



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การสังเคราะห์ผงไหมขนาดนาโนเมตรจากรังไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส

Synthesis of Nanosize Silk Powder from Silk-cocoon by Spray Pyrolysis Technique

นามผู้วิจัย นางสาวดั่งฤทัย รัตนสุวรรณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสังเคราะห์ผงไหมขนาดนาโนเมตรจากรังไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส

Synthesis of Nanosize Silk Powder from Silk-cocoon by Spray Pyrolysis Technique

โดย

นางสาวตังฤทัย รัตนสุวรรณ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2551

ดั่งฤทัย รัตนสุวรรณ 2551: การสังเคราะห์ผงไหมขนาดนาโนเมตรจากรังไหมด้วย
เทคนิคสเปร์ย์ไฟโรลิซิส ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ไพศาล คงกาญจนาย, Ph.D. 100 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคผงไหมจากรังไหมให้มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตรโดยใช้เทคนิคสเปร์ย์ไฟโรลิซิส เริ่มต้นจากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมสารละลายไหมตั้งต้นด้วยการไฮโดรไลซ์รังไหมด้วยน้ำกึ่งวิกฤต โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซ์ จากผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่มีอิทธิพลต่อการละลายของรังไหม และปริมาณโปรตีนรวม ในขณะที่ความดันมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กล่าวคือ รังไหมสามารถละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับปริมาณโปรตีนรวม แต่เมื่อใช้อุณหภูมิสูงหรือระยะเวลานานเกินไปกลับมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนรวมลดลง เนื่องจากโปรตีนเกิดการเสียสภาพ (Denature) ดังนั้นจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายไหมตั้งต้น ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที จากสารละลายไหมตั้งต้นที่ได้นำไปทำให้เป็นผงไหมโดยศึกษาผลของตัวทำละลายร่วม (เอทานอล) ต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาคที่ผ่านกระบวนการสเปร์ย์ไฟโรลิซิส (เอสพี) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทำแห้ง และอัตราการไหลของแก๊สตัวพา การวิจัยนี้ได้ศึกษาผลจากความเข้มข้นของสารละลายก่อนการสเปร์ย์ และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่อขนาด และการกระจายตัวของอนุภาค จากผลการวิจัยพบว่า เมื่อใช้ตัวทำละลายร่วมในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจะมีผลให้ขนาดอนุภาคเล็กลง และการกระจายตัวของอนุภาคดีขึ้น ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดสม่ำเสมอมากขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคผงไหม คือ เมื่อใช้ความเข้มข้นสารละลายไหมเริ่มต้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเจือจางด้วยเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อุณหภูมิในกระบวนการเอสพี คือ ช่วงที่หนึ่ง 130 และช่วงที่สอง 200 องศาเซลเซียสอัตราการไหลของแก๊สตัวพา 10 ลิตรต่อนาที ทำให้ได้อนุภาคผงไหมที่สังเคราะห์ขนาด 254 นาโนเมตร ปริมาณโปรตีนเมื่อผ่านกระบวนการเอสพีจะลดลง 53.62 เปอร์เซ็นต์

Dungruthai Rattanasuwan 2008: Synthesis of Nanosize Silk Powder from Silk-cocoon by Spray Pyrolysis Technique. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Paisan Kongkachuichay, Ph.D. 100 pages.

This research aimed to synthesis of nanosized silk powder from silk cocoon by a spray pyrolysis technique. The optimum condition for preparation silk solution by hydrolysis of silk cocoon with DI water under sub-critical condition was determined. The effects of pressure, temperature, and time of hydrolysis were investigated. It was found that temperature and time strongly effect to the solubility and the protein content of the obtained solution while the starting pressure had an insignificant effect. The results showed that the solubility and protein content were increased with increasing of temperature and time. However, at too high temperature and time the silk protein was denatured. Consequently, the condition at 200 °C and 30 minutes was selected for further preparation of silk solution. Subsequently, the starting silk solution was converted to nanosized powder via a spray pyrolysis (SP) reactor. The ethanol was used as a co-solvent in order to reduce the size of the synthesized powder. The corresponding variables: feed composition, flow rate of carrier gas, and processing temperature, were examined their effects to the morphology of the obtained silk powder. The results showed that the silk powder having smaller size with narrower size distribution was achieved when the higher amount of ethanol was used. Finally, the optimum condition for producing silk powder was concluded as follows: the concentration of silk-cocoon 1 %weight by vol. and 60 % vol. ethanol was used for dilute the solution, temperature in SP process was 130 and 200°C as first and second period and flow rate of carrier gas 10 l/min.. The average diameter of the obtained powder was 254 nm. The remained protein after complete SP process drop down 53.62%

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยดำเนินการจาก สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (รหัสโครงการวิจัย ว-ท (ค) 42.50) และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือ และความกรุณาจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล คงคาอุย นาย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาชี้แนะรวมถึงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จริญญา ถัฏมานพ และ ดร. พชรินทร์ วรรณกุล ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เมตตา เจริญพานิช และ ดร. พงศกร จันทรรัตน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเครื่องมือทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่น้อง พี่ๆ วิศวกรรรมเคมี และบุคคลรอบข้างทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ คอยอยู่เคียงข้าง ช่วยเหลือสนับสนุน และห่วงใยข้าพเจ้าเสมอมา

ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ วงศ์ตระกูล และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเมตตาอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ จนถึงปัจจุบัน

ดั่งฤทัย รัตนสุวรรณ

กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การละลายได้ของรังไหม	76
ภาคผนวก ข การเตรียมสารละลาย A และ สารละลาย B	81
ภาคผนวก ค การเตรียมสารละลาย BSA ที่เจือจางตามความเข้มข้น	82
ภาคผนวก ง กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นโปรตีน	83
ภาคผนวก จ ค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณความเข้มข้นโปรตีนของ สารละลายไหม	84
ภาคผนวก ฉ การหาความหนาแน่น	88
ภาคผนวก ช การหาแรงตึงผิว	89
ภาคผนวก ซ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคผงไหม	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ส่วนประกอบของชั้นรังไหมชนิด <i>Bombyx mori</i> .	12
2 กรดอะมิโน 18 ชนิดที่เป็นองค์ประกอบในรังไหม	13
3 หน้าที่และคุณสมบัติของกรดอะมิโนสำคัญในผงไหม	14
4 สถานะการทดลองอุณหภูมิและเวลาที่สถานะต่างๆ	49
5 การทดลองในการผลิตผงไหม	51
6 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของรังไหม <i>Bombyx mori</i> .	53
7 ค่าความหนาแน่น ความตึงผิว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดสารละลาย เริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง	61
8 ขนาดและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคผงไหม (SD) เมื่อใช้อัตรา การไหลแก๊สตัวพา 10 ลิตรต่อนาที	63
9 ขนาดและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคผงไหม (SD) เมื่อใช้อัตรา การไหลแก๊สตัวพา 20 ลิตรต่อนาที	65
ตารางผนวกที่	
ก1 เปอร์เซนต์การละลายของรังไหมเมื่อใช้ความดันบรรยากาศ	76
ก2 เปอร์เซนต์การละลายของรังไหมเมื่อใช้ความดัน 10 บาร์	78
ค1 การเจือจางสารละลาย BSA	82
ง1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน BSA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการ วิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	83
จ1 ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่ได้จากสารละลายไหม เมื่อใช้ความดันบรรยากาศ	84
จ2 ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่ได้จากสารละลายไหม เมื่อใช้ความดัน 10 บาร์	85
จ3 ค่าการดูดกลืนแสง และปริมาณโปรตีนของผงไหมที่ความเข้มข้นใหม่ต่อน้ำเป็น 1:100 ความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 15 เปอร์เซนต์โดยปริมาตรที่อุณหภูมิช่วงที่ สองของกระบวนการเอสพีต่างๆ	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ4 ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนของผงไหมหลังจากผ่านกระบวนการเอสพี จากสถานะความเข้มข้นเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที	86
ฉ1 แสดงค่าความหนาแน่น	88
ช1 แสดงค่าความตึงผิว	90
ซ1 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที	91
ซ2 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที	92
ซ3 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที	93
ซ4 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 20 ลิตรต่อนาที	94
ซ5 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 20 ลิตรต่อนาที	95
ซ6 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 20 ลิตรต่อนาที	96
ซ7 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากอุณหภูมิ 130/180 สารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที	97

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างทุติยภูมิ (a) α -helix และ (b) β -pleated sheet	5
2 โครงสร้างโปรตีนในระดับต่างๆ ตั้งแต่โครงสร้างปฐมภูมิ ทุติยภูมิ ตติยภูมิ และจตุรภูมิ	6
3 เส้นใยไหมดิบ	8
4 XRD ของไฟโบรอิน (ซ้าย) และเซรีซิน (ขวา)	9
5 พันธะต่างๆ ในไฟโบรอิน (a) สายโซ่โมเลกุลพอลิเปปไทด์ของเส้นไหม (b) การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีโนของสายโมเลกุลพอลิเปปไทด์ของเส้นไหม 2 โมเลกุล (c) การเกิดพันธะไอออนิก หรือ salt linkages ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีนซึ่งเป็นหมู่ข้างเคียงของสายโซ่โมเลกุลพอลิเปปไทด์ของเส้นไหม	10
6 เส้นไหม (a) เส้นไหมติดกันเนื่องจากมีกาวไหมเซรีซินเชื่อม (b) ไฟโบรอินสองเส้นแยกออกจากกัน	11
7 สบู่ผลิตกันท์จากผงไหม	19
8 เส้นใยฝ้าย (a) ที่ไม่ได้ปรับสภาพ (non-treat) (b) ที่ปรับสภาพ (traet) โดยใช้กลูตารอลดีไฮด์และเซรีซิน	20
9 กลไกการทำละอองจากคลื่นความถี่สูง (1) Oscillating element (2) Glass plate (3) Liquid (4) Capillary waves (5) Aerosol (6) Ultrasound	24
10 เครื่องพ่นละอองแบบอัลตราโซนิก	25
11 ชุดเครื่องปฏิกรณ์เอสพี	26
12 ขั้นตอนของกระบวนการเอสพี	26
13 รูปร่างอนุภาคที่ได้จากสารละลาย ZHC ที่ความเข้มข้นตัวสัมพัทธ์แตกต่างกัน (A) 0.35 (B) 0.088 (C) 0.018 (D) 0.009	28
14 (A) อนุภาครูพรุน Al_2O_3 เตรียมจาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (B) อนุภาครูพรุน ZnO เตรียมจาก $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 15$ เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก Polyethleneglycol	30
15 ผลของการใช้สารตั้งผิวต่อการขึ้นรูปเส้นใย ZAC (A) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (B) เติมสารลดแรงตึงผิว	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
16	เส้นใยเซอร์โคเนียเตรียมจาก (A) ZAC+6 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก PVOH มี ZrO_2 24.8เปอร์เซนต์ (B) ZAC+6 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก PVOH มี ZrO_2 25.3เปอร์เซนต์
17	ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลพร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบ
18	ชุดเครื่องมือทดสอบแรงดึงผิว
19	เครื่องฟั่นละอองอัลตราโซนิก
20	ชุดอุปกรณ์เอสพี
21	เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต
22	ชุดแผ่นกรองไมโครฟิลเตอร์
23	(a) รังไหมพันธุ์พื้นเมือง (b) รังไหมพันธุ์พื้นเมืองที่ตัดแล้ว
24	สารละลายไหมที่ได้จากการทดลองไฮโดรไลซ์รังไหมที่ความดันเริ่มต้นที่บรรยากาศ อุณหภูมิ 170, 200 และ 230 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการไฮโดรไลซิส 30 นาที
25	เปอร์เซ็นต์การละลายได้ของรังไหมที่สภาวะการไฮโดรไลซิสต่างๆ
26	แนวโน้มปริมาณความเข้มข้นเข้มข้นโปรตีนที่สภาวะต่างๆ
27	FTIR spectra ของสารละลายไหมที่ความดันเริ่มต้นที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาไฮโดรไลซิส 30 นาที
28	ผงไหมที่คัดด้วยแผ่นไมโครฟิลเตอร์ (ซ้าย) และแผ่นไมโครฟิลเตอร์ปกติ (ขวา)
29	ภาพจาก SEM ของผงไหมที่ใช้ความเข้มข้นเอทานอลเป็น 15 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สดัฟพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ (a) 160 (b) 170 และ (c) 180 องศาเซลเซียส
30	ปริมาณโปรตีนของผงไหมที่ความเข้มข้นไหมต่อน้ำเป็น 1:100 เมื่อใช้เอทานอลความเข้มข้น 15 เปอร์เซนต์โดยปริมาตรที่อุณหภูมิต่างๆ
31	ภาพจาก SEM อนุภาคผงไหมที่สังเคราะห์ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอล โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สดัฟพาอยู่ที่ 10 ลิตรต่อนาที (a) ไม่มีเอทานอล (b) เอทานอล 40% (c) เอทานอล 50% (d) เอทานอล 60%

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	ช่วงของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทานอล	62
33	ภาพจาก SEM อนุภาคผงไหมที่สังเคราะห์ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอล โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาครั้งที่ 20 ลิตรต่อนาที (a) ไม่มีเอทานอล (b) เอทานอล 40% (c) เอทานอล 50% (d) เอทานอล 60%	64
34	ช่วงของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาเป็น 20 ลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทานอล	64
35	ผงไหมเซรีซินของ Sheng et al. (2000)	65
36	ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 80/150 องศาเซลเซียสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวสกัดโปรตีน และอัตราการไหลของแก๊สที่ (a) 3 ลิตรต่อนาที (b) 6 ลิตรต่อนาที (c) 14 ลิตรต่อนาที (d) 20 ลิตรต่อนาที	66
ภาพผนวกที่		
ง1	กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน	83

การสังเคราะห์ผงไหมขนาดนาโนเมตรจากรังไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส

Synthesis of Nanosize Silk Powder from Silk-cocoon by Spray Pyrolysis

Technique

คำนำ

การปลูกหม่อน-เลี้ยงไหมเพื่อนำเส้นไหมมาถักทอเป็นผืนผ้าได้สร้างรายได้ให้แก่ประเทศไทยและคนไทยเป็นจำนวนไม่น้อย ผลิตภัณฑ์ผ้าไหมของประเทศไทยเป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมทั้งในและต่างประเทศ ผ้าไหมไทยมีความประณีต และมีลวดลายงดงามที่แสดงถึงเอกลักษณ์ไทย มีเกษตรกรจำนวนมากที่ประกอบอาชีพปลูกหม่อน เลี้ยงไหม และทอผ้าไหม ซึ่ง โดยมีเกษตรกรที่ปลูกหม่อนเลี้ยงไหมประมาณ 150,000 ครัวเรือน ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 19 จังหวัด ซึ่งจังหวัดที่มีการเลี้ยงไหมอยู่มาก ได้แก่ ขอนแก่น บุรีรัมย์ มหาสารคาม โคราช สุรินทร์ (กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2546)

การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และยังมีการนำไหมพันธุ์จากต่างประเทศมาเลี้ยง จนในปัจจุบันได้มีการผลิตเชิงอุตสาหกรรมอย่างเป็นระบบและครบวงจร เป็นอาชีพที่สามารถเป็นทางเลือกให้แก่ผู้ที่สนใจ นอกจากนี้ยังเป็นสินค้าชนิดหนึ่งที่มีอนาคตในการส่งออกตั้งแต่ รังไหม เส้นไหม ผ้าไหม ประเทศไทยมีการผลิตเส้นไหมได้ปีละประมาณ 1,300-1,400 ตัน ในจำนวนนี้มีเศษเหลือใช้จากไหมปีละ 300-400 ตัน โดยมีได้นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า คงมีเพียงบางส่วนที่นำไปใช้ทำสิ่งประดิษฐ์และบางส่วนจำหน่ายเป็นวัตถุดิบซึ่งรวมแล้วมีมูลค่าเพียง 41-95 ล้านบาทเท่านั้น หากนำมาผลิตเป็นผงไหมจำหน่ายมูลค่าจะเพิ่มเป็น 720-1,800 ล้านบาท ประเทศไทยเริ่มวิจัยการผลิตผงไหมครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดยกรมวิชาการเกษตร ต่อมาในปี พ.ศ.2541 จึงได้ทำจึงได้ทำวิจัยร่วมกับสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เพื่อให้ได้เทคนิคการเพิ่มผลผลิตและปลอดภัยด้วยรังสี หลังจากนั้นจึงวิจัยการทำผลิตภัณฑ์สบูไหมไทยร่วมกับกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ในปี 2544 โดยใช้ผงไหมเชริชินที่ผลิตมาจากน้ำที่คั้นลอกกาไหมหรือน้ำต้มสาวไหม ซึ่งปกติเมื่อเลิกสาวไหมในแต่ละวันแล้วเกษตรกรก็จะทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ (ประทีป และวิทย์วัฒน์, ม.ป.ป.)

