใช้แทน

1.4 ผลการทดสอบข้อต่อตามจุดต่างๆ ผลที่เกิดขึ้นตามข้อต่อของระบบนั้นพบว่า การเชื่อมต่อกันของข้อต่อที่เป็นแก้วกับแก้ว และส่วนที่เป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างหัวตัวทำละอองกับแก้ว สามารถทนอัตราการไหลของแก๊สได้ถึง 20 ลิตรต่อนาที ซึ่งเมื่อใช้อัตราไหลที่สูงกว่านั้นก็จะทำให้เกิดการรั่วไหลขึ้น แต่ถ้าในอนาคตมีการนำเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่จัดสร้างไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่จำเป็นต้องใช้อัตราการไหลที่มากกว่า 20 ลิตรต่อนาที ก็สามารถทำได้ โดยการใช้เทปลอนพันที่บริเวณข้อต่อหรือใช้ตัวยึดจับสำหรับข้อต่อแก้ว โดยเฉพาะเพิ่มความแน่นหนา

## 2. ผลการผลิตผงใหม่

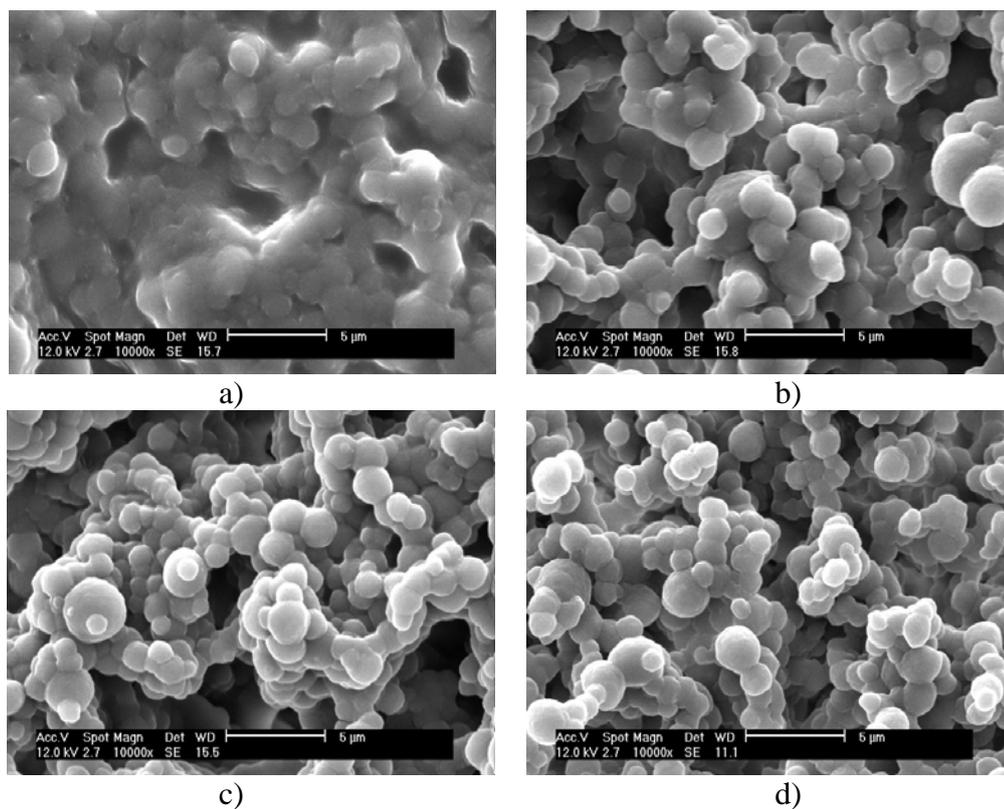
2.1 ผลการเตรียมสารละลายใหม่ ซึ่งการละลายเส้นไหมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวทำละลายจะสามารถละลายเส้นไหมได้มากขึ้น ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นก็ได้ผลในทำนองเดียวกัน โดยละลายได้สูงถึง 0.24 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ที่ 75 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเนื่องจากในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการนำผงไหมที่ได้ไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอาง จึงได้เลือกการใช้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำที่สุด (ตัวอย่างที่ 8) เพื่อหลีกเลี่ยงการตกค้างของตัวทำละลายในผงไหมที่ได้ โดยก่อนนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในขั้นต่อไปต้องทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง

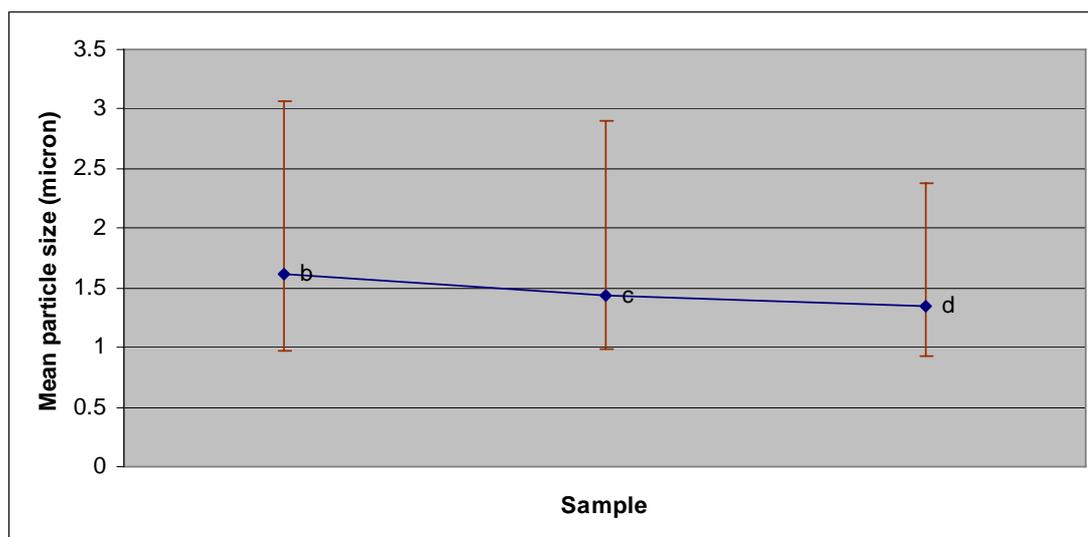
**ตารางที่ 3** ความสามารถในการละลายเส้นไหมในโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างที่	NaOH (mol/l)	อุณหภูมิ (°C)	การละลาย (% w/v)
1	2	50	0.15
2	2	75	0.24
3	1	50	0.10
4	1	75	0.18
5	0.5	50	0.07
6	0.5	75	0.12
7	0.25	50	0.03
8	0.25	75	0.08

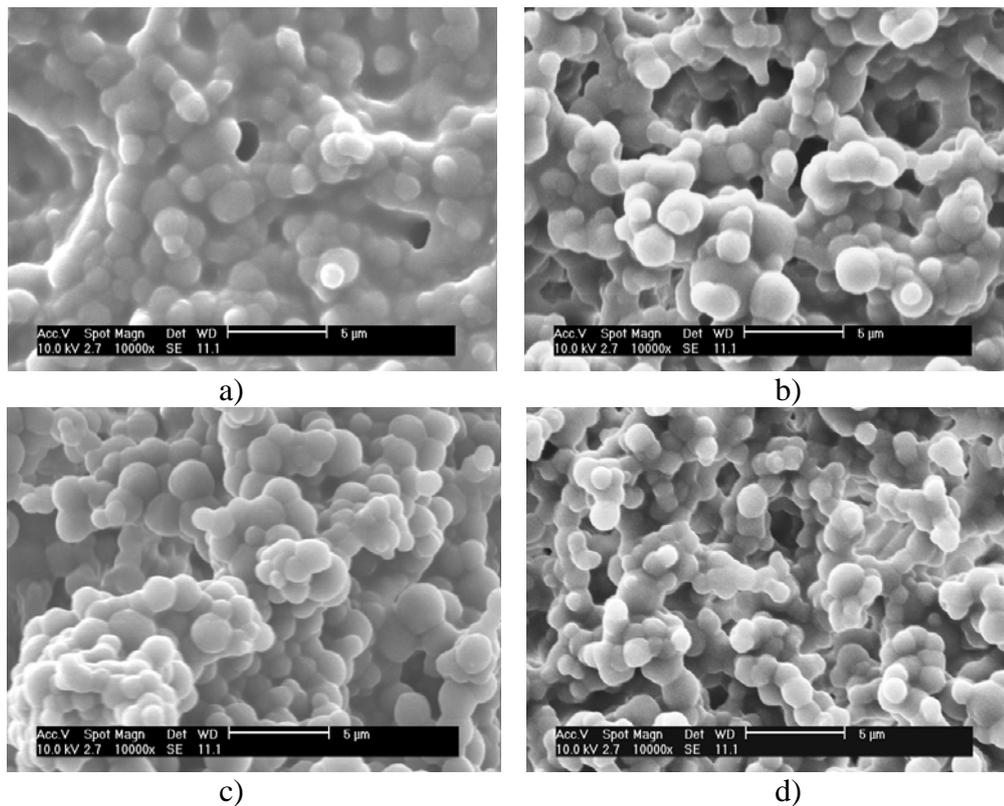
2.2 ผลการผลิตไหม จากการวิเคราะห์รูปร่างและขนาดของผงไหมที่ได้จากการผลิตโดยใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 80/150 องศาเซลเซียส (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ 3, 6, 14 และ 20 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 35 ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหลที่ 3 ลิตรต่อนาที อนุภาคที่ได้มีการหลอมติดกันเป็นกลุ่มก้อน อาจเป็นเพราะการไหลที่ช้าทำให้อนุภาคอยู่ในส่วนการทำแห้งนานเกินไปจึงเกิดการหลอมติดกัน ซึ่งเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 6 ลิตรต่อนาที อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้นแต่ยังมีบางจุดที่หลอมติดกันอยู่ ส่วนที่อัตราการไหล 14 และ 20 ลิตรต่อนาที อนุภาคมีความสมบูรณ์ของทรงกลมมากขึ้น โดยช่วงขนาดอนุภาคของแต่ละอัตราการไหลจากภาพที่ 36 อยู่ที่ 0.98-3.06, 0.99-2.89 และ 0.92-2.38 ไมครอน ตามลำดับ และค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 1.62, 1.44, 1.34 ไมครอน ตามลำดับ (ที่ 3 ลิตรต่อนาที ไม่สามารถวัดขนาดอนุภาคได้เนื่องจากอนุภาคหลอมติดกัน) โดยจะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สขึ้นขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะมีค่าลดลง ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานว่าอัตราการไหลมีผลต่อกระจายตัวของขนาดอนุภาค



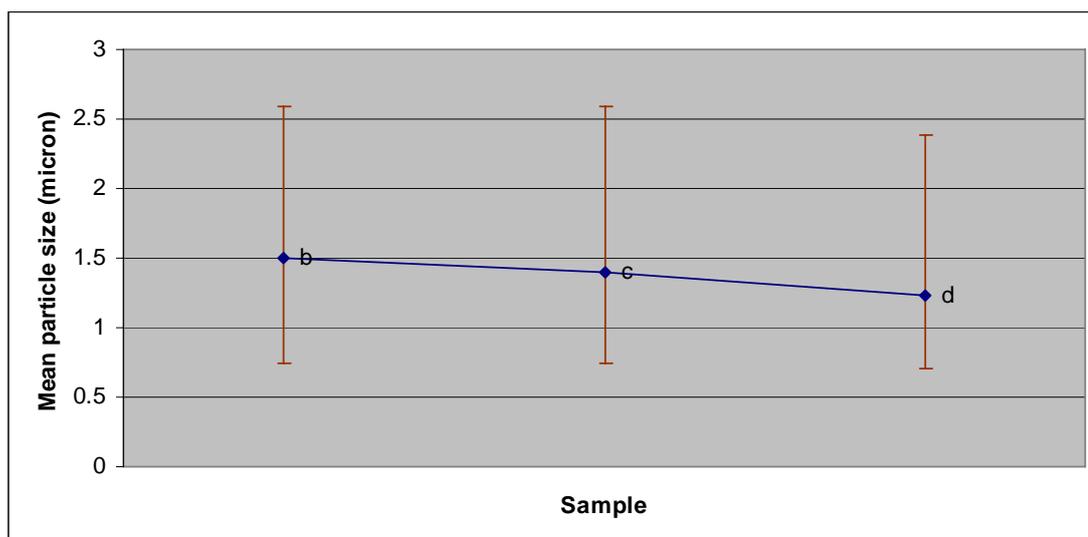
**ภาพที่ 35** ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min



**ภาพที่ 36** กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหมที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min



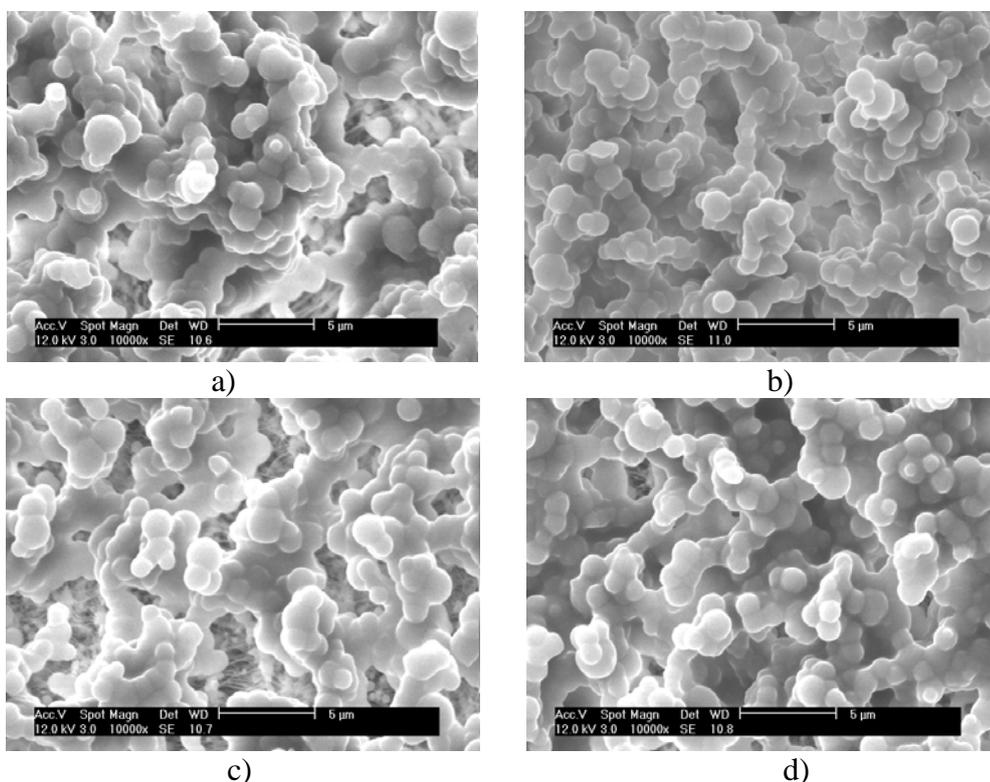
**ภาพที่ 37** ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min



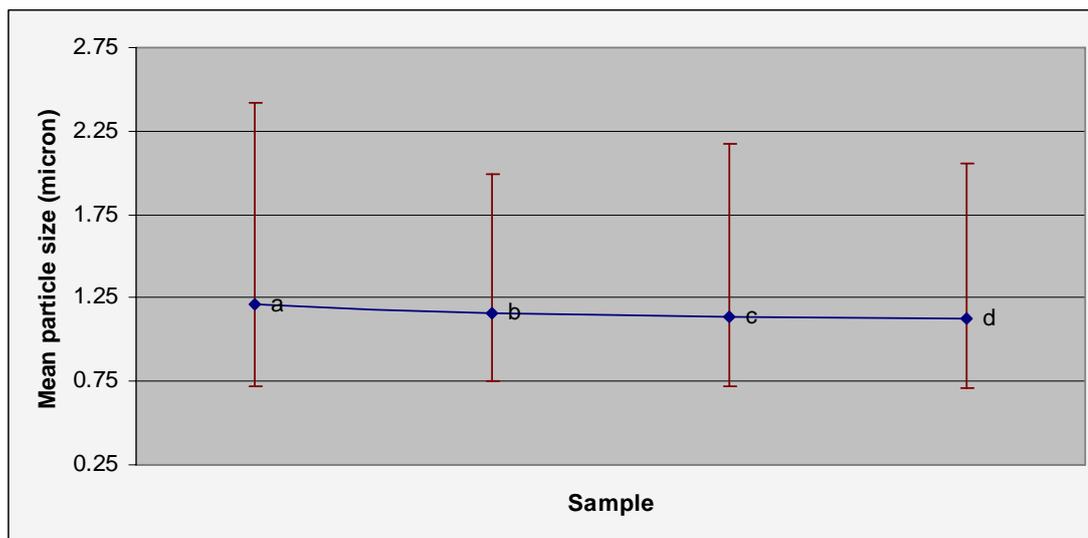
**ภาพที่ 38** กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหม ที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min

จากผลการทดลองในภาพที่ 37 เมื่อทำการลดความเข้มข้นของสารละลายไหม้ตั้งต้นที่ 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 80/150 องศาเซลเซียส (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) พบว่า ในแต่ละอัตราการไหลได้ให้ผลทำนองเดียวกันกับผลการทดลองแรก คือ มีการหลอมติดกันของอนุภาคในอัตราการไหลของแก๊สที่ต่ำสุด และเมื่อเพิ่มอัตราขึ้นอนุภาคก็จะมีความสมบูรณ์มากขึ้น โดยจากภาพที่ 38 ได้ช่วงขนาดอนุภาคที่ 6, 14, 20 ลิตรต่อนาที เป็น 0.73-2.59, 0.73-2.59 และ 0.71-2.38 ไมครอน และขนาดของอนุภาคเฉลี่ยที่ 1.50, 1.40, 1.23 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดีขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส ดังผลในการทดลองแรก และตรงกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้

ส่วนในการทดลองต่อมาใช้ความเข้มข้นของสารละลายไหม้ตั้งต้นที่ 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่าเดิมแต่เพิ่มอุณหภูมิเป็น 80/175 องศาเซลเซียส (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) จากภาพที่ 39 พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างจากการทดลองที่ผ่านมา คือ อนุภาคที่ได้เป็นทรงกลมที่สมบูรณ์มากขึ้น สังเกตได้ชัดเจนจากการผลิตด้วยอัตราการไหลของแก๊สที่ 3 ลิตรต่อนาที โดยจากการทดลองสองครั้งที่ผ่านมาอนุภาคมีการหลอมติดกันมาก แต่จากการทดลองนี้จะเห็นว่าการหลอมติดกันนั้นเกิดขึ้นน้อยมาก