รังไหมและเศษเส้นไหม เป็นหนึ่งในของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการทำผ้าไหม หากพิจารณาลงลึกไปถึงกระบวนการผลิตเส้นใยและทอผ้าไหมแล้ว จะพบว่าประเทศไทยมีการใช้ประโยชน์จากไฟเบอร์อินและเซรีซินอย่างไม่คุ้มค่า ซึ่งนอกจากจะทำให้สูญเสียโอกาสในการเพิ่มศักยภาพกระบวนการผลิตผ้าไหมแล้ว ในอีกด้านหนึ่งยังเป็นการเพิ่มปัญหาให้เกิดขึ้นในประเทศด้วย ดังนั้นจึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการสกัดโปรตีนไหม โดยพึ่งพิงวัตถุดิบในประเทศ (ชูขวัญ, 2550) โดยการนำมาผลิตเป็นผงไหม ซึ่งเป็นโปรตีนธรรมชาติที่ประกอบไปด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด ผงไหมสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง อาหาร และเป็นวัสดุทางการแพทย์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการผลิตผงไหมนั้นจะใช้สารเคมีในการทำสารละลายไหม แล้วนำสารละลายไหมที่ได้เข้าเครื่อง Freeze dry แล้วบดด้วยเครื่องบด จึงจะได้ผงไหมมีลักษณะคล้ายแป้ง และประกอบกับในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตผงไหมในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตผงไหม และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผงไหม งานวิจัยนี้จึงศึกษาการทำผงไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไฟโรลิซิส เพื่อให้ได้ผงไหมที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซ์รังไหม เพื่อนำมาใช้เป็นสารละลายตั้งต้นในการผลิตผงไหม
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ผงไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไฟโรลลิซิส

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้รังไหมพันธุ์ไทยพื้นเมือง (*Bombyx mori*) ในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นวัตถุดิบในการผลิต
2. ใช้เทคนิคสเปรย์ไฟโรลลิซิสในการผลิตผงไหม โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม
3. วิเคราะห์ผงไหมที่ผลิตได้ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ และปริมาณโปรตีน

การตรวจเอกสาร

โปรตีน

โปรตีนเป็นพอลิเปปไทด์ขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนตั้งแต่ 50 ตัวขึ้นไปเรียงต่อกัน มีการบิดม้วนตัว (folding) เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่มีเสถียรภาพ และเหมาะสมกับการทำงานมากที่สุดเพียงแบบเดียวโดยอาศัยแรงยึดและแรงผลักทางเคมีระหว่างหมู่เปปไทด์ ซึ่งกรดอะมิโนสองตัวจะเกิดปฏิกิริยารวมตัว (condensation reaction) กัน โดยมีพันธะเปปไทด์เชื่อม (Shuler and Kargi, 2002)

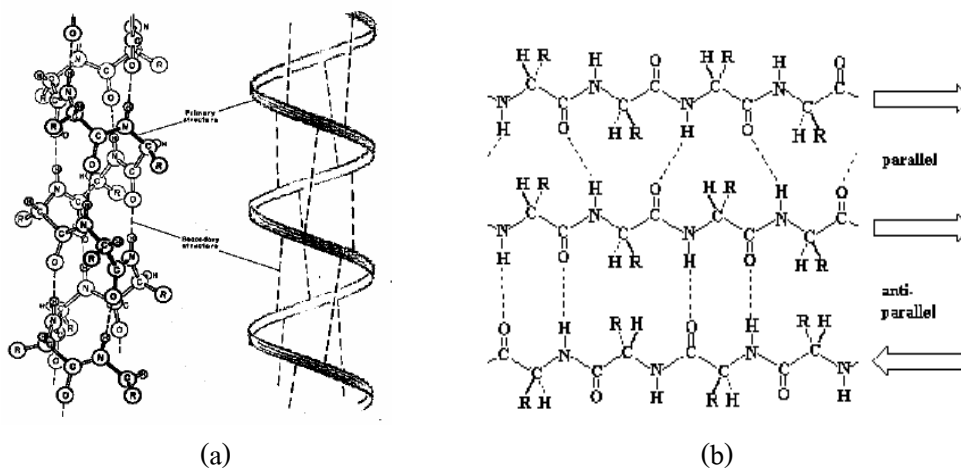
1. โครงสร้างโปรตีน

1.1 โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) หมายถึง โครงสร้างที่เกิดจากกรดอะมิโนมาเรียงต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์เป็นสายโซ่เปปไทด์ โครงสร้างนี้จะบอกได้เฉพาะจำนวนกรดอะมิโนทั้งหมดในโปรตีนโมเลกุล ลักษณะการเรียงตัวของกรดอะมิโน (amino acid sequence) ชนิดของกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบของโปรตีน และ N-terminal amino acid และ C-terminal amino acid

1.2 โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) สายพอลิเปปไทด์พับหรือม้วนเป็นเกลียว ซึ่งจะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มักทำให้เกิดโครงสร้าง 2 ชนิด คือ เป็น α -helix และ β -pleated sheet ดังภาพที่ 1 โครงสร้าง α -helix เป็นเกลียวเวียนขวาที่เกิดจากหมู่คาร์บอกซิลกับหมู่อะมิโนตัวที่ 4 ที่ติดไปในสายพอลิเปปไทด์เดียวกันสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน จะเป็นโครงสร้างที่เสถียรน้อยกว่า β -pleated sheet ที่สร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายพอลิเปปไทด์ 2 สายที่ขนานกันตลอดทั้งสาย โครงสร้างของ β -pleated sheet มี 2 โครงสร้าง คือ

1.2.1 Parallel pleated sheet เกิดจากสายพอลิเปปไทด์ที่พับไปมาและยึดกันไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน มีการเรียงลำดับจาก N-terminal amino acid ไป C-terminal amino acid ในทิศทางเดียวกัน

1.2.2 Anti-parallel pleated sheet สายเปปไทด์ที่ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนมีการเรียงลำดับจาก N-terminal amino acid ไป C-terminal amino acid ในทิศทางที่สวนทางกัน

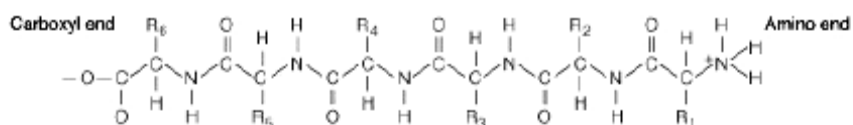
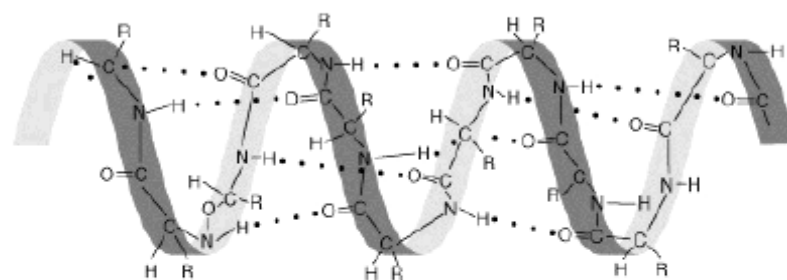


ภาพที่ 1 โครงสร้างทุติยภูมิ (a) α -helix และ (b) β -pleated sheet

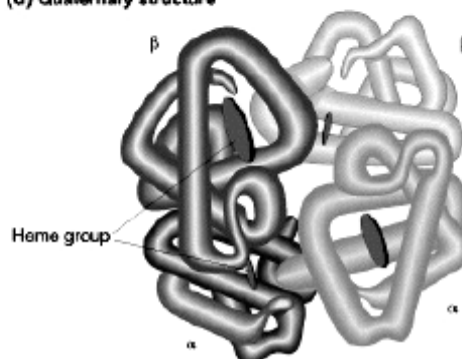
ที่มา: ชีวะ (ม.ป.ป.)

1.1 โครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary structure) เป็นโครงสร้างโปรตีนที่แสดงถึง protein conformation แท้จริง อาจมีทั้ง α -helix และ β -pleated sheet และมีการม้วนตัว

1.4 โครงสร้างจตุรภูมิ (Quaternary structure) เป็นโครงสร้างของโปรตีนที่มีหน่วยย่อย (subunit) เช่น ฮีโมโกลบิน มีโครงสร้างจตุรภูมิเป็นแบบ tetramers เพราะว่ามีโมเลกุลประกอบด้วย 4 monomers หรือ 4 หน่วยย่อยซึ่ง 1 หน่วยย่อย คือสายเปปไทด์ 1 สาย โดยแต่ละ subunit จะอยู่รวมกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โครงสร้างโปรตีนในระดับต่างๆแสดงดังภาพที่ 2

(a) Primary structure**(b) Secondary structure**

Hydrogen bonds between amino acids
at different locations in polypeptide chain

(c) Tertiary structure**(d) Quaternary structure**

ภาพที่ 2 โครงสร้างโปรตีนในระดับต่างๆ ตั้งแต่โครงสร้างปฐมภูมิ ทติยภูมิ ตติยภูมิ และจตุรภูมิ
ที่มา: ชีวะ (ม.ป.ป.)

2. การแบ่งโปรตีนตามลักษณะโครงสร้าง

2.1 Simple หรือ Unconjugated proteins หมายถึง โปรตีนที่โมเลกุลประกอบด้วยกรดอะมิโนเท่านั้น ไม่มีสารประกอบอื่นๆ อยู่ด้วย สามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลได้เป็น

2.1.1 Fibrous proteins เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำทำหน้าที่ทางด้านเป็นโครงสร้างของร่างกาย โปรตีนชนิดนี้ส่วนมากมีโครงสร้างสามมิติเป็นแบบโครงสร้างทุติยภูมิ เช่น α -helix ลักษณะรูปร่างส่วนมากจึงเป็นแท่ง (rod-like shape) มีคุณสมบัติที่สำคัญคือมีความยืดหยุ่นมาก ตัวอย่าง เช่น collagens, elastins, actin, myosin, α -keratin และ silk-fibroin

2.1.2 Globular proteins หรือโปรตีนก้อนกลม เป็นโปรตีนที่มีโครงสร้างสามมิติในระดับตติยภูมิ สามารถละลายน้ำได้ ส่วนมากทำหน้าที่เป็นเอนไซม์ โปรตีนตัวรับ โปรตีนควบคุม และภูมิคุ้มกันของร่างกาย

2.2 Conjugated proteins หมายถึงโปรตีนที่มีสารประกอบอื่นๆ รวมอยู่ด้วย เรียกว่า สารประกอบอื่นๆ นี้เป็นหมู่ prosthetic โปรตีนประเภทนี้แบ่งได้หลายชนิดตามชนิดของหมู่ prosthetic ได้แก่ Glycoproteins, Lipoproteins, Nucleoproteins, Metalloproteins และ Phosphoproteins

3. การเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีน (Protein denatured)

คือ การแปรสภาพโปรตีนจากสภาพตามธรรมชาติ (native conformation) โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างทุติยภูมิ ตติยภูมิ และจตุรภูมิ เนื่องจากการทำลายแรงยึดต่าง ๆ ของโครงสร้าง โดยอาจเกิดจากความร้อน เช่น การต้มสารละลายโปรตีน การเปลี่ยนค่าความเป็นกรดเบส (pH) ของสารละลายให้เป็นกรดมากขึ้น โปรตีนที่ถูกแปรสภาพไปจะยังมีโครงสร้างปฐมภูมิเหมือนเดิม เพราะพันธะเปปไทด์ไม่ได้ถูกสลาย โปรตีนที่ถูกแปรสภาพจะสูญเสียหน้าที่ทางชีวภาพ เช่น การต้มไข่ อัลบูมินซึ่งโครงสร้างเดิมสามารถละลายได้แต่เมื่อถูกความร้อนจะไม่ละลาย แต่จะรวมเป็นก้อน (coagulum) และเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีขาว การทำให้เกิดการแปรสภาพของโปรตีนบางชนิด จะเติมสารซึ่งเรียกว่า denaturant จะทำให้โปรตีนเสียโครงสร้างธรรมชาติ เพราะมีการทำลาย non-covalent interaction แต่พันธะโคเวเลนต์ เช่น พันธะเปปไทด์ไม่ถูกทำลาย โครงสร้างปฐมภูมิของโปรตีนยังคงอยู่ และเมื่อนำ denaturant ออกไปจากสารละลาย พบว่าโปรตีนจะเกิดการม้วนพับกลับคืนได้ แต่จะไม่สามารถทำหน้าที่ทางชีวภาพได้ (Shuler and Kargi, 2002)

4. การวัดปริมาณโปรตีนด้วยวิธีของ Lowry

การหาปริมาณโปรตีนโดยวิธีของ Lowry สามารถวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในระดับต่ำ ๆ ถึง 5-100 μg ได้ หลักการการทดสอบจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของพันธะเปปไทด์ในโปรตีนเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับ Cu^{2+} ในสภาวะเบส จากนั้นเติมสารละลาย Folinicocalteu ซึ่งจะปรีดิษฐ์ Cu^{2+} coordination complex เกิดเป็นสารสีน้ำเงิน (ประดิษฐ์, 2549)

รังไหม

1. โปรตีนไหม

รังไหม เป็นโปรตีนที่หนอนไหมสังเคราะห์ขึ้นเพื่อห่อหุ้มร่างกายตัวเอง รังไหมประกอบไปด้วยเส้นไหมดิบที่เรียกว่าเส้นไหมไฟโบรอิน (Fibroin) สองเส้นร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ที่เกาะติดกันและเคลือบด้วยกาวไหม หรือที่เรียกว่าเซรีซิน (Sericin) ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ปริมาณของกาวไหมจะขึ้นกับพันธุ์ไหมแต่ละชนิด ดังภาพที่ 3 นอกจากนี้ในเส้นไหมจะมีไขมัน และน้ำมันอยู่ประมาณ 0.5-1 เปอร์เซ็นต์ และสารสีธรรมชาติประมาณ 1-1.4 เปอร์เซ็นต์



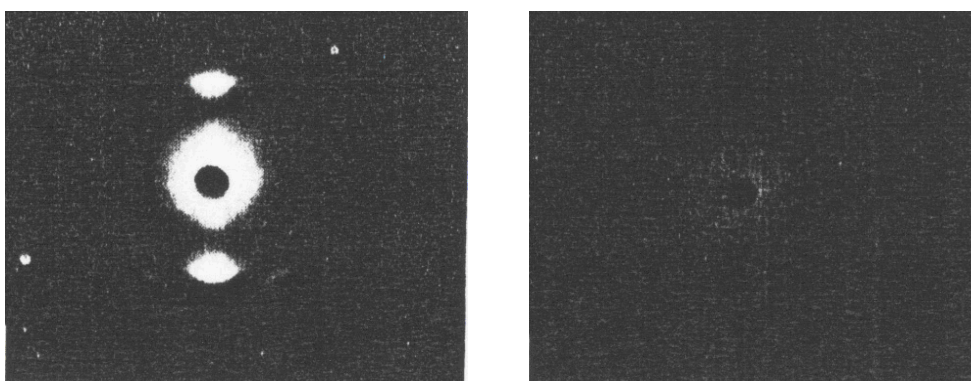
ภาพที่ 3 เส้นใยไหมดิบ

ที่มา: สิริรัตน์ (2548ก)

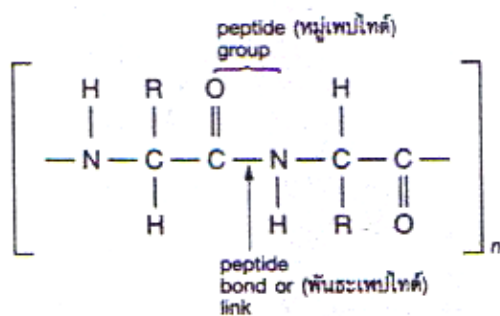
ไฟโบรอิน คือ โปรตีนเส้นใยที่เอามาทอผ้า มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นโปรตีน ประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดเดียวกับเซรีซิน คือ ไกลซีน อะลานีน เซอรีนและ

ไทโรซีน ประมาณ 49.99, 26.54, 11.41 และ 5.35 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ไฟโบรอินมีโครงสร้างที่เป็นผลึกมาก มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ดังแสดงในภาพที่ 4 โมเลกุลไฟโบรอินจะเป็นโครงสร้างแบบ β -pleated sheet เหมือนกับยึดตัวไปตามแนวยาวเกิดเป็นโครงสร้าง β -pleated sheet แบบ Anti-parallel pleated sheet และกลายเป็น โครงสร้าง 3 มิติ มีแรงระหว่างโมเลกุล คือ พันธะไฮโดรเจนที่บริเวณผลึกของไฟโบรอิน

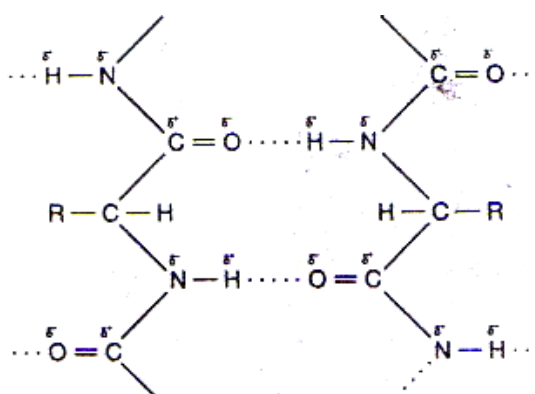
เนื่องจากไฟโบรอินมีสายโซ่โมเลกุลของพอลิเพปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีลักษณะเหยียดยาวยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่อะมิโน จึงทำให้ไฟโบรอินไม่ละลายน้ำ ดังภาพที่ 5 (ชูขวัณ, 2550; สิริรัตน์, 2548ก; เออีอีชี และเจ็มซัย: 2530; Sashina et al., 2006)



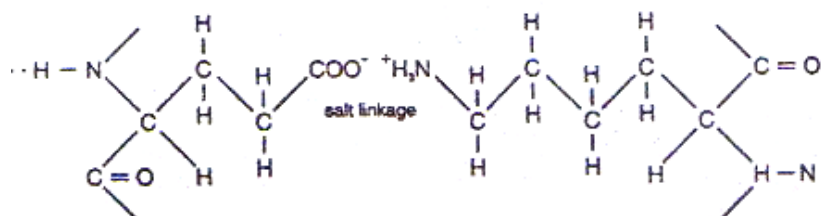
ภาพที่ 4 XRD ของไฟโบรอิน (ซ้าย) และเซรีซิน (ขวา)
ที่มา: เออีอีชี และเจ็มซัย (2530)



(a)



(b)