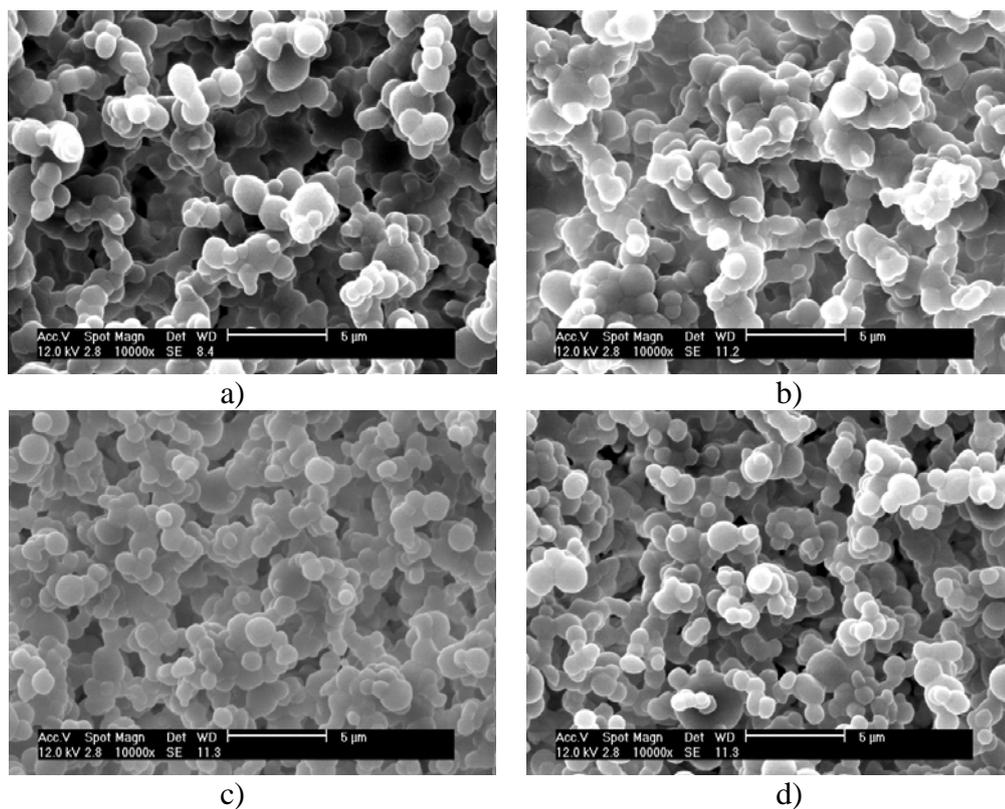
**ภาพที่ 39** ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหม้ใช้สารละลายไหม้เข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min



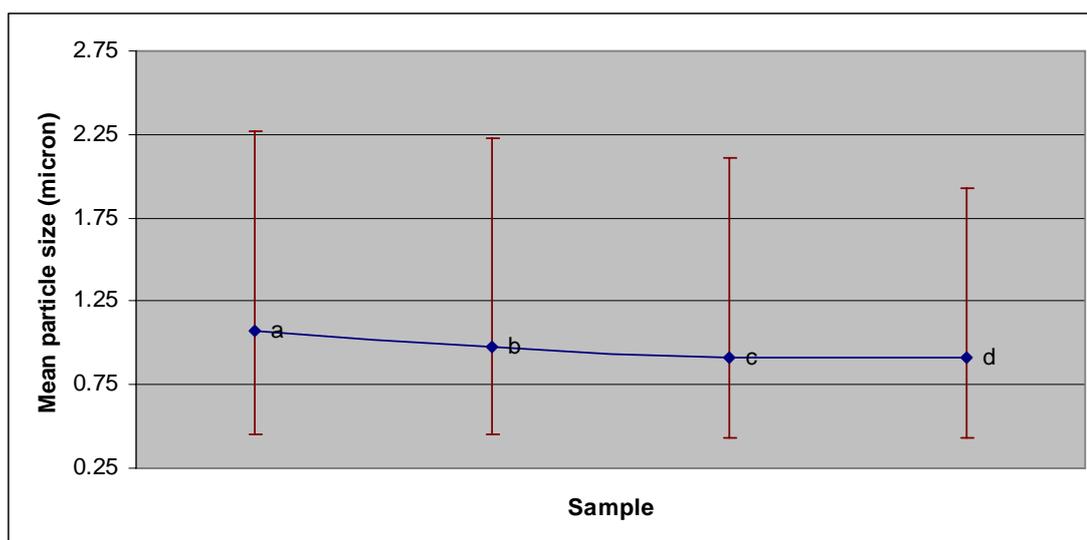
**ภาพที่ 40** กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงใหม่ ที่ใช้สารละลายใหม่เข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min

และเมื่อทำการวัดขนาดของอนุภาคที่อัตราการไหล 3, 6, 14, 20 ลิตรต่อนาที ได้ช่วงขนาดอนุภาคตามลำดับดังนี้ 0.72-2.41, 0.76-1.99, 0.72-2.17 และ 0.71-2.06 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 1.21, 1.15, 1.13, และ 1.13 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งจากภาพที่ 40 แสดงแนวโน้มการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เริ่มดีขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นจาก a ไปจนถึง c แต่จาก c ถึง d จะเห็นว่ากราฟเริ่มคงที่อธิบายได้จากที่อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) มีความเหมาะสมที่จะใช้ทำแห้งอนุภาคผงใหม่มากกว่าที่อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) จึงเกิดเป็นอนุภาคผงใหม่ที่แห้ง ซึ่งทำให้การหลอมติดกันเกิดขึ้นน้อยมากเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใกล้กัน ดังนั้นการใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่เหมาะสมจึงไม่จำเป็นต้องใช้อัตราการไหลของแก๊สที่สูงมากก็สามารถผลิตผงใหม่ที่สมบูรณ์ได้ และเป็นสาเหตุให้ที่อัตราการไหลที่ 3 ลิตรต่อนาที อนุภาคมีการหลอมติดกันน้อยมาก

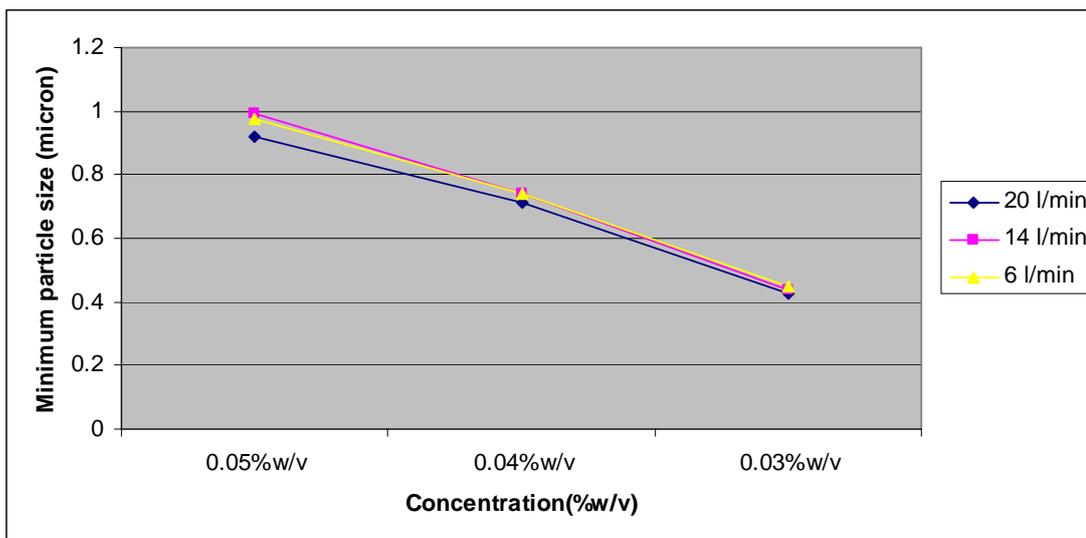
ส่วนการทดลองสุดท้าย(ภาพที่ 41) ลดความเข้มข้นของสารละลายใหม่ตั้งต้นลงที่ 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และอุณหภูมิเป็น 80/175 องศาเซลเซียส (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) โดยเมื่อทำการวัดขนาดของอนุภาคจากภาพที่ 42 ที่อัตราการไหล 3, 6, 14, 20 ลิตรต่อนาที ได้ช่วงขนาดอนุภาคตามลำดับดังนี้ 0.45-2.27, 0.45-2.23, 0.44-2.11 และ 0.43-1.93 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 1.07, 0.97, 0.92, และ 0.91 ไมครอน ตามลำดับ โดยจากผลที่ได้จะเห็นว่าแนวโน้มการกระจายตัวของขนาดอนุภาคคล้ายคลึงกับการทดลองที่สาม แต่จะแตกต่างกันตรงขนาดของอนุภาคที่เล็กลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายใหม่ตั้งต้นที่ลดลง



**ภาพที่ 41** ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min



**ภาพที่ 42** กราฟแสดงช่วงขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหม ที่ใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min, b) 6 l/min, c) 14 l/min, d) 20 l/min



**ภาพที่ 43** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้นที่มีผลกับขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด (Minimum Particle Size) ที่อัตราการไหลของแก๊สที่ 6, 14, 20 l/min

โดยอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้นที่มีผลต่อการลดลงของขนาดอนุภาคผงไหมที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้จากภาพที่ 43 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อทำการลดความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้นลง ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด (Minimum Particle Size) ที่ได้จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ต่างจากอัตราการไหลของแก๊สซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคน้อยมาก สังเกตได้จากเส้นกราฟของขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราการไหล ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้นจึงมีผลต่อการลดลงของขนาดอนุภาคมากที่สุด ส่วนอัตราการไหลของแก๊สจะช่วยในเรื่องของการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เช่นเดียวกันกับอุณหภูมิในการทำแห้ง ซึ่งถ้าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมก็จะช่วยให้เกิดอนุภาคที่สมบูรณ์ และนำไปสู่การกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ดีขึ้น (จากภาพที่ 43 เนื่องจากค่าของขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดที่ได้ที่ความเข้มข้น 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 80/150 °C และที่ความเข้มข้น 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 80/175 °C มีความใกล้เคียงกันจึงเลือกมาเพียงค่าเดียวคือที่อุณหภูมิ 80/150 °C)

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. เครื่องสเปรย์ไฟโรลิสซ์ที่จัดสร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการผลิตผงไหมได้จริง แต่เพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและการประยุกต์ใช้ในทดลองที่นอกเหนือจากงานวิจัยนี้ ควรมีการปรับปรุงในส่วนของระบบการจับอนุภาคและความหนาแน่นของข้อต่อแก้วในจุดต่างๆ

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถที่จะทำละลายได้ทั้งไหมที่ลอกขาวและยังไม่ลอกขาว กล่าวคือ สามารถทำละลายได้ทั้งเซรีซินและไฟโบรอิน โดยความสามารถในการละลายจะมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำละลายให้สูงกว่าที่อุณหภูมิห้อง

3. ความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคมากที่สุด โดยอัตราการไหลของแก๊สและอุณหภูมิของการทำแห้งจะช่วยในเรื่องการกระจายตัวของขนาดอนุภาค โดยในการงานวิจัยนี้สามารถผลิตผงไหมรูปร่างทรงกลมที่สมบูรณ์ที่มีช่วงขนาด 0.43-1.93 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.91 ไมครอน ที่ความเข้มข้นของสารละลายไหมตั้งต้น 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สที่ 20 ลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในการผลิต 80/175 องศาเซลเซียส (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง)

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรเปลี่ยนเทคนิคที่ใช้ในการจับอนุภาคที่ได้จากการใช้ชุดกรองแบบเยื่อแผ่น (Membrane Filtration) เป็นการใช้ตัวจับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพราะจะช่วยลดการสูญเสียความดัน (Pressure Drop) ของระบบลง และลดขั้นตอนการผลิตลง คือ ส่วนของการหล่อเย็น เนื่องการจับอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตสามารถทำงานได้ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง นอกจากนั้นการนำตัวอย่างผงไหมที่ได้ไปวิเคราะห์ก็สามารถทำได้ง่ายกว่าการใช้ชุดกรองแบบเยื่อแผ่นที่ต้องนำไปวิเคราะห์ทั้งแผ่นกรอง

2. ในการนำเครื่องสเปรย์ไฟโรลิสซ์ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นที่จำเป็นต้องใช้แรงดันแก๊สที่สูงมาก (มากกว่า 20 ลิตรต่อนาที) ควรเพิ่มตัวยึดจับข้อต่อแก้วโดยเฉพาะ เพื่อเพิ่มความหนาแน่น

3. ในการปรับตั้งอุณหภูมิที่ช่วงที่สอง (เตาเผาแบบท่อ) ควรทำก่อนที่จะประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่อง เพราะเนื่องจากถ้าเกิดความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิที่ต้องการ เช่น สูงกว่าที่ใช้ในงานวิจัย การลดอุณหภูมิจะทำได้ยากและใช้เวลานานมากถ้าทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดแล้ว เพราะเมื่อทำการประกอบเครื่องแล้วจะทำให้การระบายความร้อนภายในท่อของเตาเผาเกิดขึ้น ได้ยาก

4. ในการนำเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ไปใช้ในงานวิจัยอื่นควรคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ ถ้าสูงเกินไป อาจทำให้ท่อแก้วที่ใช้เกิดการหลอมเหลว

5. ควรทำการบำรุงรักษาและทำความสะอาดเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์อย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะส่วนของเครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิค ที่อาจเกิดการอุดตันของสารละลายที่นำมาทำละออง และเมื่อทำการทดลองเสร็จทุกครั้งควรถอดส่วนที่เป็นท่อแก้วออกเพื่อป้องกันการแตกหัก

6. ในขณะที่ทำการปฏิบัติงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่จัดสร้างขึ้นนี้ ควรระมัดระวังอันตรายที่อาจเกิดขึ้น เพราะในขั้นตอนการนำท่อแก้วมาประกอบก่อนการใช้งานนั้นอาจเกิดการกระทบกัน ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการแตกหักและอุบัติเหตุที่ตามมา ดังนั้นผู้ทดลองจึงควรสวมใส่อุปกรณ์ป้องกัน เช่น เสื้อคลุมหรือชุดที่รัดกุม, ถุงมือ, และรองเท้าผ้าใบ เป็นต้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

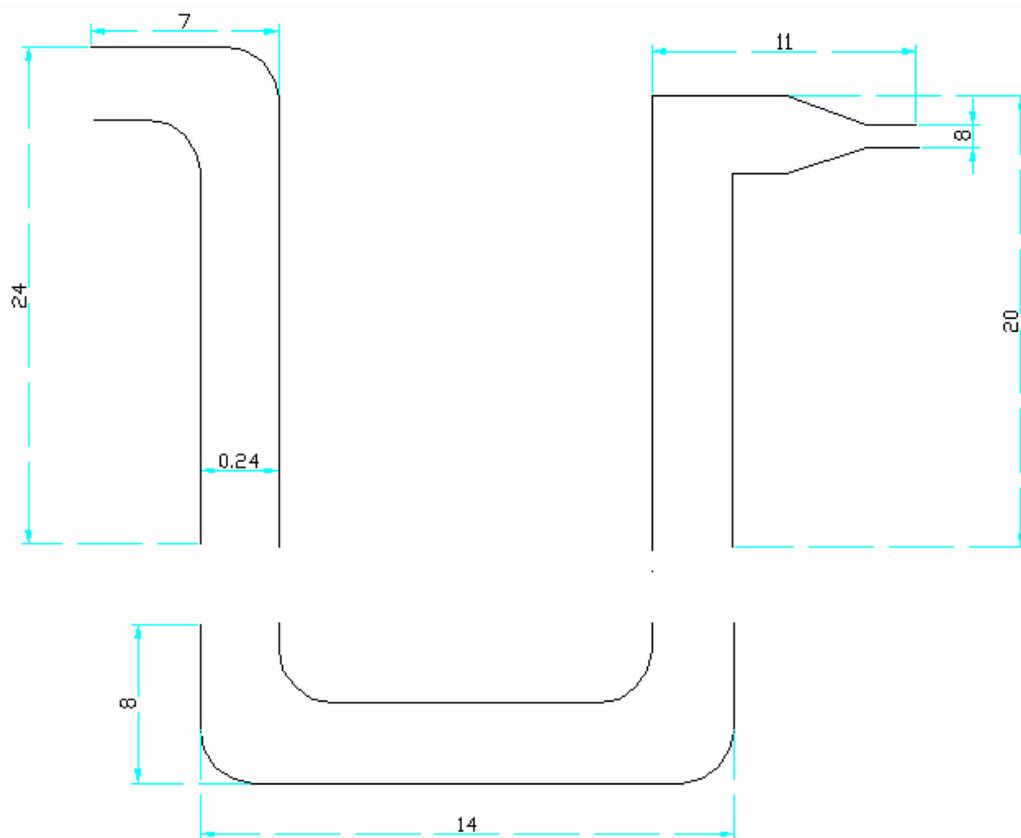
- พรรณนีย์ วิชชาชู. 2547. **ไหมกับงานวิจัยและงานอนุรักษ์**. ศูนย์สารสนเทศ, กรมวิชาการเกษตร.
- โมโตอิ มินากาวะ. 2530. **วิทยาการไหม เล่ม 1. คณะกรรมการส่งเสริมไหมไทย, กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม.**
- ไพศาล คงคาอุยฉาย. 2542. **กระบวนการสังเคราะห์เซรามิกชั้นสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิวัฒน์ ลมูลกักตร์. 2548. **การผลิตสารละลายโปรตีนจากเศษไหมโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในน้ำกึ่งวิกฤติ สำหรับการเตรียมเซรีซินและไฟโบรอิน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2542. **วิทยาศาสตร์เส้นใย**. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- ศิริพร เวชเศรษฐนนท์. 2534. **การสกัดโปรตีนจากไหม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Chen, C.Y., T.K.Tseng, S.C. Tsai, C.K.Lin and H.M. Lin. 2006. Effect of precursor characteristic on zirconia and ceria particle morphology in spray pyrolysis. **Ceramic International**
- Gurmen, S., S. Stopic and B. Friedich. 2006. Synthesis of nanosized spherical cobalt powder by ultrasonic spray pyrolysis. **Materials Research Bulletin** 41 (2006): 1882-1890.

- Hsiao, K.C., S.C. Liao and Y.J. Chen. 2006. Synthesis, characterization and photocatalytic property of nanostructured Al-doped ZnO powders by spray pyrolysis. **Materials Science and Engineering A**
- Ju, S.H., D.Y. Kim, H.Y. Koo, S.K. Hong, E.B. Jo and Y.C. Kang. 2006. The characteristic of nano-sized manganese oxide particles prepared by spray pyrolysis. **Journal of Alloys and Compounds** 425 (2006): 411-415.
- Kim, K.D., K.Y. Choi and J.Y. Yang. 2005. Formation of spherical hollow silica particles from sodium silicate solution by ultrasonic spray pyrolysis method. **Physicochem. Eng. Aspects** 254 (2005) 193-198.
- Kim, K.N. and S.G. Kim. 2004. Nickel particles preparation from nickel nitrate with and without urea by spray pyrolysis. **Powder Technology** 145 (2004): 155-162.
- Messing, G.L., S.C. Zhang and G.V. Jayanthi. 1993. Ceramic Powder Synthesis by Spray Pyrolysis. **J.Am. Ceram Soc.** 76 (1993): 2707-2726.
- Reuge, N. and B. Caussat. 2006. A dimensionless study of the evaporation and drying stages in spray pyrolysis. **Computer and Chemical Engineering**
- Validzic, I.Lj., V. Jokanovic, D.P. Uskokovic and J.M. Nedeljkovic. 2007. Formation of silver iodide particle from thermodynamically stable cluster using ultrasonic spray pyrolysis. **Journal of the European Ceramic Society** 27 (2007): 927-929.

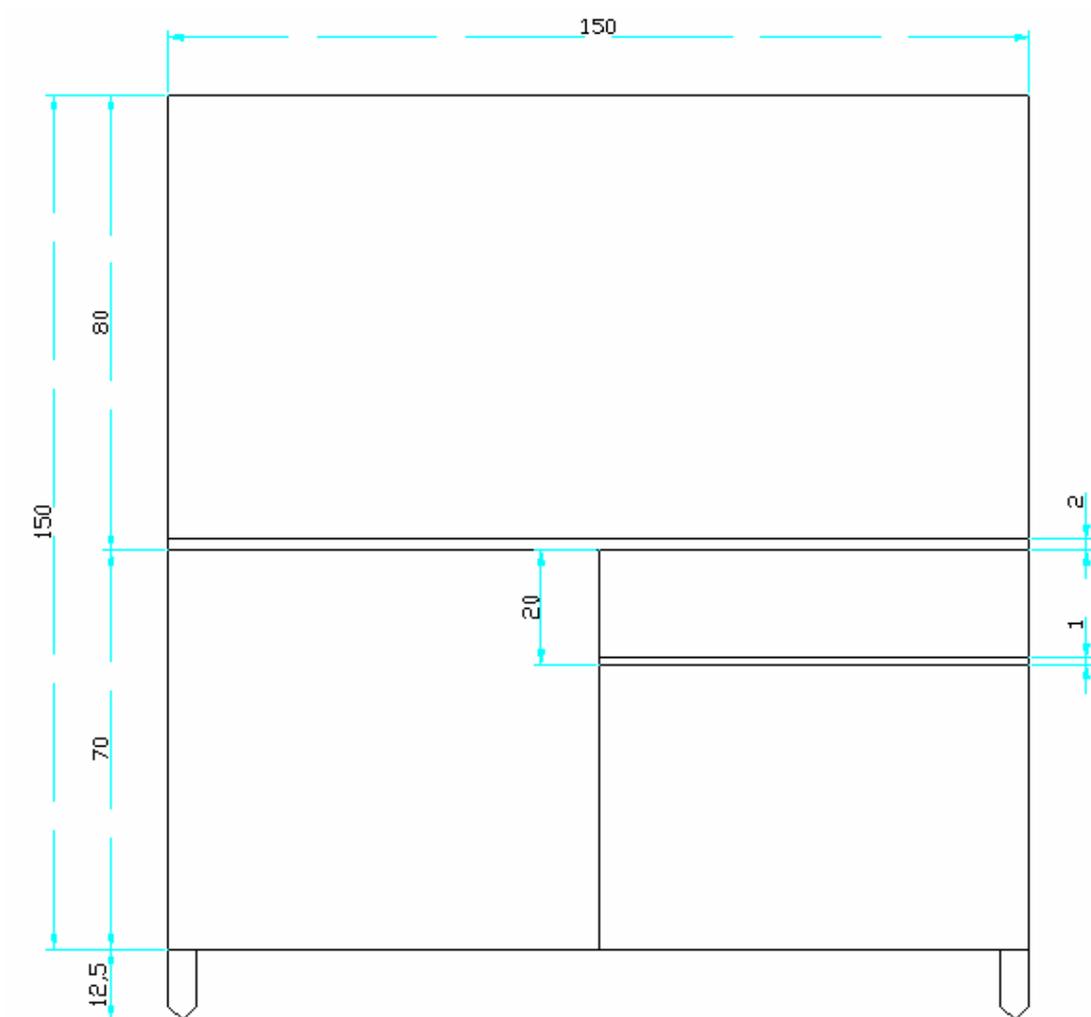
**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก  
การออกแบบ

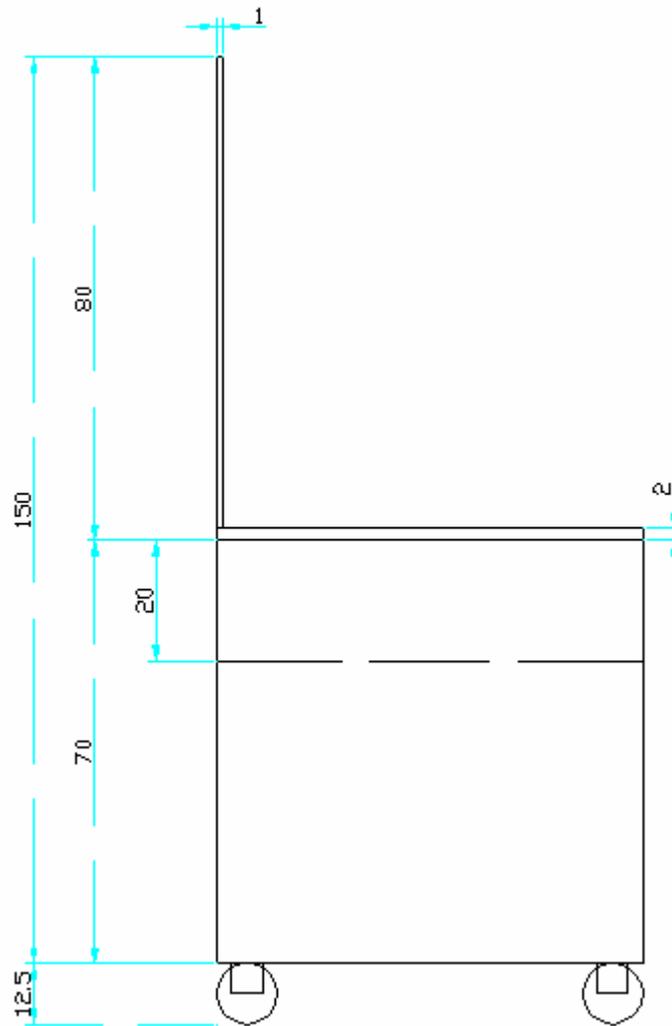




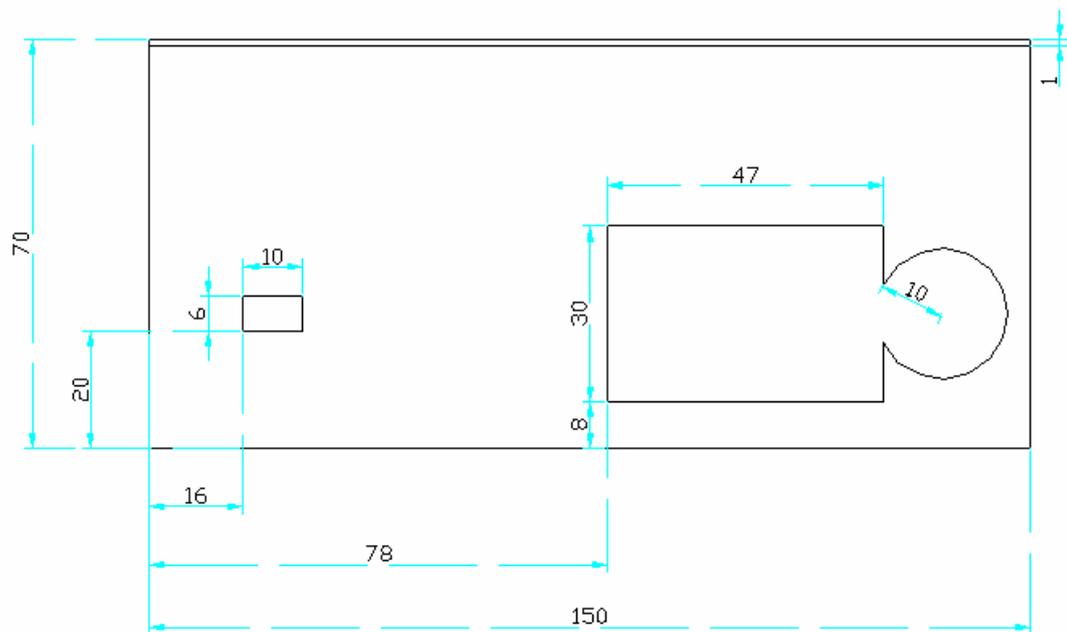
ภาพผนวกที่ ก2 แบบแสดงขนาดส่วนของการหล่อเย็น (cm)



ภาพผนวกที่ ก3 แบบแสดงขนาดของชุดโต๊ะวางอุปกรณ์ (ด้านหน้า) (cm)