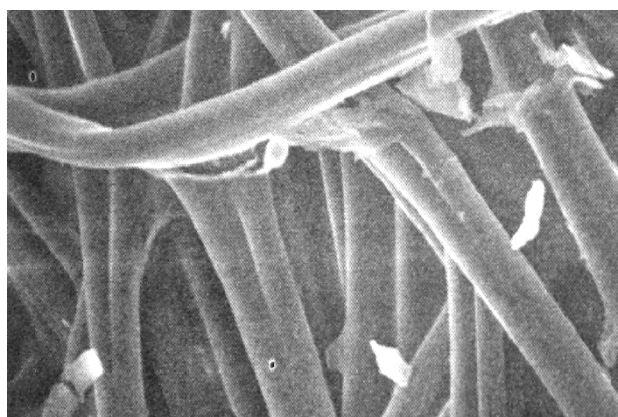
(c)

ภาพที่ 5 พันธะต่างๆ ในสายโปรตีน

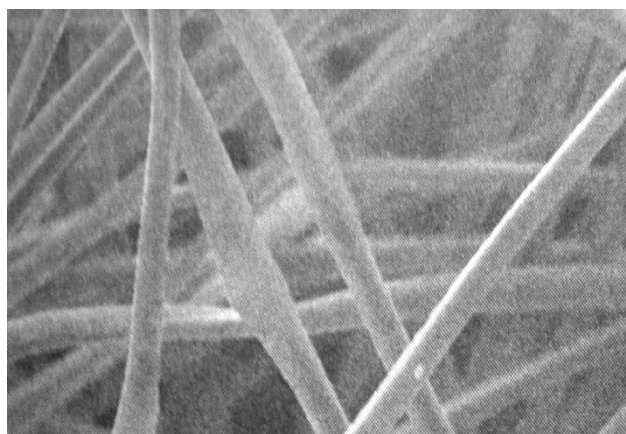
- (a) สายโซ่โมเลกุลพอลิเพปไทด์ของเส้นไหม
- (b) การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีโนของสายโมเลกุลพอลิเพปไทด์ของเส้นไหม 2 โมเลกุล
- (c) การเกิดพันธะไอออนิก หรือ salt linkages ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่เอมีนซึ่งเป็นหมู่ข้างเคียงของสายโซ่โมเลกุลพอลิเพปไทด์ของเส้นไหม

ที่มา: สิริรัตน์ (2548ก)

ส่วนกาวยไหม หรือเซรีซิน จะเป็นกาวเชื่อมเส้นใยไฟโบรอินสองเส้นให้ติดกันดังในภาพที่ 6 องค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นโปรตีนก้อนกลมที่มีกรดอะมิโนชนิดเซอรีนเป็นองค์ประกอบหลัก อยู่ในช่วง 16-38 เปอร์เซ็นต์แล้วแต่ชนิดของรังไหมแต่ละพันธุ์ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเปปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าไฟโบรอินจึงทำให้คุณสมบัติละลายได้ในน้ำร้อน นอกจากนี้ยังละลายได้เมื่อต้มด้วยสารละลายสบู่ สารซักฟอกสังเคราะห์หรือกรดอินทรีย์ (ชูขวัญ, 2550; สิริรัตน์, 2548ก)



(a)



(b)

ภาพที่ 6 เส้นไหม (a) เส้นไหมติดกันเนื่องจากมีกาวไหมเซรีซินเชื่อม (b) ไฟโบรอินสองเส้นแยกออกจากกัน

ที่มา: ชูขวัญ (2550)

โดยทั่วไปแล้วไหมเลี้ยงจะมีไฟโบรอินประมาณ 70 เปอร์เซนต์ เซรีซิน 20-30 เปอร์เซนต์ เส้นใยจากรังไหม 97 เปอร์เซนต์เป็น โปรตีนบริสุทธิ์ มีส่วนประกอบอื่นเพียงเล็กน้อย เช่น จีฟังก์ คาร์โบไฮเดรต วัตถุประสงค์และสารอนินทรีย์ ฯลฯ (เออีอีชี และ เจ็มซัย, 2530) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของชั้นรังไหมชนิด *Bombyx mori*.

พันธุ์ไหม	ชั้นของรังไหม	ส่วนประกอบ (%)					
		น้ำ	ไฟโบรอิน	เซรีซิน	แอลกอฮอล์	อีเทอร์	เถ้า
N 122 x C 122	ชั้นนอก (30%)	10.69	65.86	31.36	1.44	1.36	0.893
	ชั้นกลาง (64%)	10.24	77.30	20.97	1.03	0.70	0.904
	ชั้นใน (6%)	10.06	73.57	23.78	0.96	1.69	0.922
Shuka x Girei	ชั้นนอก (32%)	10.48	70.48	27.16	1.23	1.13	0.835
	ชั้นกลาง (60%)	10.19	77.51	19.70	1.01	0.78	0.867
	ชั้นใน (8%)	9.52	79.05	18.62	1.09	1.24	0.861
Koishimaru	ชั้นนอก (28%)	10.27	73.25	24.13	1.42	1.20	0.804
	ชั้นกลาง (66%)	9.92	76.49	21.10	1.13	1.28	0.831
	ชั้นใน (6%)	9.96	77.55	20.05	1.01	1.39	0.858

ที่มา: เออีอีชี และ เจ็มซัย (2530)

อรุณี (2548) กล่าวว่า เส้นใยไหมและกาวไหมประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด องค์ประกอบของกรดอะมิโนโปรตีนจากรังไหมแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กรดอะมิโน 18 ชนิดที่เป็นองค์ประกอบในรังไหม

ชนิดกรดอะมิโน	น้ำหนักโมเลกุล	ปริมาณ (%โดยมวล)	ปริมาณ (%โดยมวล)
		ไฟโบรอิน	เซริซิน
Glycine	75.06	44.60	13.49
Alanine	89.09	29.40	5.97
Valine*	117.15	2.20	2.75
Leucine*	131.17	0.53	1.14
Isoleucine*	131.17	0.66	0.72
Phenylalanine*	165.19	0.63	0.53
Methionine*	149.21	0.10	0.04
Tryptophane*	204.23	0.11	0.21
Proline	115.13	0.36	0.68
Tyrosine	181.19	5.17	2.61
Cystine/2	240.30	0.20	0.15
Serine	105.09	12.10	33.43
Threonine*	119.12	0.91	9.74
Aspartic acid	133.10	1.30	16.71
Glutamic acid	147.13	1.02	4.42
Histidine	155.16	0.14	1.30
Lysine*	146.19	0.32	3.30
Arginine	174.20	0.47	3.10

* กรดอะมิโนจำเป็นต่อร่างกาย

ที่มา: Robson (1998)

คุณสมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกายแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 หน้าที่และคุณสมบัติของกรดอะมิโนสำคัญในผงไหม

ชนิดกรดอะมิโนในผงไหม	หน้าที่และคุณสมบัติ
Glycine	ควบคุมระดับคอเลสเตอรอล, ป้องกันและรักษาความดันโลหิตสูง และช่วยเสริมสร้างการทำงานของตับ
Alanine	เป็นแหล่งพลังงานสำคัญต่อเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ สมองและระบบประสาทส่วนกลาง, ผลิต antibodies ที่ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันดีขึ้น และช่วยในกระบวนการทำงานของน้ำตาลและกรดอินทรีย์
Serine	เป็นแหล่งในการสะสมน้ำตาล glucose ในตับ และกล้ามเนื้อ จึงช่วยส่งเสริมระบบการทำงานของ Insulin เป็นการลดน้ำตาลในเลือดซึ่งช่วยในการเผาผลาญไขมันที่สะสมในร่างกาย, ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันแข็งแรงขึ้น และสังเคราะห์กรดไขมันล้อมรอบ nerve fibers
Aspartic acid	ช่วยขับไล่อาการบาดเจ็บและสารพิษแอมโมเนียออกจากร่างกาย
Glutamic acid	ช่วยป้องกันผิวแห้งซึ่งเหมาะที่จะใช้ทำมอยส์เจอไรเซอร์

ที่มา: สถาบันหม่อนไหมแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติ สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์พระบรมราชินีนาถ (2548)

2. การลอกกาไหม

เนื่องจากเส้นไหมไฟโบรอินที่เราเอามาทอผ้า จะมีกาไหมเซรีซินเคลือบอยู่ทำให้เส้นไหมแข็งกระด้าง ไม่เงามัน จึงต้องทำการลอกกาไหมก่อนวิธีลอกกาไหมอาจเลือกได้ทั้งวิธีกายภาพหรือทางเคมี ดังนี้ (สิริรัตน์, 2548ก)

2.1 การลอกกาวไหมด้วยน้ำภายใต้ความดันสูง (High pressure water degumming)

สามารถใช้ น้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำซ้ำๆ 3-4 ครั้ง การต้มไหมนานๆ จะทำให้เส้นไหมเกิดการเสื่อมสลายและไฮโดรไลซิสอย่างช้าๆ ในกรณีนี้หากใช้อุปกรณ์ความดันสูงจะทำให้เส้นไหมเสื่อมสลายหรือถูกทำลาย (degrade) น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม อาจมีการตัดแปรโมเลกุลของโปรตีนเกิดขึ้น

2.2 การลอกกาวไหมด้วยด่าง (Alkaline degumming)

ในการลอกกาวไหมด้วยด่างต้องคำนึงถึงค่าความเป็นกรดเบส และ อุณหภูมิ โดยหากลอกกาวไหมด้วยสารละลายด่างที่ค่าความเป็นกรดเบสมากกว่า 9 กาวไหมจะถูกกำจัดออกอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์หลังจากลอกกาวไหมเพียง 30 นาที อุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรเกิน 90 องศาเซลเซียส เพื่อไม่ให้ไหมเปื่อย อย่างไรก็ตามสารละลายด่างที่ใช้ไม่ควรใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพราะจะทำลายเส้นไหม

2.3 การลอกกาวไหมด้วยกรด (Acid degumming)

ในการลอกกาวไหมด้วยกรดต้องคำนึงถึงค่าความเป็นกรดเบส น้อยกว่า 2.5 หรือระหว่าง 1.5-2 กาวไหมจะถูกกำจัดออกอย่างมีประสิทธิภาพ กรดที่ใช้มักเป็นกรดแรมมากกว่ากรดอินทรีย์ เช่น กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก

2.4 การลอกกาวไหมด้วยสบู่ (Soap degumming)

สบู่ได้ถูกใช้ในการลอกกาวไหมมากกว่า 200 ปีแล้ว ปัจจุบันพบว่าในหลายหมู่บ้านยังมีการใช้วิธีนี้อยู่ การลอกกาวไหมด้วยสบู่ต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยการต้มสารละลายสบู่และควบคุมพีเอช ให้เป็นด่างน้อยๆ เท่านั้นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นไหมไฟโบรอินถูกทำลาย วิธีนี้จะต้องใช้สารละลายสบู่ที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5-2 ชั่วโมงน้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำอ่อนหรือมีการเติมสาร sequestering เพื่อลดความกระด้างของน้ำ เพื่อไม่ให้เกิดโคลสบู่ตกค้างและเปื้อนเส้นไหม

2.5 การลอกกาวยางด้วยเอนไซม์ (Enzymatic degumming)

เอนไซม์ที่ใช้ต้องเป็นเอนไซม์ที่จำเพาะต่อเส้นใย ภาวะที่ใช้ไม่รุนแรง สามารถนำมาใช้แทนสารเคมีได้ ปริมาณที่ใช้ไม่สูงนัก สามารถประหยัดน้ำและพลังงาน นับว่าวิธีการใช้เอนไซม์เป็นทางเลือกใหม่ เอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซ์เซรีซิน ซึ่งเป็นกาวยางที่มีส่วนประกอบหลักเป็นโปรตีนเรียกเฉพาะว่า Proteolytic enzymes ซึ่งก็คือ โปรติเอส (protease) ที่ย่อยสลายโปรตีนนั่นเอง เอนไซม์นี้จะเกาะติดพื้นระเปปไทด์ และเอไมด์แล้วย่อยสลายให้กลายเป็นสายโซ่พอลิเมอร์สั้นๆ และกรดอะมิโน

นอกจากนี้ยังมีวิธีลอกกาวยางด้วยวิธีการต้มด้วยสารซักฟอกสังเคราะห์ (Synthetic detergent degumming) และการลอกกาวยางด้วยการทำให้เกิดฟอง (Foam degumming) อีกด้วย

3. ผงไหม

คือ โปรตีนที่ผลิตมาจากส่วนของใยไหม (ทั้งจากส่วนรังไหมและเส้นไหม) มี 2 ชนิดคือ ผงโปรตีนจากส่วนของกาวยางที่เคลือบอยู่โดยรอบเส้นใยเรียกว่า ผงไหมเซรีซิน และผงโปรตีนจากเส้นใยซึ่งลอกเอากาวยางออกแล้วเรียกว่า ผงไหมไฟโบรอิน (ประทีป และวิฑูรย์, ม.ป.ป.)

ชูวัญ (2550) กล่าวว่า การประยุกต์ใช้โปรตีนไหมในปัจจุบันมี 2 ลักษณะคือ เป็นผงกับเจล ซึ่งอาจมีทั้งผงไหมไฟโบรอินและเซรีซินรวมด้วยกัน หรือแยกเฉพาะเซรีซินหรือไฟโบรอิน วิธีสกัดผงไหมในระดับอุตสาหกรรม

3.1 การทำผงไหมไฟโบรอินสามารถทำได้ 2 แบบ คือ

3.1.1 ผงไหมไฟโบรอินชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ทำได้โดยการนำรังไหมไปต้มด้วยกรดหรือเบสเข้มข้นจนละลายหมด จากนั้นนำมาปรับค่าความเป็นกรดเบสให้เป็นกลาง แล้วจึงนำมาบดให้ละเอียดตามขนาดที่ต้องการ

3.1.2 ผงไหมไฟโบรอินชนิดที่ละลายน้ำได้ เราต้องลอกกาวยางเซรีซินออกมาก่อน จึงค่อยนำไฟโบรอินมาละลายด้วยเกลือที่เป็นกลาง จากนั้นทำการย่อยสารละลายไฟโบรอินด้วยกรด

หรือเบสเข้มข้น แต่วิธีการเหล่านี้อาจเสี่ยงต่อการปนเปื้อนโลหะหนักได้ จึงมีแนวคิดใหม่ที่จะเอาเอนไซม์ไฟโบรอินที่ได้จากน้ำย่อยและน้ำเลือดของไหมมาย่อยไฟโบรอิน

3.2 การทำผงไหมเซริซิน

กระบวนการลอกกาไหมมีอยู่หลายวิธีด้วยกันทั้งการลอกกาด้วยด่าง กรด สบู่ และเอนไซม์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การลอกกาโดยใช้เอนไซม์มีข้อดีคือ ใช้อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการลดพลังงาน ในขณะที่การลอกกาปกตินอกจากใช้ด่างแล้ว ก็ยังใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส อีกประการหนึ่งคือสามารถกำหนดขนาดโมเลกุลของไฟโบรอินและเซริซินได้ เพราะขนาดเป็นตัวระบุคุณสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ ถ้าใช้เอนไซม์จะสามารถควบคุมสถานะและขนาดที่แน่นอนได้ หรือ เมื่อจะเอาไปประยุกต์ใช้กับทางการแพทย์หรือเครื่องสำอางก็จะไม่มีปัญหาเรื่องฤทธิ์กรด-เบส ตลอดจนผลข้างเคียงอื่นๆ

กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2546) กล่าวว่า ในปัจจุบันหลายประเทศโดยเฉพาะญี่ปุ่นและจีนได้มีการศึกษานำเอาวัสดุเหลือใช้จากไหม เช่น เศษไหมที่เกิดขึ้นระหว่างการสาวไหม หรือรังไหมที่ตัดแล้วมาพัฒนาเป็นผงไหมซึ่งเป็นโปรตีนธรรมชาติประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด แล้วนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ใช้ทำเครื่องสำอาง อาหาร และเป็นวัสดุทางการแพทย์ การศึกษานี้ใช้ไหมพันธุ์ลูกผสมต่างประเทศและรังไหมเป็นวัสดุสำหรับผลิตผงไหม นำรังไหมที่ได้ตัดเอาดักแด้กับคราบของหนอนไหมที่อยู่ในรังออก แล้วตัดให้มีขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร จึงลอกกาเซริซินออกด้วยน้ำสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 0.5 % (สัดส่วน 1:100) 2 ครั้ง โดยต้มที่อุณหภูมิที่ 98 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด ผึ่งลมให้แห้งในที่ร่มจะได้สารไหมไฟโบรอิน ต้มสารละลายไหมไฟโบรอินด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 50% (สัดส่วน 1:20) พบว่าละลายได้ช้า จึงต้มสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์ น้ำ และเอทานอล (สัดส่วนของโมลเท่ากับ 1:8:2) ใช้สารไหมไฟโบรอิน 15 กรัมต่อสารละลายผสม 100 มิลลิลิตร เทสารไหมไฟโบรอินที่ละลายแล้วลงใน cellulose membrane tube นำไปไดอะไลซ์ (dialyse) ด้วยน้ำสะอาด 3 วัน จากนั้นทำให้น้ำแข็งและนำเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (freeze dry) แล้วบดด้วยเครื่องบดจะได้ผงไหมมีลักษณะคล้ายแป้งมีสีขาว สัมผัสด้วยมือมีความลื่นมัน ชิมดูไม่มีรสและไม่มีการปนเปื้อน

ผงไหมที่เตรียมได้จากสารละลายของแคลเซียมคลอไรด์ละลายน้ำได้ไม่ดี จึงใช้สารไหมไฟโบรอินละลายในกรดไฮโดรคลอริกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่ากรดเกลือ 1 N ทำให้สารละลายเป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำไปดำเนินการต่อเหมือนดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ได้ผงไหมมีลักษณะคล้ายแป้ง ไม่ขาวเหมือนผงไหมที่เตรียมได้โดยวิธีแรกแต่ละลายน้ำดีกว่า ได้ทำการเตรียมผงไหมไฟโบรอินชนิดละลายน้ำด้วยสารละลายผสมที่มีเกลือแคลเซียมคลอไรด์กับผงไหมที่เตรียมได้จากกรดเกลือ 1 N และ 2 N ผงไหมที่ได้ชนิดแรกมีสีขาว ผงไหมชนิดหลังมีสีขาวออกเหลืองอ่อน เพื่อความปลอดภัยต่อการนำผงไหมไปทำผลิตภัณฑ์อาหาร จึงได้นำผงไหมทั้ง 2 ชนิดไปหาสารปนเปื้อนในผงไหมพบว่า ผงไหมไฟโบรอินที่เตรียมจากกรดเกลือ 1 N หรือ 2 N มีสารปนเปื้อน เช่น ตะกั่ว แคลเซียม โปรท และสารหนูต่ำกว่ามาตรฐานสากล

4. การใช้ประยุกต์ใช้โปรตีนไหม

4.1 เครื่องสำอาง

เซรีซินมีเซอรินสูง หมู่ $-CH_2-OH$ ในเซอริน มีคุณสมบัติในการดูดและรักษาความชุ่มชื้นได้ดี เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ ช่วยป้องกันการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน นั่นคือสามารถต้านอนุมูลอิสระ และใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น ครีมอาบน้ำ สบู่ แชมพู ครีมทาผิว แฮร์โค้ท ลิปสติก ดังภาพที่ 7 จึงมีเซรีซินผสมเพื่อให้ความชุ่มชื้นให้ผิวและเส้นผม หรือเป็นสารป้องกันแสงยูวีจากดวงอาทิตย์ และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไทโรซิเนสซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดฝ้า ป้องกันรอยเหี่ยวย่นของผิวพรรณ ขจัดเซลล์ผิวที่เสื่อม แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย ถ้าเป็นโมเลกุลเล็กจะถูกนำไปใช้ในเครื่องสำอาง แต่ถ้าขนาดโมเลกุลใหญ่จะใช้ทางการแพทย์และอุตสาหกรรม เช่น การปรับคุณภาพเส้นใยผ้า เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ด้านแบคทีเรีย เป็นต้น (อรุณี , 2548; ชูขวัญ, 2550)



ภาพที่ 7 สบู่ผลิตภัณฑ์จากผงไหม

ที่มา: เปิดโลกนวัตกรรมไทย (ม.ป.ป.)