ภาพผนวกที่ ๓4 แบบแสดงขนาดของชุดโต๊ะวางอุปกรณ์ (ด้านซ้าย) (cm)



ภาพผนวกที่ ก5 แบบแสดงขนาดของชุดโต๊ะวางอุปกรณ์ (ด้านบน) (cm)

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการทดลอง

**ตารางผนวกที่ ข1** ความสามารถในการละลายของไหมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิลิตร

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	จำนวนไหมที่ละลาย ได้(กรัม)
1	2	50	15
2	2	75	24
3	1	50	10
4	1	75	18
5	0.5	50	7
6	0.5	75	12
7	0.25	50	3
8	0.25	75	8

**ตัวอย่างการคำนวณ**

เพื่อเปลี่ยนจำนวนไหมที่ละลายในโซเดียมไฮดรอกไซด์ในหน่วยกรัมให้เป็น เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เช่น ตัวอย่างที่ 8 สามารถละลายไหมได้ 8 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิลิตร จะได้

$$= \frac{8}{100} \quad \%w/v$$

$$= 0.08 \quad \%w/v$$

และเมื่อทำการเปลี่ยนความเข้มข้นโดยการเจือจางด้วยน้ำ เช่น เมื่อนำตัวอย่างที่ 8 มาเจือจางด้วยน้ำ 50 มิลลิลิตร การคำนวณความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปจะเป็นดังนี้

$$= \frac{8}{150} \quad \%w/v$$

$$= 0.05 \quad \%w/v$$

**ตารางผนวกที่ ข2** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.05 %  
w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6 l/min

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D1	2.7319835	D26	2.4100957
D2	1.4288517	D27	1.5398009
D3	1.6580435	D28	1.5940585
D4	1.790449	D29	2.0324361
D5	1.450327	D30	1.264629
D6	3.0643126	D31	1.6151777
D7	1.6392916	D32	1.7426591
D8	1.5756772	D33	1.2113219
D9	1.204431	D34	1.2245021
D10	1.7241379	D35	1.691062
D11	1.5884542	D36	1.6836628
D12	1.2957444	D37	1.5521072
D13	1.3175844	D38	2.6191012
D14	1.2073891	D39	1.4552378
D15	2.7665833	D40	1.5850821
D16	1.8279115	D41	0.98079053
D17	1.6726804	D42	1.0094677
D18	1.2113219	D43	1.5517241
D19	1.1509186	D44	1.0827806
D20	1.1784833	D45	2.0002972
D21	1.5921926	D46	0.9753197
D22	1.2957444	D47	1.0367791
D23	1.6641281	D48	1.8366723
D24	2.4637684	D49	1.1565869
D25	2.3501461	D50	1.276328

Minimum Particle Size	= 0.97532
Maximum Particle Size	= 3.064313
Mean Particle Size	= 1.619565
Standard Deviation	= 0.488466
Sum	= 80.97823

**ตารางผนวกที่ ข3** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.05 %  
w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c) 14  
l/min

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D1	1.552107	D26	1.009468
D2	1.757268	D27	1.366318
D3	1.129541	D28	1.391754
D4	1.172921	D29	1.002375
D5	1.298495	D30	0.99284
D6	1.563937	D31	1.191029
D7	1.767052	D32	1.832459
D8	1.800053	D33	1.204431
D9	1.856953	D34	1.082231
D10	2.041484	D35	1.567354
D11	1.46298	D36	1.2361
D12	1.671258	D37	1.331945
D13	2.236068	D38	1.103987
D14	2.894293	D39	1.033333
D15	1.548656	D40	1.108287
D16	1.467038	D41	1.172921
D17	1.171399	D42	1.156073
D18	2.351158	D43	1.103987
D19	1.655532	D44	1.095879
D20	1.346595	D45	1.042498
D21	2.213621	D46	1.148333
D22	1.341729	D47	1.127433
D23	1.043638	D48	2.268536
D24	1.223045	D49	1.005337
D25	1.664485	D50	1.114172

Minimum Particle Size	= 0.99284
Maximum Particle Size	= 2.894293
Mean Particle Size	= 1.438408
Standard Deviation	= 0.421222
Sum	= 71.92039

**ตารางผนวกที่ ๔** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่เกิดจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.05 % w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d) 20 l/min

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D1	1.6587605	D41	0.92011476
D2	1.0023753	D42	1.3130643
D3	1.1311186	D43	1.0739594
D4	1.3801721	D44	1.4843616
D5	1.1591542	D45	1.4217606
D6	1.2551914	D46	1.1039869
D7	1.6726804	D47	1.2494945
D8	1.6192216	D48	1.8588734
D9	1.7751086	D49	1.1769688
D10	1.2883822	D50	0.98623101
D11	1.4548292	D51	1.2230447
D12	1.0706327	D52	1.4843616
D13	1.0695215	D53	1.3310523
D14	1.0772758	D54	0.92847669
D15	1.023505	D55	1.6221563
D16	1.3319454	D56	1.1565869
D17	1.4536027	D57	1.7313642
D18	1.0023753	D58	1.1724138
D19	1.0023753	D59	0.92783614
D20	1.5895766	D60	1.2943672
D21	1.4831595	D61	1.7730979
D22	0.97348926	D62	1.0577836
D23	1.6151777	D63	1.6468902
D24	1.2998674	D64	1.1384534
D25	2.2519644	D65	1.0487522

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D26	2.1479188	D66	1.1426236
D27	1.9448398	D67	1.4919523
D28	1.2068966	D68	1.1120356
D29	1.2925286	D69	0.98139652
D30	1.5266168	D70	1.2660386
D31	1.5176332	D71	2.3318607
D32	1.1039869	D72	2.3780606
D33	1.1384534	D73	1.2795845
D34	1.1415824	D74	2.2165736
D35	1.2911479	D75	0.98743594
D36	1.0287196	D76	1.2874589
D37	1.4150541	D77	1.2245021
D38	1.2201246	D78	1.0822314
D39	1.1794918	D79	1.0645068
D40	1.0350573	D80	1.6425525

Minimum Particle Size = 0.920115

Maximum Particle Size = 2.378061

Mean Particle Size = 1.343072

Standard Deviation = 0.339626

Sum = 107.4458

**ตารางผนวกที่ ข5** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายไหม้เข้มข้น 0.04 %  
w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6  
l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	2.5908005	D36	1.1104305
D2	1.819762	D37	2.0449759
D3	2.2480008	D38	1.7724272
D4	1.6382032	D39	1.3265782
D5	2.2834253	D40	0.8304548
D6	0.93676398	D41	1.7481092
D7	1.4971237	D42	1.3323917
D8	1.9436166	D43	1.7589587
D9	1.1865276	D44	0.97348926
D10	1.4731041	D45	1.5862069
D11	1.1039869	D46	1.4142136
D12	1.0645068	D47	1.7354799
D13	0.99284	D48	1.907492
D14	1.7582826	D49	0.99284
D15	1.7508279	D50	1.0510173
D16	1.9898673	D51	0.74278135
D17	1.6526561	D52	0.99523239
D18	1.5022773	D53	1.5207639
D19	1.3465948	D54	1.0053365
D20	0.91037095	D55	0.9753197
D21	1.0487522	D56	1.7244827
D22	1.0071091	D57	0.84183142
D23	1.2360999	D58	1.0287196
D24	1.6276447	D59	0.7878386
D25	1.2461594	D60	0.79385272

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D26	1.7894525	D61	2.3534325
D27	1.4342506	D62	2.2413793
D28	0.95374598	D63	2.4490043
D29	1.1729208	D64	1.828887
D30	1.6085385	D65	1.9606716
D31	1.0373523	D66	2.0414842
D32	1.0827806	D67	2.4685898
D33	1.6392916	D68	1.9359543
D34	1.1950154	D69	1.5113522
D35	2.3501461	D70	1.8444247

Minimum Particle Size = 0.742781

Maximum Particle Size = 2.590801

Mean Particle Size = 1.496503

Standard Deviation = 0.478383

Sum = 104.7552

**ตารางผนวกที่ ข6** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.04 %  
w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c)

14 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	2.5908005	D31	1.0373523
D2	1.819762	D32	1.0827806
D3	2.2480008	D33	1.6392916
D4	1.6382032	D34	1.1950154
D5	2.2834253	D35	2.3501461
D6	0.93676398	D36	1.1104305
D7	1.4971237	D37	2.0449759
D8	1.9436166	D38	1.7724272
D9	1.1865276	D39	1.3265782
D10	1.4731041	D40	0.8304548
D11	1.1039869	D41	1.7481092
D12	1.0645068	D42	1.3323917
D13	0.99284	D43	1.7589587
D14	1.7582826	D44	0.97348926
D15	1.7508279	D45	1.5862069
D16	1.9898673	D46	1.4142136
D17	1.6526561	D47	1.7354799
D18	1.5022773	D48	1.907492
D19	1.3465948	D49	0.99284
D20	0.91037095	D50	1.0510173
D21	1.0487522	D51	0.74278135
D22	1.0071091	D52	0.99523239
D23	1.2360999	D53	1.5207639
D24	1.6276447	D54	1.0053365
D25	1.2461594	D55	0.9753197

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D26	1.7894525	D56	1.7244827
D27	1.4342506	D57	0.84183142
D28	0.95374598	D58	1.0287196
D29	1.1729208	D59	0.7878386
D30	1.6085385	D60	0.79385272

Minimum Particle Size = 0.742781

Maximum Particle Size = 2.590801

Mean Particle Size = 1.402

Standard Deviation = 0.435985

Sum = 84.12003

**ตารางผนวกที่ ข7** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04 %  
w/v อุณหภูมิ 80/150 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d)  
20 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	2.257238	D36	1.241379
D2	1.520764	D37	1.176969
D3	1.127433	D38	1.140019
D4	1.407049	D39	1.014754
D5	1.317584	D40	0.980791
D6	0.953746	D41	0.941196
D7	1.110431	D42	1.035057
D8	1.116837	D43	0.724138
D9	1.105601	D44	0.811628
D10	1.224502	D45	0.71088
D11	1.166822	D46	1.241858
D12	1.088804	D47	0.941196
D13	1.036779	D48	1.48916
D14	1.656609	D49	1.37283
D15	1.021179	D50	1.014168
D16	1.014754	D51	1.035057
D17	1.12585	D52	1.171399
D18	1.172921	D53	1.919299
D19	1.819762	D54	0.895224
D20	0.971043	D55	0.853056
D21	0.822542	D56	1.103987
D22	1.113104	D57	1.103987
D23	0.765641	D58	0.862069
D24	1.14626	D59	1.197004
D25	1.069522	D60	1.170384

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D26	1.073959	D61	1.523498
D27	1.034483	D62	2.020701
D28	1.633842	D63	1.38619
D29	1.097506	D64	2.010673
D30	1.527006	D65	1.627645
D31	1.069522	D66	2.381059
D32	1.105601	D67	1.450327
D33	1.138453	D68	1.113104
D34	1.552107	D69	1.298495
D35	0.931673	D70	1.531283

Minimum Particle Size = 0.71088

Maximum Particle Size = 2.381059

Mean Particle Size = 1.225534

Standard Deviation = 0.34139

Sum = 85.7874

**ตารางผนวกที่ ข8** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04 %  
w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3  
l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	2.001783	D36	0.931034
D2	0.9025	D37	1.018264
D3	1.172921	D38	0.796096
D4	1.69071	D39	0.975929
D5	0.965517	D40	1.352322
D6	1.404088	D41	2.419943
D7	1.586582	D42	2.284206
D8	1.21915	D43	1.082231
D9	1.021179	D44	1.036779
D10	1.508202	D45	1.100211
D11	0.931673	D46	1.036779
D12	1.381033	D47	1.176969
D13	1.230798	D48	0.965517
D14	0.897215	D49	1.050452
D15	1.105601	D50	0.793853
D16	1.366318	D51	1.775109
D17	1.009468	D52	1.607429
D18	1.005337	D53	1.287459
D19	1.034483	D54	0.961816
D20	0.931673	D55	1.374128
D21	0.995232	D56	1.172414
D22	0.839002	D57	1.493943
D23	0.759404	D58	1.37283
D24	0.829022	D59	1.348801
D25	0.724958	D60	1.171399

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D26	1.142103	D61	1.324784
D27	1.095337	D62	0.828304
D28	0.83971	D63	1.241858
D29	0.941828	D64	1.36065
D30	1.348801	D65	1.339068
D31	1.48316	D66	1.604468
D32	1.714802	D67	1.832784
D33	1.073959	D68	1.232246
D34	1.095879	D69	1.014168
D35	0.931673	D70	1.243294

Minimum Particle Size = 0.724959

Maximum Particle Size = 2.419943

Mean Particle Size = 1.211266

Standard Deviation = 0.338287

Sum = 84.78864

**ตารางผนวกที่ ข9** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.04 %  
w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ b) 6  
l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	1.523498	D46	0.938032
D2	1.305344	D47	0.918174
D3	1.511352	D48	1.002375
D4	0.941828	D49	0.905131
D5	1.391754	D50	1.014168
D6	0.967977	D51	1.077276
D7	1.009468	D52	1.114172
D8	1.415474	D53	1.095879
D9	1.832784	D54	0.895224
D10	1.265099	D55	0.951249
D11	1.396445	D56	1.178483
D12	1.850539	D57	1.18903
D13	0.975929	D58	1.014168
D14	1.346595	D59	1.214753
D15	0.941828	D60	1.095879
D16	1.176969	D61	0.971043
D17	1.283296	D62	1.296203
D18	1.67268	D63	1.170892
D19	0.971043	D64	0.864823
D20	1.298037	D65	0.971043
D21	1.142624	D66	1.17444
D22	1.037352	D67	0.771058
D23	0.822542	D68	0.966133
D24	1.223045	D69	1.103448
D25	1.103987	D70	0.864823

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D26	1.103987	D71	1.447455
D27	1.264629	D72	1.241858
D28	1.989867	D73	1.767725
D29	0.758621	D74	1.675876
D30	0.868254	D75	1.266039
D31	1.116837	D76	1.916509
D32	0.987436	D77	1.142103
D33	0.756266	D78	1.736507
D34	1.02872	D79	0.833314
D35	1.152467	D80	1.077276
D36	1.204431	D81	1.245682
D37	1.384903	D82	0.862758
D38	1.150919	D83	0.928477
D39	0.853056	D84	0.758621
D40	1.088804	D85	1.025246
D41	0.948746	D86	0.986231
D42	0.910371	D87	1.129541
D43	1.531671	D88	1.317584
D44	1.70681	D89	0.804269
D45	0.941196	D90	0.905131

Minimum Particle Size = 0.756266

Maximum Particle Size = 1.989867

Mean Particle Size = 1.155351

Standard Deviation = 0.281862

Sum = 103.9816

**ตารางผนวกที่ ข10** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c) 14 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	1.288382	D36	1.277725
D2	0.91623	D37	1.223045
D3	1.014168	D38	1.931035
D4	0.804269	D39	1.492749
D5	0.938032	D40	1.137931
D6	1.037352	D41	1.292529
D7	1.064507	D42	1.122677
D8	0.724958	D43	0.941196
D9	0.936764	D44	0.980791
D10	0.848164	D45	1.037352
D11	1.123207	D46	0.759404
D12	0.9025	D47	0.966133
D13	1.073959	D48	0.724958
D14	0.74438	D49	0.931673
D15	0.868254	D50	1.156587
D16	1.048752	D51	2.171319
D17	0.941196	D52	1.616282
D18	0.881168	D53	0.9025
D19	0.819646	D54	1.724483
D20	1.137408	D55	1.105601
D21	1.605949	D56	0.92527
D22	1.249019	D57	1.21915
D23	1.684016	D58	0.872352
D24	1.207389	D59	0.912979
D25	1.000594	D60	1.090441

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D26	0.896552	D61	0.938032
D27	1.348801	D62	1.002375
D28	1.351883	D63	0.811628
D29	1.14626	D64	0.758621
D30	1.602985	D65	1.141582
D31	1.481154	D66	1.141582
D32	1.02872	D67	0.994635
D33	0.966133	D68	1.090441
D34	1.775109	D69	1.220125
D35	1.683663	D70	1.690007

Minimum Particle Size = 0.724959

Maximum Particle Size = 2.171319

Mean Particle Size = 1.134953

Standard Deviation = 0.307333

Sum = 79.44671

**ตารางผนวกที่ ข11** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.04 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d) 20 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	1.2361	D46	1.245682
D2	1.486363	D47	1.207389
D3	0.897215	D48	1.341729
D4	1.17444	D49	1.080032
D5	1.043638	D50	1.100211
D6	0.879141	D51	0.9581
D7	0.805008	D52	1.497124
D8	0.793103	D53	1
D9	0.830455	D54	0.737157
D10	1.21915	D55	1.02872
D11	0.91623	D56	1.627645
D12	1.255191	D57	1.018264
D13	0.730677	D58	1.243294
D14	0.848164	D59	1.407049
D15	1.14626	D60	1.170384
D16	1.249019	D61	1.207389
D17	1.1805	D62	1.449917
D18	1.02872	D63	1.000594
D19	0.931673	D64	0.727415
D20	0.71088	D65	1.129541
D21	0.839002	D66	1.147815
D22	0.895224	D67	1.131119
D23	1.224502	D68	1.320289
D24	1.767725	D69	1.166822
D25	0.961816	D70	1.070633

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D26	1.2361	D71	1.321639
D27	1.152467	D72	0.971655
D28	1.664485	D73	0.895224
D29	1.420087	D74	1.105601
D30	1.208865	D75	1.079481
D31	1.000594	D76	1.137408
D32	1.064507	D77	0.920115
D33	2.055705	D78	1.068966
D34	1.082231	D79	0.89456
D35	1.364141	D80	0.931034
D36	1.502277	D81	0.9025
D37	1.142624	D82	1.208865
D38	1.202949	D83	0.987436
D39	1.207389	D84	0.91623
D40	1.758959	D85	0.771058
D41	1.463792	D86	0.724138
D42	1.25377	D87	1.565457
D43	1.366318	D88	1.156587
D44	1.140019	D89	0.910371
D45	1.077828	D90	0.759404

Minimum Particle Size = 0.71088

Maximum Particle Size = 2.055705

Mean Particle Size = 1.128329

Standard Deviation = 0.257471

Sum = 100.4212

**ตารางผนวกที่ ข12** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ a) 3 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	1.12585	D36	1.355835
D2	1.137931	D37	1.077828
D3	1.420087	D38	1.381033
D4	2.239256	D39	1.255191
D5	0.862069	D40	1.440868
D6	0.761749	D41	1.197004
D7	0.665973	D42	1.170892
D8	0.862069	D43	0.635831
D9	0.693095	D44	1.176969
D10	0.879141	D45	0.853056
D11	1.202949	D46	0.669534
D12	0.759404	D47	0.793853
D13	0.99284	D48	0.793853
D14	1.310799	D49	1.077828
D15	0.568704	D50	1.080032
D16	0.624509	D51	0.727415
D17	0.689655	D52	0.777966
D18	0.724958	D53	1.629835
D19	0.4496	D54	1.222072
D20	0.918174	D55	0.763308
D21	1.024086	D56	1.204431
D22	1.103987	D57	1.05497
D23	0.771058	D58	0.987436
D24	1.582079	D59	2.245619
D25	0.862069	D60	0.697371