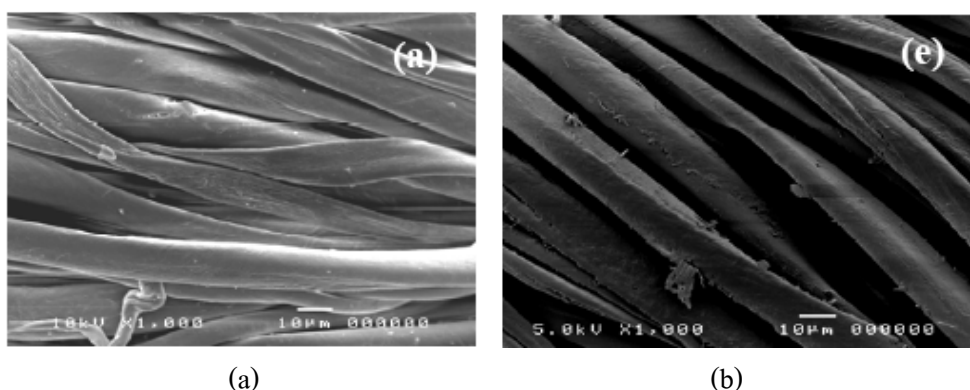
ใช้ไฟโบรอินในการตรึงเอนไซม์ โดยทำเอนแคปซูเลตโปรตีนในไฟโบรอินของไหม เนื่องจากสิ่งสกปรกบนใบหน้าจะถูกล้างได้ด้วยสบู่ แต่สิ่งสกปรกที่เป็นโปรตีนจากผิวหนังที่ตายแล้วไม่สามารถถูกกำจัดได้ด้วยสบู่ ดังนั้นต้องใช้โปรตีนไฮโดรไลซ์สิ่งสกปรกดังกล่าว โดยปกติแล้วเมื่อเวลาผ่านไปแอคติวิตีของโปรตีนจะลดลง โดยเฉพาะเมื่อปล่อยโปรตีนไว้กับสารลดแรงตึงผิวในภาวะเปียก ซึ่งการตรึงเอนไซม์นี้จะช่วยให้โปรตีนมีความคงตัวต่อความร้อน และแอคติวิตีต่อการไฮโดรไลซ์ก็จะมีค่าคงตัวระยะเวลานานขึ้น เนื่องจากไฟโบรอินจะป้องกันโปรตีนจากความร้อนและความชื้นนั่นเอง โดยแอคติวิตีของเอนไซม์เปลี่ยนแปลงไปเพียง 10 เปอร์เซ็นต์หลังจากเก็บไว้ในอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นาน 300 วัน (สิริรัตน์, 2548ข)

4.2 ด้านการแพทย์

เชริซินที่ตัวไหมผลิตออกมานั้นไม่เพียงแต่ทำหน้าที่ยึดไฟโบรอินให้ติดกันเท่านั้น แต่ยังป้องกันการติดเชื้อจุลินทรีย์ให้กับคักแด่ได้ด้วย ดังนั้นเชริซินจึงถูกผสมในวัสดุการแพทย์ เช่น ผ้าพันแผล เพื่อป้องกันเชื้อโรค (อรุณี, 2548)

Kongdee and Chinthawan (2007) ทำการทดลองโดยใช้กลูตาโรลดีไฮด์ (glutaraldehyde) และเชริซินปรับสภาพเส้นใยฝ้าย โดยการทำให้เกิด cross-linked แสดงดังภาพที่ 8 พบว่า เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพมีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปคือกลมมากขึ้นและมีแผ่นฟิล์มเชริซินเคลือบอยู่ นั่น

คือการเพิ่มเซรีซินลงไปทำให้เส้นใยฝ้ายเรียบขึ้น เส้นใยที่ได้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นผ้าก๊อซ (guaze) หรือผ้าปิดแผล เนื่องจากมีคุณสมบัติดูดซับและคายความชื้นได้ดี และไม่ทำลายบาดแผล เวลาแกะผ้าออก



ภาพที่ 8 เส้นใยฝ้าย (a) ที่ไม่ได้ปรับสภาพ (non-treat) (b) ที่ปรับสภาพ (traet) โดยใช้กลูตาโรลดีไฮด์และเซรีซิน

ที่มา: Kongdee and Chinthawan (2007)

ไฟโบรอินนอกจากเอามาทำเป็นเส้นใยทอผ้าแล้ว ความพิเศษอีกอย่างก็คือ มีความคงทนต่อการทำลายของแบคทีเรียและสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อของมนุษย์ได้ดี ในปัจจุบันมีการพัฒนาเส้นใยไฟโบรอินในทางการแพทย์ ซึ่งในต่างประเทศมีการใช้อย่างแพร่หลาย แต่สำหรับประเทศไทยก็มียูบ้าง เช่น เป็นไหมที่ใช้เย็บแผล นอกจากนั้นยังนำมาทำหลอดเลือดเทียม อวัยวะเทียม สับเปลี่ยนเพาะเลี้ยงเซลล์ เป็นยารักษาแผลในปาก เป็นเมทริกซ์ในการตรึงเอนไซม์ ใช้เป็นหนังเทียม และใช้ในระบบส่งยา (drug delivery system) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษามากขึ้น ฯลฯ (ชูขวัญ 2550)

วัสดุตกแต่งบาดแผลที่มีไฟโบรอินและเซรีซินเป็นส่วนประกอบจะทำให้แผลหายเร็วขึ้น ไม่มีผลกระทบต่ออาการเกิดผื่นใหม่เมื่อดึงวัสดุนี้ออกจากบาดแผล ฟิล์มที่ผลิตจากไฟโบรอินและเซรีซินจากไหมมีสมบัติที่คล้ายคลึงกับแก้วตาของมนุษย์มากที่สุดยอมให้ออกซิเจนซึมผ่านได้อย่างดีเยี่ยมดังนั้นจึงเป็นที่คาดหวังว่าในอนาคตฟิล์มดังกล่าวจะสามารถนำไปใช้เป็นกระจกตาเทียมได้ นอกจากนี้ยังใช้โปรตีนจากไหมเป็น HIV Code Protein ซึ่งช่วยให้ประเทศไทยลดการนำเข้าชุดตรวจผู้ป่วยเอดส์จากต่างประเทศ (อรุณี, 2548; ชูขวัญ, 2550; Tsubouchi, 1999)

4.3 อุตสาหกรรมเส้นใย

ใช้เซรีซินผสมกับเส้นใยฝ้ายสำหรับเสื้อผ้าเพิ่มคุณสมบัติในการระบายความชื้น ทำให้เกิดความสบายเมื่อสวมใส่ ลดประจุไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นผิวผ้าได้เมื่ออากาศแห้ง เป็นสารกันยับ ป้องกันกลิ่นอับชื้น ผ้าฝ้ายที่มีเซรีซินเคลือบจะช่วยลดการระคายเคือง โดยเฉพาะกับเด็กและผู้ที่มีผิวแพ้ง่าย และช่วยลดผื่นแดงในบริเวณที่มีการแพ้ของผู้สวมใส่ได้ (อรุณี, 2548)

อภิชาติ (2551) กล่าวว่า กาวไหมเป็นของเหลือทิ้งที่ได้จากการลอกเส้นไหมดิบ และมีอยู่ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเส้นไหม จึงสนใจนำกลับมาใช้ประโยชน์กับสิ่งทอ โดยทดลองบดเป็นผงละเอียดซึ่งมีสีเหลืองนวล และตรวจวิเคราะห์ พบว่ามีคุณสมบัติเดียวกับผงไหมราคาแพง คือ ช่วยให้ผิวหนังชุ่มชื้น ดูดซับความชื้นได้ดี ทั้งยังช่วยสมานแผลและฆ่าเชื้อโรคได้ด้วย อนุภาคที่ได้มีขนาด 800 นาโนเมตร เมื่อวิเคราะห์หาสารปนเปื้อนประเภทโลหะหนัก พบว่า ไม่พบแคดเมียมและสารหนูแต่มีปรอทและตะกั่วอยู่เล็กน้อย ซึ่งคาดว่าน่าจะปนเปื้อนมาจากหม้อต้มในขั้นตอนการต้มเส้นไหมดิบเพื่อแยกกาวไหม จากนั้นนำมาทดลองโดยนำสารละลายผงกาวไหม 1 เปอร์เซ็นต์ไปบีบอัดแล้วเคลือบบนเส้นใยโพลีเอสเตอร์และนำไปตัดเย็บเป็นเสื้อกีฬา เมื่อทดสอบคุณสมบัติของเสื้อพบว่า เสื้อจากผ้าผสมผงกาวไหมสวมใส่สบาย เนื่องจากดูดซับเหงื่อและความชื้นได้ประมาณ 10-12 เปอร์เซ็นต์ซึ่งดีกว่าเสื้อผ้าโพลีเอสเตอร์ทั่วไปที่ดูดซับความชื้นได้เพียง 0.4 เปอร์เซ็นต์ ทั้งยังให้ความรู้สึกถึงผิวหนังที่ชุ่มชื้นเมื่อเทียบกับการสวมเสื้อกีฬาทั่วไป ปัจจุบันผู้วิจัยกำลังเสนอจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระบวนการผลิตผงกาวไหมอนุภาคนาโนและจะขยายสู่เชิงพาณิชย์ ซึ่งจะต้องศึกษาเพิ่มถึงเทคนิคการผลิตผงกาวไหมได้ในปริมาณมาก จากปัจจุบันที่สามารถผลิตได้ 200-300 กรัมต่อวัน ทั้งยังต้องทำให้ได้ในราคาถูก และที่สำคัญต้องคงคุณภาพของผงกาวไหมและเสื้อผ้าเคลือบผงกาวไหมให้เหมือนเดิมทุกครั้งหลังผ่านการซักล้างทั้งนี้

4.4 การประยุกต์ใช้เป็นวัสดุที่สลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable material)

ในการทำวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นจะใช้เซรีซินเป็นวัตถุดิบที่นำไปผสมกับเซรีซิน โดยให้เกิดปฏิกิริยากันระหว่างสารละลายของเซรีซินหรือผงเซรีซินกับสารละลายพอลิออล (Polyol) ซึ่งจากปฏิกิริยาก็จะเกิดความร้อนและแก๊สขึ้นตามกระบวนการผลิตวัสดุพอลิเมอร์หรือโฟมทั่วไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกจากจะย่อยสลายได้ทางชีวภาพตามจุดประสงค์ของการผลิตแล้ว ยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดียิ่งกว่าผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากเซรีซินหลายเท่า และ

นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลและทางความร้อนได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น ภาชนะบรรจุอาหารชนิดต่างๆ (Zhang, 2002)

4.5 การประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเยื่อแผ่น (Membrane material)

เซรีซินมีสมบัติเหมาะสมในการแยกสาร นั่นคือมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (semipermeable membrane) จากสมบัตินี้จึงได้มีการวิจัยเพื่อไปผสมในยาแคปซูล เพื่อให้เซรีซินทำหน้าที่ปลดปล่อยตัวยาออกสู่ร่างกายในปริมาณที่ต้องการ (control release) จะได้ไม่ต้องทำตารางยาหรือกินยาบ่อยๆ นอกจากนี้ยังใช้เซรีซินและไฟโบรอินสามารถที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือเป็นพอลิเมอร์ร่วมกับสารชนิดอื่นได้ จากคุณสมบัติของโปรตีนไหมที่มีความสามารถในการดูดซับความชื้นของกรดอะมิโนจำนวนมากที่มีหมู่ของไฮโดรฟิลิก ดังนั้นการใช้งานของเยื่อแผ่นที่มีส่วนประกอบของโปรตีนไหมจึงเหมาะที่จะนำไปใช้ เช่น การแยกแอลกอฮอล์จากสารละลายที่มีน้ำผสมกับแอลกอฮอล์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น (อรุณี, 2548; Zhang, 2002)

4.6 ใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials)

โปรตีนจากไหมสามารถนำไปผลิตเป็นวัสดุทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านการตกตะกอน (anticoagulant) โดยนำไฟโบรอินและเซรีซินของไหมมาทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (sulphonation) ด้วยการเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ความเข้มข้น 10-90 เปอร์เซ็นต์ หรือ 0.5-500 เท่าของปริมาณของไฟโบรอินหรือเซรีซินที่สกัดได้ และทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชันที่อุณหภูมิ 20-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหลายชั่วโมง สารต้านการตกตะกอนที่ได้จากปฏิกิริยานี้มีศักยภาพพอที่จะใช้แทน heparin ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่พบในเนื้อเยื่อปอดและตับมีสมบัติทำให้เลือดแข็งตัวช้า นอกจากนี้สารต้านการตกตะกอนดังกล่าวนี้ยังสามารถนำมาใช้ในยาสีฟันและครีมโกนหนวดเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อ HIV (สิริรัตน์, 2548ข)

เซรีซินผสมกับพอลิเมอร์ที่ละลายได้ดีในน้ำ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) พบว่าฟิล์มที่ได้จะมีโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี โดยเซรีซินที่มีมวลโมเลกุลมากนี้สกัดได้จากนารังไหมไปต้มในน้ำเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปผสมกับ PVA (91 kDa) แล้วนำไปทำเป็นแผ่นฟิล์มโดยเทลงบนจานพลาสติก แล้วอบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Ishikawa et al, 1987)

4.7 ผงซักฟอก

ไฟโบรอินจากรงไหมใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผงซักฟอกที่มีประสิทธิภาพ ภาพสูง เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายสิ่งสกปรกได้ดี เพราะมีส่วนช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมี (สิริรัตน์, 2548ข)

4.8 สารเคลือบผิว

การใช้ฟิล์มที่เคลือบด้วยเซริซินเคลือบไปบนพื้นผิวของตู้เย็น เครื่องทำความเย็น รถตู้ คอนเทนเนอร์ เรือที่มีห้องเย็น ก็เนื่องมาจากฟิล์มดังกล่าวมีสมบัติในการต้านการแข็งตัวของน้ำแข็ง (anti-frosting) ยิ่งกว่านั้นการใช้สารเคลือบผิวดังกล่าวเคลือบถนนหรือหลังคาก็สามารถป้องกันการกัดทำลายของน้ำแข็งและทำให้กำจัดหิมะได้ง่าย (สิริรัตน์, 2548ข; Tanaka, 2001)

ผงไหมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่างแล้วคให้เป็นผงขนาด 5 ไมครอนจากนั้นผสมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ปากกาลูกกลิ้งที่เคลือบด้วยผงไหมมีการวางตลาดแล้ว นอกจากนี้ในอนาคตคาดว่าจะมีการนำไปใช้สำหรับอุปกรณ์รถยนต์ (สิริรัตน์, 2548ข)

4.9 อุตสาหกรรมอาหาร

ไฟโบรอินในรูปผงไหมมีรสหวานเปรี้ยว และมีกลิ่นหอม ผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้โปรตีนไหมดังกล่าว เช่น ลูกกวาด ของหวาน บะหมี่ เต้าหู้ และน้ำ ได้มีการวางตลาดแล้ว (สิริรัตน์, 2548ข)

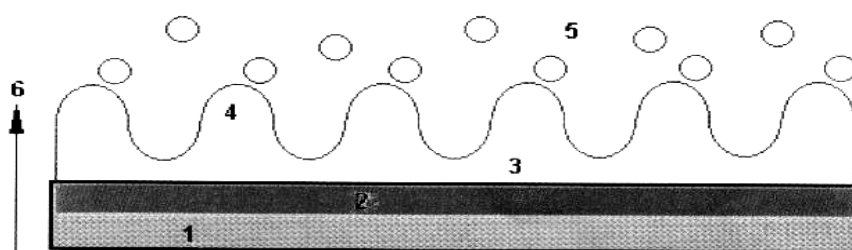
สเปรย์ไฟโรลิสซิส

1. ตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic nebulizer)

วัตถุประสงค์ของการทำละออง คือทำให้สารที่ป้อนกลายเป็นเม็ดเล็กๆ จำนวนมาก เพื่อที่เม็ดของเหลวจะถูกทำให้แห้งภายในเวลาสั้น ตัวทำละอองที่ใช้มีหลายชนิด เช่น หัวพ่นความดันสูง หัวพ่นแบบของไหลคู่ และจานหมุนความเร็วสูง ทั้งสามชนิดสามารถทำเม็ดของเหลวได้มีขนาดในช่วง 2-500 ไมครอน (ไพศาล, 2542) นอกจากนี้ยังมีตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิกอีกด้วย

การทำละอองของตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิคจะอาศัยหลักการของความถี่สูง โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการกำเนิดความถี่สูง แล้วส่งสัญญาณความถี่สูงไปตามสาย ส่งที่เชื่อมต่อกับหัวที่ใช้ในการทำละออง ซึ่งที่บริเวณหัวตัวทำละอองจะเป็นตัวที่สัมผัสกับของเหลวที่ต้องการทำละอองตามกลไกการเกิดละอองในภาพที่ 9 และจากนั้นละอองก็จะถูกพ่นออกมาดังลักษณะในภาพที่ 10 ซึ่งการสั่นแบบความถี่สูงจะช่วยให้การกระจายตัวของหยดของเหลวที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่ต่ำ และได้หยดของเหลวที่มีขนาดเล็ก สามารถนำไปใช้ในทิศทางที่ต้องการได้ง่าย โดยใช้อุปกรณ์ช่วยอื่นๆ สามารถที่จะทำละอองได้แม้กับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงและสารที่มีความแตกต่างกันระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายมาก เช่น สารละลายชั้นบางๆ ที่มีตัวถูกละลายตกตะกอนอยู่ที่ผิวหน้า ถือว่าเป็นเทคนิคการทำละอองที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานที่หลากหลาย แต่ราคาจะสูงกว่าตัวทำละอองที่ใช้หลักการของแรงดัน (วันกวี, 2549)

สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคมมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทาง ทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง เรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่ง ยิ่งคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้น เช่น คลื่นความถี่ 300 เฮิรตซ์ ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรเศษๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ทำให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมากมาย คลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่นแต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิค อย่างเช่น 40 กิโลเฮิรตซ์ จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มิลลิเมตร เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มากคลื่นเสียงจะไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบ ๆ หรือที่เราเรียกว่า มีทิศทาง



ภาพที่ 9 กลไกการทำละอองจากคลื่นความถี่สูง (1) Oscillating element (2) Glass plate (3) Liquid (4) Capillary waves (5) Aerosol (6) Ultrasound

ที่มา: วันกวี (2549)



ภาพที่ 10 เครื่องฟั่นละอองแบบอัลตราโซนิก

ที่มา: วันกวี (2549)

2. การแยกสลายด้วยความร้อนแบบสเปรย์หรือสเปรย์ไพโรลิซิส (SP)

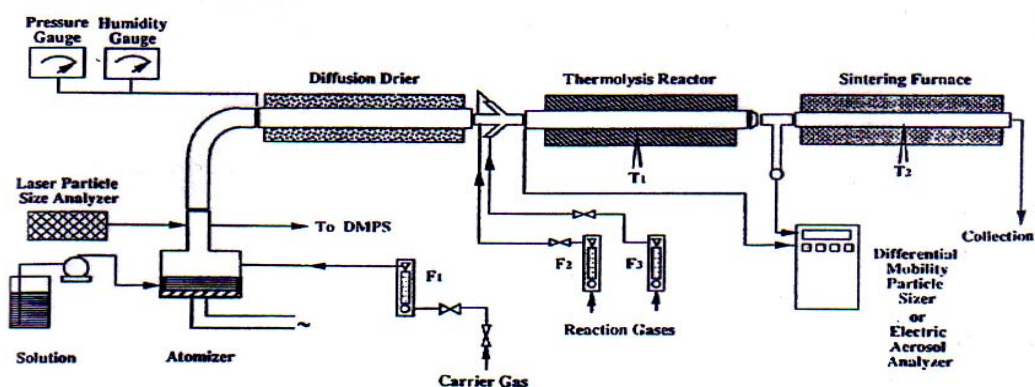
ไพศาล(2542) กล่าวว่า การแยกสลายด้วยความร้อนแบบสเปรย์ เรียกว่า “กระบวนการ เอสพี” เป็นกระบวนการที่รวบรวมขั้นตอนการตกตะกอน การแตกตัวด้วยความร้อนการทำคัล)

(ไชน์และการเผาผนึกเข้าด้วยกัน ขั้นตอนทั้งสามเกิดเรียงตามลำดับ จากอุณหภูมิต่ำไปสูงภายใน เครื่องปฏิกรณ์ที่เรียงต่อกัน ดังภาพที่ 11 กระบวนการเริ่มจากการทำหยดสารละลายแล้วผ่านการ ระเหยตัวทำละลายจนเกิดการตกตะกอนภายในหยดสารละลาย การทำแห้งของอนุภาคของแข็ง การสลายตัวด้วยความร้อนของอนุภาคของแข็งและก่อรูปเป็นอนุภาคที่มีรูพรุน ซึ่งในที่สุดจะถูก กำจัดรูพรุนกลายเป็นอนุภาคทรงกลมตันด้วยกระบวนการเผาผนึกดังแสดงในภาพที่ 12 ในระหว่าง กระบวนการ ขั้นตอนของกระบวนการมีดังนี้

2.1 การตกตะกอนภายในหยดสารละลาย : สำหรับหยดสารละลาย การระเหยตัวทำ ละลายจะเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย และทำให้เกิดการตกตะกอนภายในหยดสารละลาย

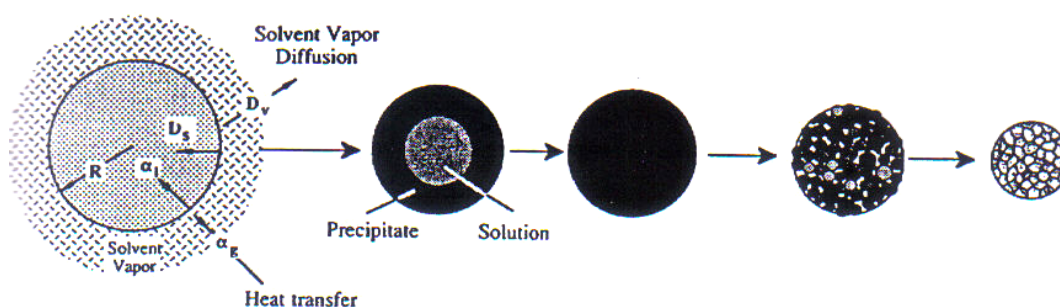
2.2 การสลายตัวด้วยความร้อน : ส่วนที่ให้ความร้อนแก่อนุภาคอาจเป็นเตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace) หรือเตาเผาพลาสมาทั้งแบบคลื่นความถี่วิทยุ(RF) และไฟฟ้ากระแสตรง (DC) อนุภาคที่ผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนจะมีความว่องไวสูง จึงง่ายในการเผาผนึกในขั้น ต่อไป

2.3 การเผาผนึก : อนุภาคจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ปกติแล้วระยะเวลาจะสั้นทำให้โอกาสที่อนุภาคจะเชื่อมติดกันมีน้อย และอนุภาคที่มีขนาดในช่วงไมโครเมตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การติดต่ำ โดยปกติแล้วอุณหภูมิในการเผาผนึกจะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของอนุภาคโอกาสที่อนุภาคจะเพิ่มความหนาแน่นด้วยการหลอมเหลวก็จะต่ำ แต่สำหรับการเผาผนึกที่อาศัยการหลอมเหลวของอนุภาคจะเกิดปัญหาเรื่องการเกาะตัวเป็นก้อนของอนุภาคได้



ภาพที่ 11 ชุดเครื่องปฏิกรณ์เอสพี

ที่มา: ไพศาล (2542)



ภาพที่ 12 ขั้นตอนของกระบวนการเอสพี

ที่มา: ไพศาล (2542)

3. ข้อดีของกระบวนการเอสพี

กระบวนการเอสพี เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการผลิตอนุภาคผงขนาดเล็ก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง สามารถทำอนุภาคผงที่มีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตรได้ อนุภาคที่ได้มีลักษณะพื้นฐานเป็นทรงกลมที่มีการกระจายตัวของขนาดแคบ อนุภาคที่ได้ไม่เกาะรวมตัวกัน และไม่ต้องผ่านกระบวนการบดให้เป็นผง อีกทั้งยังเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ง่ายต่อการดำเนินการ และสามารถใช้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้ (Ju et al., 2006; Ko et al., 2006; Chen et al., 2006; Hong et al., 2007)

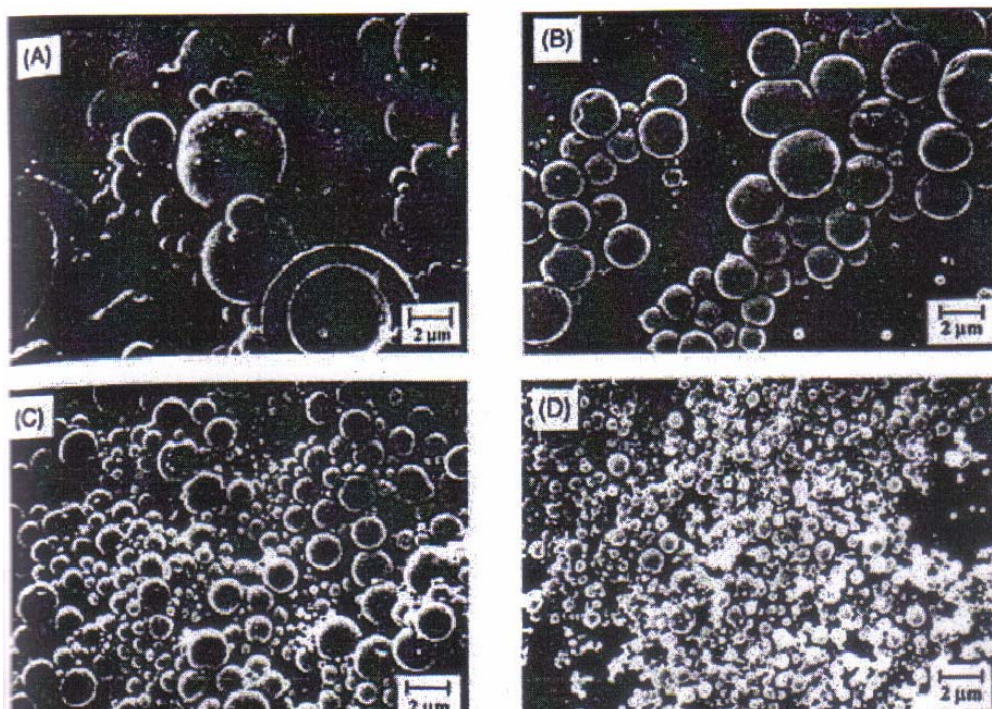
4. การประยุกต์ใช้กระบวนการเอสพี

กระบวนการเอสพี สามารถสังเคราะห์อนุภาคผงที่มีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีตามที่ต้องการได้ดังนี้ (ไพศาล, 2542)

4.1 การสังเคราะห์อนุภาคทรงตัน

ใช้ในงานทางด้านเซรามิกส์ขั้นสูง ลักษณะผงเซรามิกส์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตควรมีความบริสุทธิ์เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) สูง มีความหนาแน่นสูงมีขนาดเล็ก มีรูปร่างสมมาตร และไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อนซึ่งลักษณะเหล่านี้สามารถทำได้ด้วยกระบวนการเอสพี ยกเว้นเรื่องปัญหาเรื่องการเกิดรูกลวงหรือเปลือกของแข็ง ส่วนปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการเกิดรูกลวงของอนุภาคได้แก่

ความอึดตัวสัมพัทธ์ของตัวละลายในหยดสารละลาย สารละลายที่มีความอึดตัวสัมพัทธ์เริ่มต้นต่ำจะทำให้อนุภาคทรงกลมตันที่มีขนาดเล็กต่างจาก สารละลายที่มีความอึดตัวสัมพัทธ์สูงที่ให้อนุภาคนาโนใหญ่ที่มีรูกลวงและมีชั้นเปลือกของแข็ง ดังภาพที่ 13 ซึ่งอนุภาคที่ได้จากการนำสารละลายเซอร์โคเนียไฮดรอกไซด์ (ZHC) ที่มีความอึดตัวสัมพัทธ์เริ่มต้น 0.009 ถึง 1.4 (อึดตัวยิ่งยวด) ไปทำเป็นหยดด้วยหัวพ่นของไหลคู่ในเตาเผาอุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส ที่ความอึดตัวสูงอนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่และมีรูกลวง (ภาพที่ 13 A, B) ขณะที่ความอึดตัวต่ำ อนุภาคเป็นทรงกลมตันขนาดเล็กกว่า (ภาพที่ 13 C, D)



ภาพที่ 13 รูปร่างอนุภาคที่ได้จากสารละลาย ZHC ที่ความเข้มข้นตัวสัมพัทธ์แตกต่างกัน (A) 0.35 (B) 0.088 (C) 0.018 (D) 0.009

ที่มา: ไพศาล, 2542

อัตราการระเหย เมื่อต้องการให้เกิดการตกตะกอนสม่ำเสมอภายในหยดสารละลายเพื่อให้ได้อนุภาคทรงตัน ควรควบคุมอัตราการระเหยให้ต่ำ เพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้นภายในหยดสารละลายก่อนที่จะถึงจุดที่เกิดการตกตะกอน และควรใช้อุณหภูมิต่ำกว่าหรือเท่ากับจุดเดือดของตัวทำละลาย

ขนาดเริ่มต้นของหยดสารละลายที่ได้จากเครื่องทำละออง หยดสารละลายที่มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มจะเกิดขนาดของอนุภาคของแข็งแบบมีรูกลวง หรือเกิดเปลือกของแข็งมากกว่าหยดสารละลายที่มีขนาดเล็ก

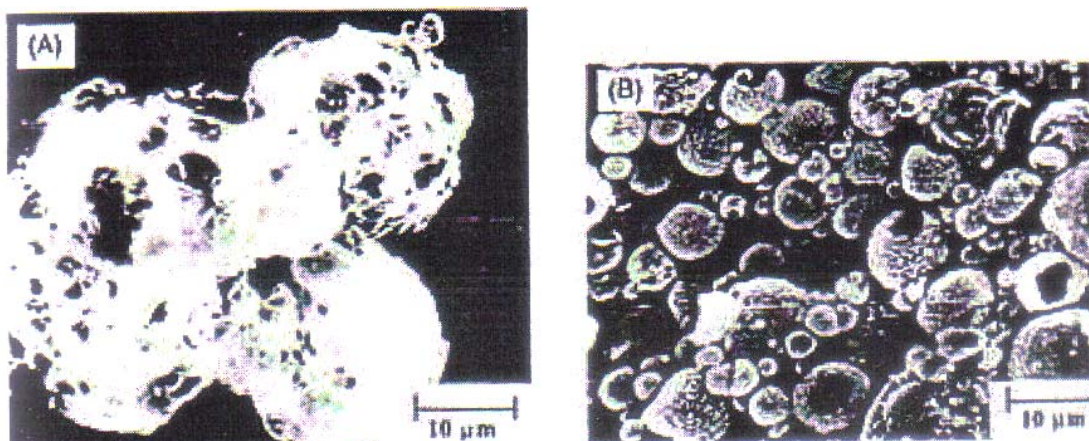
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหยดสารละลาย หยดสารละลายที่มีความเร็วสูงจะใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์สั้น ดังนั้นต้องระเหยตัวทำละลายด้วยความเร็วสูง ซึ่งนำไปสู่การเกิดรูกลวงหรือเปลือกของแข็งได้ง่าย

ผลของอุณหภูมิต่อสภาพการละลายได้ของสารละลายตั้งต้น สำหรับเกลือที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของสภาพการละลายได้ (Temperature Coefficient of Solubility) เป็นบวก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความอิ่มจะสูงขึ้นไปด้วย ทำให้การตกตะกอนของเกลือถูกระงับให้เกิดล่าช้าออกไป โอกาสที่จะเกิดอนุภาคทรงตันจะมีมาก

ในการควบคุมกระบวนการเพื่อให้ได้อนุภาคทรงตัน ตัวละลายที่เลือกใช้ควรมีเป็นตัวละลายที่มีความอิ่มตัวยิ่งยวดวิกฤตต่างจากค่าความอิ่มตัวสมดุลมากๆ มีสภาพละลายได้สูง และมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของสภาพการละลายได้ (Temperature Coefficient of Solubility) เป็นบวก ส่วนของแข็งที่ตกตะกอนควรมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ และต้องใช้ตัวทำละลายที่ให้เม็ดสารละลายขนาดเล็ก และมีความเร็วต่ำ เช่น เครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิก