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D26	0.918174	D61	0.8992
D27	2.082998	D62	1.103987
D28	0.853056	D63	0.833314
D29	1.474314	D64	0.621647
D30	0.690517	D65	0.753115
D31	1.004153	D66	0.693952
D32	1.586582	D67	0.740376
D33	1.691062	D68	0.71754
D34	1.420506	D69	0.777966
D35	2.127058	D70	2.266701

Minimum Particle Size = 0.4496  
 Maximum Particle Size = 2.266701  
 Mean Particle Size = 1.067976  
 Standard Deviation = 0.421127  
 Sum = 74.75834

**ตารางผนวกที่ ข13** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงใหม่ที่ผลิตจากสารละลายใหม่เข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่  
b) 6 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	1.200971	D26	1.224502
D2	0.786328	D27	0.918174
D3	0.988038	D28	1.179492
D4	2.225407	D29	0.912979
D5	1.863346	D30	0.759404
D6	0.710043	D31	0.886549
D7	0.730677	D32	0.931673
D8	1.417573	D33	0.864823
D9	0.841831	D34	0.862069
D10	0.54522	D35	0.552801
D11	0.521819	D36	0.710043
D12	0.552801	D37	2.083284
D13	0.879141	D38	1.113104
D14	0.793103	D39	1.039642
D15	1.291148	D40	0.928477
D16	0.448276	D41	0.941828
D17	0.73149	D42	1.267916
D18	0.756266	D43	0.629251
D19	0.758621	D44	1.142624
D20	0.680106	D45	1.767052
D21	0.793853	D46	1.095337
D22	0.761749	D47	0.862069
D23	0.804269	D48	1.150919
D24	1.025246	D49	0.829022
D25	1.14626	D50	0.656079

Minimum Particle Size	= 0.448276
Maximum Particle Size	= 2.225407
Mean Particle Size	= 0.971254
Standard Deviation	= 0.37116
Sum	= 48.56269

**ตารางผนวกที่ ข14** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ c) 14 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	0.759404	D66	0.690517
D2	0.872352	D67	0.787084
D3	1.346595	D68	1.025246
D4	1.048752	D69	0.862069
D5	0.780256	D70	0.862069
D6	0.759404	D71	2.107966
D7	0.928477	D72	1.623988
D8	0.833314	D73	0.864823
D9	0.570791	D74	1.408738
D10	0.663289	D75	0.774904
D11	1.227896	D76	1.129541
D12	1.134268	D77	0.91623
D13	0.727415	D78	0.862758
D14	0.710043	D79	0.971043
D15	0.830455	D80	0.834027
D16	0.761749	D81	0.920115
D17	1.004153	D82	1.555169
D18	0.841831	D83	0.941196
D19	0.828304	D84	0.603202
D20	0.813822	D85	0.593264
D21	1.172414	D86	1.018847
D22	0.745976	D87	0.862069
D23	1.218662	D88	0.4496
D24	0.611036	D89	0.879141
D25	1.481154	D90	0.561339

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D26	0.802049	D91	1.744705
D27	0.802049	D92	1.176969
D28	0.633958	D93	0.756266
D29	0.679232	D94	1.043638
D30	0.480289	D95	0.805008
D31	0.502077	D96	1.048752
D32	0.497317	D97	1.482759
D33	0.757052	D98	1.088804
D34	0.960579	D99	0.941196
D35	0.796096	D100	1.463792
D36	1.062271	D101	1.463792
D37	1.207389	D102	0.862758
D38	0.787084	D103	0.737963
D39	0.720021	D104	1.014168
D40	0.730677	D105	1.039642
D41	0.870305	D106	0.756266
D42	2.104579	D107	0.936764
D43	0.58722	D108	0.613948
D44	0.967977	D109	0.895224
D45	0.71088	D110	0.787839
D46	0.946864	D111	0.9025
D47	0.720021	D112	0.635831
D48	0.971043	D113	0.817467
D49	0.512623	D114	0.941196
D50	1.312159	D115	0.679232
D51	0.883862	D116	0.753115
D52	0.9025	D117	1.039642
D53	0.931673	D118	0.971043

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D54	1.062271	D119	0.71754
D55	0.45355	D120	0.621647
D56	1.591072	D121	0.910371
D57	0.873034	D122	1.227896
D58	0.986231	D123	0.756266
D59	0.436176	D124	0.756266
D60	1.037352	D125	0.966133
D61	0.946864	D126	0.877788
D62	0.787084	D127	0.994635
D63	0.621647	D128	0.845355
D64	1.014168	D129	1.005337
D65	0.724138	D130	0.804269

Minimum Particle Size = 0.436176

Maximum Particle Size = 2.107966

Mean Particle Size = 0.915646

Standard Deviation = 0.291922

Sum = 119.034

**ตารางผนวกที่ ข15** ข้อมูลทางสถิติของขนาดอนุภาคผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมเข้มข้น 0.03 % w/v อุณหภูมิ 80/175 °C (ช่วงแรก/ช่วงที่สอง) และอัตราการไหลของแก๊สที่ d) 20 l/min

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D1	0.727415	D86	0.757052
D2	0.759404	D87	0.879141
D3	0.965517	D88	0.71088
D4	1.310799	D89	0.88319
D5	0.656079	D90	1.320289
D6	1.043638	D91	0.644191
D7	0.71088	D92	1.1805
D8	1.305344	D93	1.035057
D9	0.771058	D94	0.966133
D10	0.822542	D95	0.724958
D11	0.805008	D96	0.655172
D12	0.920115	D97	0.703313
D13	1.112036	D98	0.669534
D14	0.693095	D99	0.862758
D15	0.828304	D100	0.864823
D16	0.829022	D101	0.986231
D17	0.99284	D102	0.763308
D18	1.417573	D103	0.759404
D19	0.870305	D104	1.035057
D20	0.853056	D105	0.786328
D21	1.150919	D106	1.696678
D22	0.703313	D107	0.933585
D23	0.663289	D108	0.848164
D24	1.043638	D109	0.8992
D25	0.828304	D110	1.249495

Particle	Diameter	Particle	Diameter
D26	0.872352	D111	0.83971
D27	0.886549	D112	0.460057
D28	0.931673	D113	1.002375
D29	0.870305	D114	0.91623
D30	1.034483	D115	1.069522
D31	0.629251	D116	1.195015
D32	0.931673	D117	0.483989
D33	0.58722	D118	1.210831
D34	0.83971	D119	0.635831
D35	1	D120	0.819646
D36	1.37931	D121	0.928477
D37	0.927836	D122	0.757052
D38	1.542116	D123	0.593264
D39	0.663289	D124	0.862069
D40	0.426528	D125	0.994635
D41	0.656079	D126	0.851661
D42	1.142624	D127	0.774904
D43	0.802049	D128	1.025246
D44	0.931673	D129	1.511352
D45	1.077828	D130	1.166822
D46	0.662392	D131	0.905131
D47	0.539741	D132	0.830455
D48	0.74438	D133	0.787084
D49	0.742781	D134	0.973489
D50	0.780256	D135	0.88319
D51	1.265099	D136	1.574167
D52	1.12585	D137	1.635297
D53	0.873034	D138	0.621647

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D54	0.742781	D139	0.71088
D55	0.690517	D140	1.218662
D56	1.050452	D141	0.787084
D57	0.881168	D142	1.088804
D58	0.980791	D143	0.724138
D59	0.941196	D144	0.753115
D60	1.148333	D145	0.83971
D61	0.756266	D146	0.853753
D62	0.71754	D147	0.793853
D63	0.796096	D148	0.703313
D64	0.828304	D149	0.839002
D65	0.862758	D150	0.971043
D66	1.932573	D151	0.868254
D67	1.455238	D152	0.883862
D68	1.082781	D153	0.953746
D69	0.71088	D154	0.933585
D70	1.46298	D155	0.834027
D71	0.680106	D156	0.805008
D72	0.980791	D157	0.864135
D73	0.710043	D158	0.54522
D74	0.742781	D159	0.774904
D75	0.966133	D160	0.761749
D76	0.525226	D161	0.897215
D77	0.938032	D162	1.077828
D78	0.656079	D163	1.02872
D79	0.687064	D164	1.000594
D80	1.310799	D165	0.8992
D81	0.644191	D166	1.396445

Particle	Diameter(Micron)	Particle	Diameter(Micron)
D82	0.771058	D167	1.097506
D83	1.223045	D168	0.756266
D84	0.611036	D169	1.062271
D85	0.698223	D170	1.185024

Minimum Particle Size = 0.426528

Maximum Particle Size = 1.932573

Mean Particle Size = 0.910984

Standard Deviation = 0.291922

Sum = 154.8673

(หมายเหตุ : จากตารางที่ ข2-ข15 เป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคผงไหมด้วยโปรแกรม Image Analyzer, Version 3)

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นาย วันทวี กล้วยไม้
วัน เดือน ปี ที่เกิด	26 มิถุนายน 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดระยอง
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยมหิดล (พ.ศ. 2547)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัย ด้านวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2547-2549)