4.2 การสังเคราะห์อนุภาครูพรุน

อนุภาครูพรุนหรืออนุภาคกลวงใช้ทำเป็นฉนวนความร้อน หรือตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา การทำให้ได้อนุภาครูพรุนควรเลือกใช้ตัวทำละลาย และการควบคุมสภาวะของกระบวนการใช้ตรงข้ามกับกรณีแรก เช่น ใช้เกลือโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์ Al_2O_3 จากสารละลาย $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เมื่อความเข้มข้นที่ผิวของหยดสารละลายเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความอิ่มตัวยิ่งยวดวิกฤต จะเกิดเปลือกของแข็งขึ้น ที่อุณหภูมิ 76 องศาเซลเซียส อนุภาค $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ละลายในน้ำส่วนที่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้อนุภาคอยู่ในรูปที่หลอมเหลวและปล่อยแก๊สไนโตรสออกไซด์ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 76 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำในหยดสารละลายถูกระเหยเพิ่มมากขึ้น มีผลให้ความหนืดของ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ เพิ่มมากขึ้น และเกิดฟองอากาศขึ้นภายในอนุภาค (ภาพที่ 14A) นอกจากนั้นการเติมตัวทำฟอง (Foaming Agent) ตัวอย่างเช่น เอทิลีนไกลคอล ลงในสารละลายก็สามารถทำให้เกิดรูพรุนในเม็ดของแข็งได้เช่นกัน (ภาพที่ 14B) โดยเอทิลีนไกลคอลจะเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 198 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งรูพรุนไว้ในเม็ดของแข็ง



ภาพที่ 14 (A) อนุภาครูพรุน Al_2O_3 เตรียมจาก $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$

(B) อนุภาครูพรุน ZnO เตรียม จาก $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 15$ เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก Polyethleneglycol

ที่มา: ไพศาล, 2542

4.3 การสังเคราะห์อนุภาคเชิงประกอบ

เมื่อพิจารณาจากลักษณะสมบัติของสารตั้งต้น สามารถจำแนกการสังเคราะห์อนุภาคเชิงประกอบได้ 4 ประเภท คือ

4.3.1 การตกตะกอนร่วมตามลำดับ (Sequential Coprecipitation) ถ้าตัวละลายในสารละลายตั้งต้นมีสภาพละลายได้แตกต่างกันมาก ตัวละลายที่สภาพละลายได้ต่ำกว่าจะตกตะกอนก่อน ส่วนตัวทำละลายที่สภาพละลายได้สูงกว่าจะตกตะกอนบนผิวของอนุภาคตัวแรกด้วยกลไกแบบวิวิธพันธุ์ ทำให้อนุภาคเชิงประกอบประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ของตัวละลายตัวแรกล้อมด้วยผลิตภัณฑ์เล็กๆ ของตัวละลายตัวที่สอง ตัวอย่างเช่น อนุภาคเชิงประกอบอลูมินา/แพลตตินัม สังเคราะห์จากสารละลายของ 0.5 โมลต่อลิตรของ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ H_2PtCl_6 (มี Pt 2.5 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก) ที่ 950 องศาเซลเซียส ผงที่ได้ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ทรงสี่เหลี่ยมขนาด 4-5 นาโนเมตร ของแพลตตินัมกระจายตัวเป็นพื้นผิวของอนุภาคทรงกลมขนาด 400 นาโนเมตร ของ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

4.3.2 การตกตะกอนพร้อมกัน (Simultaneous Coprecipitation) เมื่อตัวทำละลายมีสภาพละลายที่ใกล้เคียงกัน ตัวทำละลายทั้งสองจะตกตะกอนพร้อมกันหรือในช่วงเวลาที่ใกล้เคียง

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

4.3.3 การตกตะกอนของสารละลาย- คอลลอยด์ (Colloid-Solution Precipitation) เป็นระบบลูกผสมระหว่างสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ คอลลอยด์ และสารละลายของเกลือโลหะ หรือ สารอินทรีย์โลหะ ตัวอย่างเช่น อนุภาคเชิงประกอบ λ - Al_2O_3 /แพดตินัม สังเคราะห์จากสารละลาย H_2PtCl_6 ผสมกับโซลโบฮีไมท์ (Boehmite) ที่ค่าความเป็นกรดเบส 3

4.3.4 การตกตะกอนแบบเหนี่ยวนำ (Vapor-phase Induced Precipitation) มีเกลือของ โลหะบางชนิด โดยเฉพาะเกลือของโลหะทรานซิชันที่ตกตะกอนได้ง่ายในรูปของไฮดรอกไซด์ หรือ ไฮดรอกไซด์ เมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรดเบสเปลี่ยนไป จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (ANN) มีจุดหลอมเหลวต่ำ และเป็นเหตุให้เกิดรูกลวงและรูปร่างผิดปกติของ อนุภาค Al_2O_3 ที่ได้ วิธีหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหานี้คือ เติม NH_3 เข้าไปในกระแสแก๊ส ตัวพาท่อนที่อนุภาค จะมีอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวของ ANN NH_3 จะละลายไปในหยดสารละลายทำให้พีเอชเพิ่มขึ้น เป็น 7 และเกิดปฏิกิริยากับ ANN เป็น $\text{Al}(\text{OH})_3$ ตกตะกอนภายในหยดสารละลาย

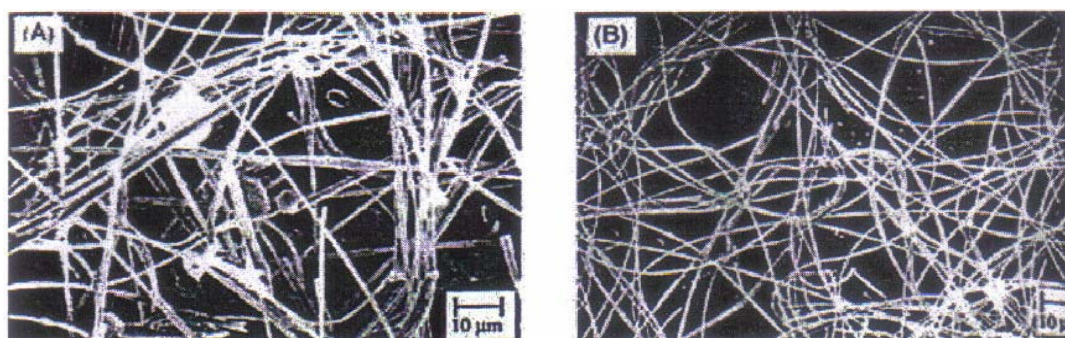
4.4 การสังเคราะห์เส้นใย

กระบวนการเอสพีสามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เส้นใยที่ไม่ต่อเนื่องได้ ด้วยการควบคุมความหนืด แรงตึงผิว และความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นให้เหมาะสม พร้อมกับการใช้ เครื่องทำละอองแบบของไหลสองชนิด สารละลายตั้งต้นที่มีลักษณะสมบัติเหมาะสมเมื่อถูกดันผ่าน หัวฉีดของเครื่องทำละอองจะยืดตัวออกเป็นเส้น เพื่อรักษารูปร่างที่เป็นเส้นใยไว้จำเป็นต้องมีกลไก ทั้งด้านกายภาพและด้านเคมีมาช่วย มิฉะนั้นเส้นใยจะเสียรูปร่างและกลายเป็นหยดของเหลวที่สุด เช่นต้องรีบกำจัดตัวทำละลายให้เร็วที่สุดก่อนที่เส้นใยจะไหลเข้าสู่ส่วนเตาเผา

สำหรับสารละลายที่มีความหนืดต่ำ อัตราส่วนระหว่างแรงตึงผิวกับความหนืดของสารตั้งต้นเป็นตัวกำหนดกลไกการเกิดเส้นใย ตัวอย่างเช่น การเตรียมเส้นใยเซอร์โคเนียจากสารละลาย เซอร์โคเนียมอะซิเตรท ($\text{Zr}(\text{CH}_3\text{COO})_4$, ZAC) ซึ่งมี ZrO_2 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมพอลิไว

นิลแอลกอฮอล์ (PVOH) 6 เปอร์เซ็นต์ 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 15 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วน γ/η ลดลงเส้นใยที่ได้จะยาวขึ้นและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง

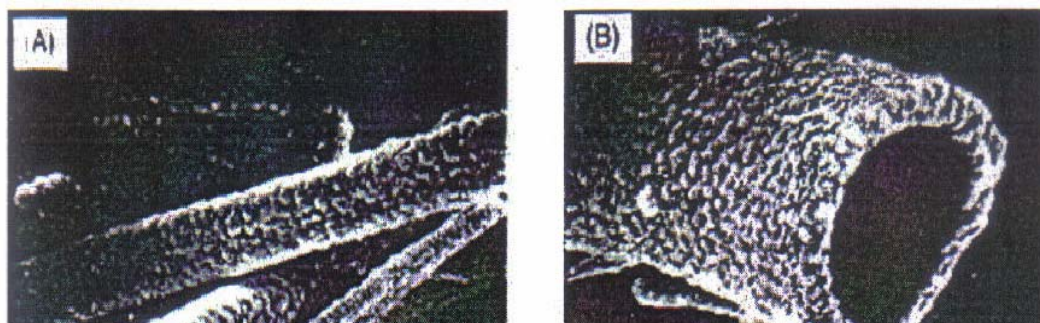
นอกเหนือจากการช่วยลดอัตราส่วน γ/η แล้ว PVOH ยังทำหน้าที่เป็นโครงร่างระหว่างการแข็งตัวของเส้นใย โดยเข้ายึดเกาะกับเกลียวของโลหะในสารละลาย ในทำนองเดียวกับการสังเคราะห์อนุภาคผงที่มีรูกลวง นอกจากนั้นยังสามารถสังเคราะห์เส้นใยกลวงได้โดยการควบคุมภาวะการเตรียมและคุณสมบัติของสารละลายตั้งต้น ถ้าใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ใช้อัตราส่วนการไหลต่ำ และอัตราการให้ความร้อนต่ำจะทำให้ได้เส้นใยทรงตัน ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 16A ถ้าเริ่มต้นด้วยความเข้มข้นสูง พร้อมกับเลือกใช้อัตราการไหลสูง และให้ความร้อนเร็ว เส้นใยที่ได้จะมีรูกลวง ดังภาพที่ 16B



ภาพที่ 15 ผลของการใช้สารตึงผิวต่อการขึ้นรูปเส้นใย ZAC

(A) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (B) เติมสารลดแรงตึงผิว

ที่มา: ไพศาล, 2542



ภาพที่ 16 เส้นใยเซอร์โคเนียเตรียมจาก (A) ZAC+6 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก PVOH มี ZrO_2 24.8 เปอร์เซนต์ (B) ZAC+6 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก PVOH มี ZrO_2 25.3 เปอร์เซนต์
ที่มา: ไพศาล, 2542

4.5 การสังเคราะห์แผ่นฟิล์ม

กระบวนการเอสพีสามารถใช้สังเคราะห์แผ่นฟิล์ม เคลือบบนผิววัตถุขนาดใหญ่ที่ไม่เป็นระนาบแบน อย่างเช่น เส้นลวดได้เป็นอย่างดี โดยมีข้อดีในแง่ความง่ายของกระบวนการและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น อย่างเช่น การเคลือบผิวภายใต้ภาวะสูญญากาศ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ การทำแผ่นฟิล์มสารกึ่งตัวนำประเภทออกไซด์ ชัลไฟด์ และเซเลไนต์ โดยมีความหนาแน่นระหว่าง 0.2 ถึง 1 ไมโครเมตร และแผ่นฟิล์มสารตัวนำไฟฟ้ายิ่งยวด

ขั้นตอนการเคลือบผิว เริ่มจากสารละลายตั้งต้นถูกพ่นออกมาเป็นละอองหยดเล็กๆ แล้วตกลงบนผิวของตัวรองรับที่ถูกทำให้ร้อน หยดสารละลายจะถูกระเหยตัวทำละลายออกด้วยความร้อนที่ถ่ายโอนมาจากตัวรองรับจนกลายเป็นอนุภาคของแข็ง ต่อเนื่องด้วยการสลายตัวและการเผาผลาญหรือหลอมเหลวบนผิวของตัวรองรับนั้น ตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิของตัวรองรับ อัตราการไหลของแก๊สตัวพา อัตราการไหลของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ขนาดของหยดสารละลาย และระยะห่างระหว่างตัวทำละลายกับผิวหน้าของตัวรองรับ สภาพที่ดีที่สุดในการเคลือบผิว คือ สภาพที่หยดสารละลายตกลงบนผิวตัวรองรับพอดีกับที่ตัวทำละลายถูกระเหยหมด

อุณหภูมิที่ผิวของตัวรองรับเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะมีผลต่อการทำแห้งหยดสารละลาย การสลายตัวของเกลือโลหะ การเผาผลาญ การหลอมเหลว การกลายเป็นผลึก และการโตของเกรน

ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้จะมีผลต่อเนื่องไปยังคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้ นอกจากนั้นขั้นตอนการทำการละอองก็เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง เพราะการเกิดแผ่นฟิล์มบนตัวรองรับขึ้นอยู่กับรูปแบบของการตกของหยดสารละลายบนผิวตัวรองรับ อัตราเร็วของการทำระเหยตัวทำละลาย และปฏิกิริยาที่เกิดภายในหยดสารละลาย ซึ่งทั้งหมดนี้สัมพันธ์กับขนาดหยดสารละลายที่ทำขึ้น และความเร็วของหยดสารละลายที่ออกจากหัวพ่น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิลาลินี (2548) ศึกษาโปรตีนในนมที่ผ่านขบวนการให้ความร้อนซ้ำหลายครั้งในขบวนการผลิตนมทางอุตสาหกรรม โดยให้ความร้อนแก่นมในระดับอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส และ 85 องศาเซลเซียส ระดับละ 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที จากนั้นนำมาทำการศึกษาโปรตีนโดยเทคนิค Sodium dodecylsulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) ซึ่งจะแยกโปรตีนตามน้ำหนักโมเลกุล ให้ปรากฏเป็นแถบบนแผ่นเจล เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่ให้ความร้อนในการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมต่อโปรตีนที่สำคัญในน้ำนม คือ เคซีน บีต้าแลคโตโกลบูลิน และ แอลฟาแล็คตาบูมิน จากการทดลองพบว่าให้ความร้อนซ้ำที่ระดับอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสยังสามารถพบโปรตีนดังกล่าวครบถ้วน และมีปริมาณมากกว่าการให้ความร้อนซ้ำในระดับอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียสและในการทดลองยังได้มีการศึกษาในกรณีเดียวกันนี้กับนมแพะ ซึ่งกำลังเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมนมไทย โดยให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกันกับนมวัว

Zhang et al. (2004) ศึกษาการใช้เริซินในการทำน้ำที่เป็นตัวรองรับ (Support) ในการตรึงเอนไซม์ L-asparaginase เริซินเป็นโปรตีนจากธรรมชาติที่มีโมเลกุลใหญ่ ได้มาจากไหม *Bombyx mori* โปรตีนนี้เตรียมโดยใช้กระบวนการลอกกา (Degumming) ภายใต้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บรรยากาศ แล้วนำสารละลายที่ได้ไปทำเป็นผงโดยใช้กระบวนการทำแห้งแบบสเปรย์ (spray dry) จะได้อนุภาคนาโนไมโครเมตร ซึ่งมีอนุภาคเฉลี่ย 10 ไมโครเมตร ผงไหมที่ได้นี้มีคุณสมบัติในการละลายได้ในน้ำร้อน (95 องศาเซลเซียส) ผงไหมชนิดนี้ประกอบด้วยกรดอะมิโน 15 ชนิด ได้แก่ Aspartic acid, Threonine, Serine, Glutamic acid, Glycine, Alanine, Cysteine, Valine, Isoleucine, leucine, Tyrosine, Phenylalanine, Lysine, Histidine และ Arginine ซึ่งกรดอะมิโนส่วนใหญ่เป็นพวกที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น หมู่ hydroxyl, หมู่ carbonyl และ หมู่ amino ทำให้อนุภาคของเริซินสามารถสร้างพันธะกับเอนไซม์ได้

Vaithanomsat and Punyasawon (2006) วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนรวมของรังไหม *Bombyx mori* Linn. (พันธุ์นางน้อยศรีสะเกษ 1) พบว่ามีปริมาณไนโตรเจนรวมเท่ากับ 14.64 เปอร์เซ็นต์ ผลิตผงไหมจากรังไหม *Bombyx mori* Linn. (พันธุ์นางน้อยศรีสะเกษ 1) โดยนำไปละลายในสารผสมของ $MgCl_2$ /เอทานอล/น้ำ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปโคอะไลซ์ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 2 วัน เพื่อกำจัดไอออนของเกลือ นำไปหมუნเหวี่ยง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน จากนั้นทำแห้งโดยตรงด้วยกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็ง แล้วบดให้เป็นผงละเอียดจะได้ผงไหมชนิด

ละลายน้ำ เมื่อนำไปวิเคราะห์พบว่ามีการดะมิโนใกล้เคียงกับผงไหมทางการค้า แต่มีปริมาณไนโตรเจนรวมสูงกว่า มีขนาดโมเลกุลประมาณ 40 kDa ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับและเก็บรักษาความชื้น จึงเหมาะที่จะเป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง

Vaithanomsat et al. (2008) ใช้น้ำทิ้งจากกระบวนการลอกกาวเป็นวัตถุดิบในการผลิตโปรตีนเซรีซิน โดยนำส่วนหนึ่งมาทำให้แห้งด้วยกระบวนการแช่แข็ง และการอบแห้งด้วยลมร้อน (tray drying) อีกส่วนหนึ่งนำไปผ่านเมมเบรนทำอัลตราฟิลเตรชัน (Ultra-filtration) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นโปรตีนเซรีซินสูงขึ้น หลังจากนั้นทำแห้งด้วยกระบวนการแช่แข็งแล้วคั่วให้เป็นผงละเอียด ผลที่ได้พบว่าปริมาณไนโตรเจนรวม โปรตีน กรดอะมิโน ความชื้นและค่าใกล้เคียงกับของที่มีในตลาด เมื่อนำเซรีซิน 10 กรัมที่ได้จากการทำแห้งด้วยกระบวนการแช่แข็งจะสามารถละลายได้หมดในน้ำ 100 มิลลิลิตร ในขณะที่แบบอบแห้งด้วยลมร้อน จะสามารถละลายได้ในน้ำ ได้ 96.28 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนทำให้โปรตีนเสียสภาพไป สังเกตได้จากส่วนบนจะเกิดเป็นฟิล์มบางๆ เมื่อนำฟิล์มไปทดสอบการละลายน้ำ ปรากฏว่าไม่สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นจึงได้เลือกวิธีการแช่แข็งมาใช้ในขั้นต่อไป จากการทดลองยังพบอีกว่าผงไหมที่ได้จากการแช่แข็ง และการอบแห้งด้วยลมร้อนมีปริมาณเถ้าสูง เนื่องจากมีสารละลายต่างๆที่ใช้ในกระบวนการลอกกาว ดังนั้นจึงควรเอาไอออนของด่างออกจากริ่ที่ทิ้งจากกระบวนการลอกกาวออกก่อน ฉะนั้นการผ่านเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันจึงทำให้ได้ปริมาณผลผลิต (Yield) ที่มากขึ้น มีปริมาณไนโตรเจนรวมที่สูงขึ้น ปริมาณเถ้าลดลง

Lamoolphak et al. (2006) ไฮโดรไลซ์เซลลูลีส์ต์ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้น้ำกึ่งวิกฤต (sub-critical water) แบบ Batch ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100-250 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 5-30 นาที เพื่อผลิตเป็นโปรตีน และกรดอะมิโน พบว่าหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาไป 10 นาที สารละลายที่ได้จากอุณหภูมิ 125 200 และ 250 องศาเซลเซียส จะมีสีเข้มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายเพิ่มขึ้น หรือมีเซลล์จำนวนหนึ่งเริ่มไหม้ด้วย ยีสต์จะถูกไฮโดรไลซ์ได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากมีปริมาณส่วนที่เหลือลดลง ปริมาณโปรตีนที่ผลิตได้แปรผันตรงกับอุณหภูมิ นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะได้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้เวลานานมากไป ปริมาณโปรตีนจะลดลง จึงสรุปได้ว่าควรใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้นเพื่อให้ได้โปรตีนมาก ส่วนปริมาณกรดอะมิโนที่ได้จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

Lamoolphak et al. (2008) ผลิตโปรตีนและกรดอะมิโนจากเศษไหมภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล ในการทำเชริซินอุณหภูมิใช้ในช่วง 120-160 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเศษไหมต่อน้ำ DI 1:20 1:50 และ 1:100 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 30 และ 60 ส่วนไฟโบรอินต้องทำการลอกกากไหมออกก่อนโดยใช้ autoclave ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส 30 นาที จากนั้นไฮโดรไลซ์ไฟโบรอินที่อุณหภูมิสูงช่วง 160-220 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 30 และ 60 นาที อัตราส่วนเส้นใยไฟโบรอินต่อน้ำ DI 1:20 1:50 และ 1:100 จากนั้นนำมาตรวจสอบปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนและทำแห้งด้วยการแช่แข็งที่ -40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า สารละลายเชริซินที่อุณหภูมิ 120 และ 130 องศาเซลเซียสจะมีความหนืดสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงและเกิดเจล (Gelation) เมื่อเย็นตัวลง ส่วนเศษไหมที่เหลือต่างกันไม่มากนัก หากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 120 เป็น 160 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าส่วนเหลือคือเส้นใยไฟโบรอินเป็นส่วนใหญ่ สารละลายที่ได้มีลักษณะคล้ายกาก นั่นคือ สารละลายเชริซิน ส่วนสารละลายที่ได้ที่อุณหภูมิสูงช่วง 160-220 องศาเซลเซียส คือ สารละลายไฟโบรอิน จะมีความหนืดต่ำกว่าสารละลายเชริซิน และไม่เกิดเจลเมื่อเย็นตัวลง จะเห็นว่าในช่วงอุณหภูมิสูงสารละลายที่ได้จะมีสีน้ำตาลเข้ม ทั้งนี้เนื่องจาก degree of carbonization ที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าอุณหภูมิและเวลาไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนในสารละลายเชริซินที่วัดได้ในสภาวะที่ศึกษามากนัก ในขณะที่อัตราส่วนของสารมีผลต่อปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนของสารละลายเชริซิน เนื่องจากเป็นสารละลายเชริซินมีความหนืดดังนั้น mass transfer resistance จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นที่ความเข้มข้น 1:100 จึงมีโปรตีนสูงสุดในส่วนสารละลายไฟโบรอินนั้นพบว่าปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่ทำให้ได้ปริมาณโปรตีนมากที่สุด คือ อัตราส่วน 1:100, 220 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ส่วนกรดอะมิโน คือ 220 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

Wu et al. (2007) สังเคราะห์ผงไหมเชริซินจากน้ำทิ้งในกระบวนการลอกกากที่ได้จากโรงงานผลิตผ้าไหม เริ่มจากนำน้ำจากกระบวนการลอกกากมาทำให้เข้มข้น จากนั้นทำแห้งแบบสเปรย์ (Spray drying) ให้เป็นผง จากนั้นนำผงไหมเชริซินที่ได้ไปละลายในน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ต่อมานำสารละลายผงไหมเชริซินผสมกับเอทานอลที่แช่เย็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส โดยผสมทีละน้อยและคนด้วยอัตราคงที่ จนได้เอทานอลเข้มข้น 75 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส 1 คืน หลังจากนั้นนำมาปั่นแยก (Centrifuge) จะได้ผงไหมเชริซิน เมื่อทำการระเหยเอทานอลออก และทำแห้งด้วยการแช่แข็งจะได้ผงไหมเชริซิน เมื่อนำผงไหมเชริซินที่ได้มาตรวจหาองค์ประกอบ พบว่า ประกอบด้วยโปรตีนสูงที่สุดถึง 91.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวิเคราะห์

กรดอะมิโน พบว่า ประกอบด้วยกรดอะมิโน 18 ชนิด ที่พบมากที่สุดคือ Serine 27.3 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ Aspartic acid และ Glycine 18.8 และ 10.7 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งกรดอะมิโนที่พบเป็นชนิดที่มีขั้วถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของกรดอะมิโนที่พบทั้งหมด ทำให้ผงไหมเซรีซินมีคุณสมบัติการละลายและอุ้มน้ำได้ดี

Hino et al. (2003) นำเส้นไหม 25 มาละลายในสารละลาย CaCl_2 60 เปอร์เซ็นต์โดยโดยมวล ต่อปริมาตร 325 มิลลิลิตร และเอทานอล 175 มิลลิลิตร ที่ 60 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปไดอะไลซิสเพื่อแยก CaCl_2 และเอทานอลที่เหลือออก แล้วนำไปทำเป็นผงโดยทำแห้งแบบสเปรย์ จะได้ผงไหมทรงกลมระดับไมครอน จาก FTIR spectra พบว่าเส้นใยไฟโบรอินจะปรากฏพีคที่ 1532, 1630 และ 3290 cm^{-1} ผงไหมทรงกลมระดับไมครอน ปรากฏพีคที่ 1542, 1655 และ 3376 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง amide II, amide I และ N-H stretching การที่พีคปรากฏที่ wave number ที่มากขึ้นเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนที่แตกออก ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างทุติยภูมิของไฟโบรอินเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านกระบวนการเตรียมผงไหมทรงกลมระดับไมครอน โมเลกุลไฟโบรอินเปลี่ยนโครงสร้างจาก β -sheet เป็นโครงสร้างที่ไม่แน่นอน

Sheng (2000) ผงไหมเซรีซินโดยนำสารละลายไหมมาทำให้แห้งด้วย Atomizing ผงไหมที่สังเคราะห์มีรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดประมาณ 5-10 ไมครอน มีกรดอะมิโนหลัก คือ เซอรีน กลูตามิก และ แอสปาดิก 27.50, 17.84 และ 11.86 เปอร์เซ็นต์ จาก IR spectra พบว่าปรากฏพีค acidamide I, acidamide II และ acidamide III ที่ 1656, 1539 และ 1244 cm^{-1} ตามลำดับ นั่นคือมีโครงสร้างโปรตีนเป็นแบบ random coil

วันกวี (2549) ทดลองผลิตผงไหมโดยเทคนิคสเปรย์ไฟโรลิซิสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำละลายเส้นไหม จากนั้นนำไปผลิตผงไหม โดยปัจจัยที่มีผลต่อขนาดอนุภาค คือ อัตราการไหลของแก๊สดำพา ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง โดยความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลมากที่สุด จากการทดลองจะได้ผงไหมที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.91 ไมครอน

Hong et al. (2007) กล่าวว่าสเปรย์ไฟโรลิซิสเป็นกระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมเซรามิก และผงโลหะ ผงที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้จะให้ขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ รูปร่างเป็น

ทรงกลม ขนาดเล็ก และมีลักษณะไม่รวมตัวกัน (Non-aggregation characteristics) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาในระดับไมโครภายในละออง และไม่ต้องผ่านกระบวนการบดตัว

Chen et al. (2006) สเปรย์ไพโรลิซิสเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตผงอนุภาคอย่างกว้างขวาง เนื่องจากราคาไม่สูง เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง และเป็นวิธีที่เหมาะสมกับการผลิตที่คุ้มกว่าวิธีอื่น หยดสารละลายที่ผ่านกระบวนการเอสพีจะเกิดกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ ขนาดหยดสารละลายเล็กลงเนื่องจากการระเหยตัวทำละลาย การเปลี่ยนสารตั้งต้น (Precursor) เป็นในรูปของออกไซด์ และการเกิดเป็นอนุภาคของแข็ง ในการทดลองนี้สังเคราะห์ YSZ โดยใช้ ZHA/YAH เป็นสารตั้งต้น และ สังเคราะห์ CeO_2 โดยใช้ CeA เป็นสารตั้งต้น โดยใช้ความเข้มข้นสารตั้งต้นคือน้ำ DI ในอัตราส่วน 0.01 0.1 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เครื่องอัลตราโซนิกความถี่ 1.65 เมกะเฮิร์ตซ์เป็นตัวทำละลายสารตั้งต้น ละอองสารตั้งต้นผ่านเตาเผาที่มี 3 ช่วงอุณหภูมิ โดยใช้อากาศเป็นแก๊สตัวพา เมื่อวัดขนาดละอองสารละลายตั้งต้นที่ได้จากเครื่องอัลตราโซนิก พบว่าที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อนุภาคที่ได้จากสารตั้งต้นทั้งสองมีการกระจายขนาดของอนุภาคต่ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้อยู่ในช่วง 4-8 ไมครอน เมื่อละอองสารตั้งต้นผ่านกระบวนการเอสพีแล้วพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงจะทำให้ได้ขนาดอนุภาคสุดท้ายเล็กลงทั้ง YSZ และ CeO_2 ความเข้มข้น 0.1 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อนุภาคของ YSZ จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ไม่เกิดการเกาะรวมกัน และมีพื้นผิวอนุภาคเรียบ อนุภาคของ CeO_2 จะมีพื้นผิวคล้ายอ่าง (Bowl-like surface) และที่ความเข้มข้น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อนุภาคของ CeO_2 ที่มีขนาดใหญ่ก็จะมีพื้นผิวเหมือนกับที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่อนุภาคของ YSZ ที่ความเข้มข้น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักก็ยังเป็นทรงกลม และพื้นผิวเรียบ ทั้งนี้เนื่องมาจากความสามารถในการละลายของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดแตกต่างกัน คือ CeA สามารถละลายได้ประมาณ 260 กรัมต่อลิตรที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ความสามารถในการละลายของ ZHA ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 8000 กรัมต่อลิตร

Ju et al. (2006) เตรียมอนุภาคแมงกานีสออกไซด์โดยใช้เทคนิคสเปรย์ไพโรลิซิส ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ เครื่องทำละออง (Droplet generator), quartz reactor และ ชุดเก็บอนุภาค เริ่มจากนำแมงกานีสอะซิเตตเตตระไฮเดรต (เป็นสารตั้งต้นของ Mn) ที่ผสมด้วยกรดซิตริกเข้มข้นและเอทิลีนไกลคอล (เป็นตัว additive) มาทำให้เป็นละอองจำนวนมากด้วยเครื่องทำละอองแบบอัลตราโซนิก ละอองจะถูกแก๊สตัวพาพาเข้าสู่ quartz reactor ซึ่งเป็นถึงปฏิกรณ์แบบท่อยาวใช้อุณหภูมิสูง (High-temperature tubular reactor) เมื่อนำอนุภาคของสารตั้งต้นได้จากสเปรย์ไพโรลิซิสที่ 900

องศาเซลเซียส ไปเผาที่อุณหภูมิ 600-1,000 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างผลึก ผลที่ได้ พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและกรดซัลฟริกเข้มข้นและเอทิลีนไกลคอลที่ใช้ผสม เป็นสารที่จำเป็นต่อการเตรียมแมงกานีสออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยเทคนิคสเปรย์ไฟโรลิซิส

Bucko et al. (2007) สังเคราะห์อนุภาคผงแบเรียมเซอร์โคเนตโดยใช้เทคนิคสเปรย์ไฟโรลิซิส เตรียมสารละลายจากเซอร์โคเนียและแบเรียมไนเตรดผสมในน้ำกลั่น ให้ได้ความเข้มข้น 0.1, 0.01 และ 0.001 โมลาร์ แล้วนำไปสเปรย์ให้เป็นละอองโดยใช้ตัวทำละอองแบบอัลตราโซนิก ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สดัดพาพาละอองสารละลายไนเตรดเข้าสู่เตาเผา ซึ่งใช้อุณหภูมิ 800 1000 และ 1200 องศาเซลเซียส ผงที่สังเคราะห์ได้เป็นอนุภาคทรงกลม ขนาด 90–500 นาโนเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายไนเตรด และ อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรลิซิส

Ko et al. (2006) สังเคราะห์อนุภาคผง MgB_2 โดยใช้เทคนิคสเปรย์ไฟโรลิซิสโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกระบวนการเอสพีในช่วง 600-900 องศาเซลเซียสและสารละลายเริ่มต้นในช่วง 0.05-0.5 โมลต่อลิตร ขนาดของอนุภาคที่ได้ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย ขนาดของหยดละอองสามารถประมาณได้จากสมการของ Lang ซึ่งจะได้นิพจน์ผ่านศูนย์กลางของละอองประมาณ 2.2 ไมครอน และจะเห็นว่าอุณหภูมิในกระบวนการเอสพีและความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้นมีผลต่อขนาดอนุภาค คือ อุณหภูมิสูงและความเข้มข้นต่ำจะทำให้ได้อนุภาคเล็กและมีการกระจายของขนาดอนุภาคแคบ

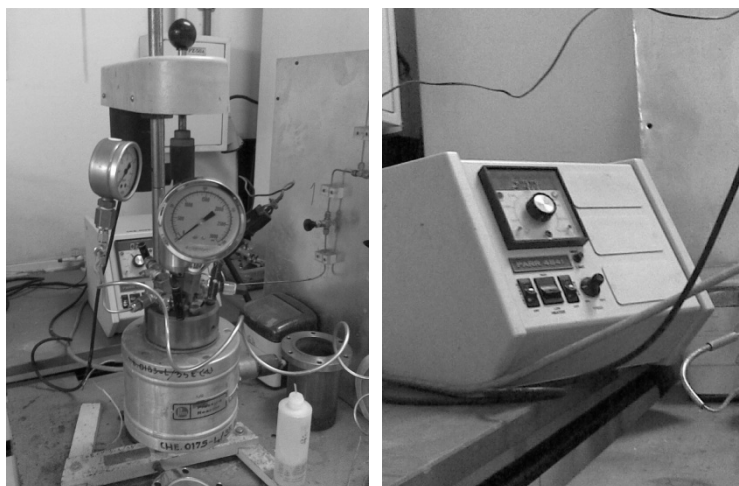
Gürman et al. (2006) ใช้วิธีอัลตราโซนิกสเปรย์ไฟโรลิซิสในการเตรียมผงโคบอลต์ทรงกลมในระดับนาโนเมตร ขนาดหยดละอองสารละลายเริ่มต้นประมาณจากสมการของ Lang เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโคบอลต์ในสารละลายตั้งต้นต่ำๆ จะทำให้ได้อนุภาคที่ขนาดเล็กลง และมีขนาดใกล้เคียงกัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบและเครื่องมือในการทำสารละลายใหม่ตั้งต้น

- 1.1 รังไหมพันธุ์พื้นเมือง (*Bombyx mori*.) จากจังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย
- 1.2 ตู้อบ (Hot air oven) : รุ่น DK-42, Yamato Scientific Co.,Ltd.
- 1.3 น้ำ DI (Deionized water)
- 1.4 เอทานอล (ความเข้มข้น 99.99% โดยน้ำหนัก) : Merck
- 1.5 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
- 1.6 เครื่องแก้ว
- 1.7 เทอร์โมมิเตอร์
- 1.8 เครื่องให้ความร้อนและการกวนแบบแท่งแม่เหล็ก (Heater and stirrer) : ARE Heating Magnetic Stirrer, VEL.P SCIENTIFICA
- 1.9 ขวดเก็บสาร 100 มิลลิลิตร : Schott Duran, West Germany
- 1.10 Parafilm : PARAFILM “M” Laboratory Film, Pechiney Plastic Packaging
- 1.11 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอล พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ และความเร็วรอบ: รุ่น 4561 M, บริษัท PARR ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอลพร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบ

1.12 ชุดเครื่องมือทดสอบแรงดึงผิว ประกอบด้วยวงแหวนและเครื่องชั่งตวงมวล 3 ตำแหน่ง : METTLER PM 400, Mettler-Toledo (Thailand) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ชุดเครื่องมือทดสอบแรงดึงผิว

2. สารเคมีและเครื่องมือในการตรวจสอบปริมาณโปรตีนในสารละลายใหม่

2.1 โซเดียมคาร์บอเนต (ความเข้มข้น 99.9% โดยน้ำหนัก) : APS Ajax Finechem

2.2 คอปเปอร์ซัลเฟต (ความเข้มข้น 98% โดยน้ำหนัก) : Ajax Chemicals

2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 99% โดยน้ำหนัก) : Merck

2.4 โซเดียมโพแทสเซียมทาร์เตรต (ความเข้มข้น 99% โดยน้ำหนัก) : Ajax Finechem

2.5 Bovine Serum Albumin (BSA) : Fluka

2.6 Folin-Ciocalteus reagent : Merck

2.7 เครื่องแก้ว

2.8 ปิเปตอัตโนมัติ (Auto pipet) ขนาด 0.1 และ 1 มิลลิลิตร: PIPETMAN, Gilson S.A.S

2.9 เครื่องชั่งมาตรฐานทศนิยม 3 ตำแหน่ง : METTLER PM 400, Mettler-Toledo
(Thailand)

2.10 เครื่องผสม (Vortex mixer) : 2x³, VEL.P SCIENTIFICA

2.11 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VISIBLE Spectrophotometer) : UV-160A,
Shimadzu

3. อุปกรณ์กระบวนการเอสพี

3.1 เครื่องฟั่นละอองอัลตราโซนิค (Ultrasonic Nebulizer) : TISTR-UZ09, Thailand
Institute of Scientific and Technological research (TISTR) ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 เครื่องฟั่นละอองอัลตราโซนิค

3.2 ท่อแก้วทางเดินแก๊สขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ยาว 90 เซนติเมตร : PYREX

3.3 ท่อแก้วต่อเชื่อมกับเครื่องฟั่นละอองอัลตราโซนิค

3.4 เทปทำความร้อน ขนาด 30 x 100 มิลลิเมตร เป็นส่วนที่ให้ความร้อนช่วงแรก (ช่วงอุณหภูมิต่ำ) แก่ละอองสารละลาย เพื่อช่วยในการระเหยตัวทำละลาย เมื่อนำไปใช้จะมีความยาวประมาณ 35 เซนติเมตร

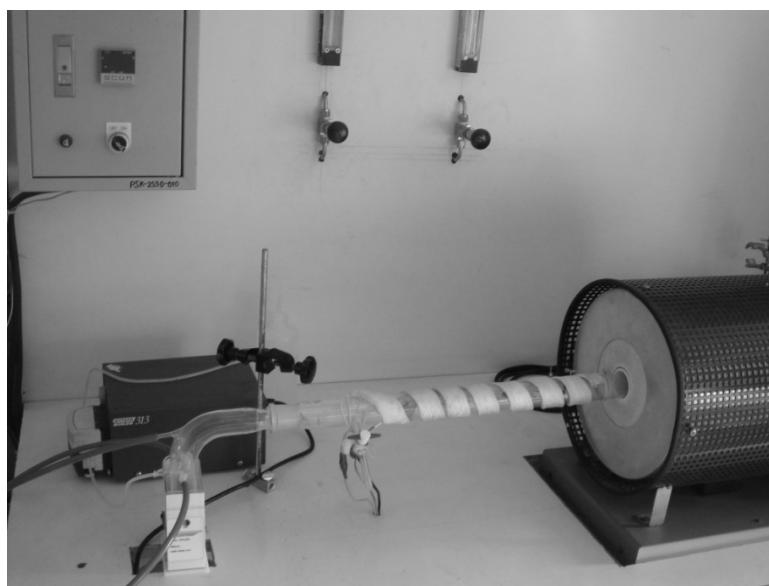
3.5 ตัวควบคุมอุณหภูมิแบบปรับค่าได้ (Controller broad) ใช้ควบคุมอุณหภูมิของเทปทำความร้อน

3.6 เตาเผาแบบท่อ เป็นส่วนที่ให้ความร้อนในช่วงที่สอง (ช่วงอุณหภูมิสูง) ยาว 40 เซนติเมตร : VCTF 3, Vecstar Ltd.

3.7 ปั๊มความดันต่ำ (Peristaltic pump) : 313S, Watson-Marlow Bredel Pumps

3.8 แก๊สดั่วพาโนโตรเจน : industrial grade, TIG Ltd.

3.9 ชุดวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Flow meter) : CZ-03266-36, Cole-Parmer



ภาพที่ 20 ชุดอุปกรณ์เอสพี

4. อุปกรณ์ดักอนุภาคผงไหม

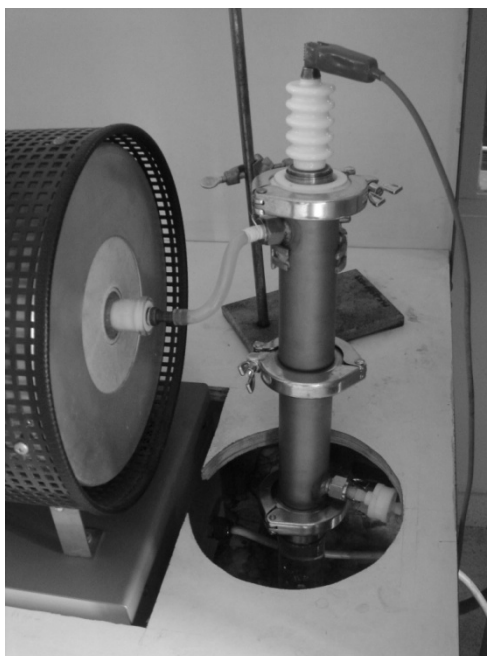
4.1 ลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ยาว 35 เซนติเมตร

4.2 เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator) ดังภาพที่ 21

4.3 เครื่องสร้างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage)

4.4 สายยางซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.5 มิลลิเมตร หนา 2.5 มิลลิเมตร ยาว 15 เซนติเมตร

4.5 ชุดแผ่นกรองไมโครฟิลเตอร์ (Micro filter) ขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร TF-200, PALL ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 21 เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต



ภาพที่ 22 ชุดแผ่นกรองไมโครฟิลเตอร์

5. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะพื้นฐานของผงไหม

5.1 โถดูดความชื้น (Desicator)

5.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Imaging Microscopy

5.3 เครื่องเคลือบทองเพื่อทดสอบชิ้นงาน : JFC-1200 FINE COATER, JEOL

5.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopes; SEMs) : JSM 6301 F, JEOL

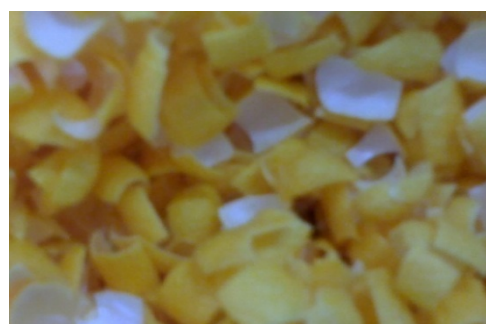
วิธีการ

1. การเตรียมรังไหม

นำรังไหมมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ไฮโดรไลซ์ได้ง่ายขึ้น ภาพที่ 23 แสดงรังไหมก่อนตัดและหลังตัด หลังจากนั้นนำรังไหมที่ตัดแล้วไปล้างทำความสะอาด แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



(a)



(b)

ภาพที่ 23 (a) รังไหมพันธุ์พื้นเมือง

(b) รังไหมพันธุ์พื้นเมืองที่ตัดแล้ว

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่จะใช้เตรียมสารละลายใหม่

ซังรังไหมประมาณ 1 กรัม เติมน้ำ DI 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปไฮโดรไลซ์ด้วยชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มอล โดยมีตัวแปรต้นในการทดลอง คือ อุณหภูมิและเวลาที่ดังนี้ อุณหภูมิ 170, 200 และ 230 องศาเซลเซียส เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที จำนวนการทดลองแสดงดังตารางที่ 4 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้เก็บในขวดเก็บสารแล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4 สภาวะการทดลองอุณหภูมิและเวลาที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)
1	170	15
2	170	30
3	170	45
4	170	60
5	200	15
6	200	30
7	200	45
8	200	60
9	230	15
10	230	30
11	230	45
12	230	60

3. การวิเคราะห์ความเข้มข้นโปรตีนของสารละลายรังไหมตามวิธีของ Lowry

3.1 การเตรียมสารละลาย

1. เตรียมสารละลาย BSA 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลาย A ซึ่งประกอบด้วยสารละลาย Na_2CO_3 เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในสารละลาย NaOH 0.1 โมลต่อลิตร

3. เตรียมสารละลาย B (ต้องเตรียมก่อนใช้) ซึ่งประกอบด้วยสารละลาย $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ เข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ สารละลาย NaK tartate เข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

4. เตรียมสารละลาย Folin-Ciocalteus reagent โดยใช้สารประกอบโฟลีนกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 (ต้องเตรียมก่อนใช้)

5. เตรียมสารละลาย Alkaline copper solution โดยผสมสารละลาย A และ B ในอัตราส่วน 50:1 โดยปริมาตร

3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลาย BSA

1. เจือจางสารละลายมาตรฐานด้วยน้ำ DI โดยเจือจางตามลำดับ (serial dilution) เพื่อให้ได้สารละลาย BSA ที่เข้มข้น 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 และ 0.0625 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

2. คุดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง ในกรณีของ blank ใช้น้ำ DI แทนสารละลาย BSA

3. ใส่ Alkaline copper solution หลอดละ 3 มิลลิลิตร ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสม (vortex mixer) ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

4. ใส่สารละลาย Folin-Ciocalteu reagent หลอดละ 0.3 มิลลิลิตร ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสม (vortex mixer) ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที

5. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 729 nm

6. เขียนกราฟมาตรฐานของสารละลาย BSA

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นโปรตีน

1. นำตัวอย่างมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม (การทดลองนี้เจือจาง 10 เท่า)
2. ทำการทดลองเหมือนข้อ 2-5 ของการเตรียมกราฟมาตรฐาน
3. คำนวณหาปริมาณโปรตีน

4. การผลิตผงไหม

4.1 การศึกษาอุณหภูมิช่วงต้น/ปลายที่เหมาะสมในกระบวนการเอสพี

นำสารละลายไหมตั้งต้นเจือจางสารละลายด้วยตัวทำละลายร่วม (เอทานอล) ในอัตราส่วนเอทานอล 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรคูดเข้าสู่เครื่องฟั่นละอองอัลตราโซนิก เพื่อทำให้เกิดเป็นเม็ดละอองของเหลวด้วย Peristaltic pump ใช้อัตราการไหลของแสดัวพา (ไนโตรเจน) 10 ลิตรต่อนาทีเป็นตัวพาละอองสารละลายเข้าสู่กระบวนการเอสพีโดยใช้อุณหภูมิช่วงต้นเป็น 130 องศาเซลเซียสแปรค่าอุณหภูมิช่วงปลายเป็น 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส ดักอนุภาคผงไหมที่สังเคราะห์ได้ด้วยชุดแผ่นกรองไมโครฟิลเตอร์

4.2 การผลิตผงไหม

เตรียมสารละลายไหมตั้งต้นในการทำผงไหมจากเจือจางสารละลายไหมที่เตรียมไว้ด้วยเอทานอล ในอัตราส่วนเอทานอล 40 50 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรให้ได้ปริมาตรรวม 10 มิลลิลิตร หาค่าความหนาแน่น และแรงตึงผิวของสารละลายตั้งต้น ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายไหมตั้งต้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสก่อนคูดเข้าสู่เครื่องฟั่นละอองอัลตราโซนิก เพื่อทำให้เกิดเป็นเม็ดละอองของเหลวด้วย Peristaltic pump นำละอองของเหลวเข้าสู่กระบวนการเอสพีด้วยแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเอสพีช่วงต้น/ช่วงปลาย คือ 130/200 องศาเซลเซียส โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สดัวพาในการทดลองนี้คือ 10 และ 20 ลิตรต่อนาที ดักอนุภาคผง

ไหมที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสติดต่อด้วยชุดแผ่นกรองไมโครฟิลเตอร์ การทดลองแสดงดังตารางที่ 5 คุณลักษณะพื้นฐานของผงไหมด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM)

ตารางที่ 5 การทดลองในการผลิตผงไหม

การทดลองที่	ความเข้มข้นเอทานอล (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)	อัตราการไหลแก๊สตัวพา (ลิตรต่อนาที)
1	40	10
2	50	10
3	60	10
4	40	20
5	50	20
6	60	20

5. สถานที่ทำการทดลอง

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. องค์ประกอบโปรตีนของรังไหม

ปริมาณไนโตรเจนรวมของรังไหมพันธุ์พื้นเมือง (*Bombyx mori*) จากจังหวัดขอนแก่นที่ทดสอบตาม AOAC (2000) เท่ากับ 16.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยปริมาณไนโตรเจนรวมสามารถอธิบายได้ถึงปริมาณโปรตีนโดยประมาณได้ เนื่องจากเส้นใยที่หนอนไหมสร้างขึ้นมาเป็นกรด α -อะมิโนที่เป็นพอลิเมอร์สายยาว (เออีอีซี และเจ็มซัย, 2530; ประดิษฐ์, 2549) ปริมาณไนโตรเจนรวมที่พบมีความใกล้เคียงกับ Vaithanomsat and Punyasawon (2006) คือ 14.64 เปอร์เซ็นต์ และมีกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในรังไหมคิดเป็น 69.34 เปอร์เซ็นต์ แสดงได้ดังตารางที่ 6 ชนิดกรดอะมิโนที่พบมาก ได้แก่ ไทโรซีน กรดกลูตามิก และเซอรีน ดังนั้นรังไหมจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผงไหม

2. ผลการศึกษาสถานะในการไฮโดรไลซิสรังไหม

2.1 การละลายของรังไหม

จากการทดลองในการหาสถานะที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซิสรังไหม เพื่อนำมาใช้เป็นสารละลายตั้งต้นในการผลิตผงไหม เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแล้วนำสารละลายที่ได้มารองจะมีส่วนของรังไหมที่เหลือติดอยู่บนกระดาษกรอง และส่วนของสารละลาย ลักษณะทางกายของสารละลายจะพบว่าสีของสารละลายจะเข้มขึ้นซึ่งแสดงลักษณะดังภาพที่ 24 เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น สีของสารละลายไหมที่เข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในสารละลายมากขึ้น และอาจเนื่องมาจากมีรังไหมบางส่วนเกิดการไหม้ที่อุณหภูมิสูงด้วย (Lamoolphak et al., 2006; Lamoolphak et al., 2008)

ตารางที่ 6 กรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของรังไหม *Bombyx mori*. จากจังหวัดขอนแก่น

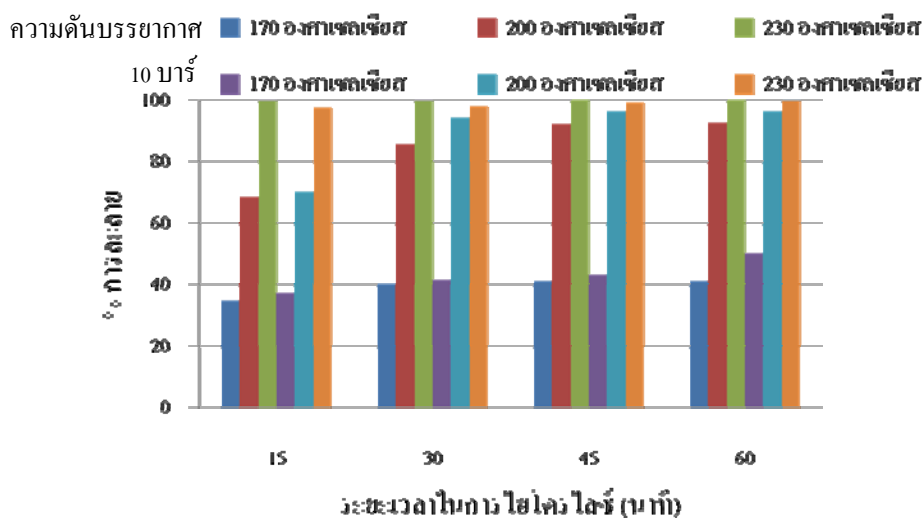
ชนิดกรดอะมิโน	ปริมาณที่พบ (กรัม/ รังไหม100 กรัม)
Tyrosine	23.688
Glutamic acid	14.206
Serine	9.907
Valine	3.676
Phenylalanine	3.159
Lysine	2.877
Histidine	2.139
Aspartic acid	1.981
Threonine	1.472
Leucine	1.676
Isoleucine	1.229
Proline	1.227
Glycine	1.105
Alanine	1.000
Arginine	< 0.005
Methionine	< 0.005
Cysteine	< 0.005
Hydroxylysine	< 0.005
Hydroxyproline	< 0.005
Tryptophane	< 0.005

วิธีทดสอบอ้างอิง In house method base on AOAC (2000), 994.12 Detect by GC/MS โดยบริษัท
ห้องปฏิบัติการกลางตรวจสอบผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร จำกัด



ภาพที่ 24 สารละลายไหมที่ได้จากการทดลองไฮโดรไลซิสรังไหมที่ความดันเริ่มต้นที่บรรยากาศ อุณหภูมิ 170, 200 และ 230 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการไฮโดรไลซิส 30 นาที

ผลของความดัน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสรังไหมต่อการละลายของ รังไหม แสดงได้ดังภาพที่ 25 อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีผลกระทบสูง ต่อการละลายของรังไหม รังไหมมีแนวโน้มในการละลายได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความดันส่งผลต่อ การละลายของรังไหมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น รัง ไหมจะละลายได้มากขึ้นด้วย ณ อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาทีรังไหมสามารถ ละลายได้ถึง 99.90 และ 99.50 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดันเริ่มต้นที่ความดันบรรยากาศและ 10 บาร์ ตามลำดับ การละลายที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลจากองค์ประกอบของรังไหมรังไหมเป็นโปรตีน เมื่อ โปรตีนถูกความร้อนจะเกิดการคลายตัว และเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องพันธะโคเวเลนต์ที่เชื่อม ระหว่างสายโปรตีนและพันธะเปปไทด์ในสายโปรตีนจะถูกทำลายด้วยความร้อน (สิริรัตน์, 2548; Shuler and Kargi, 2002)

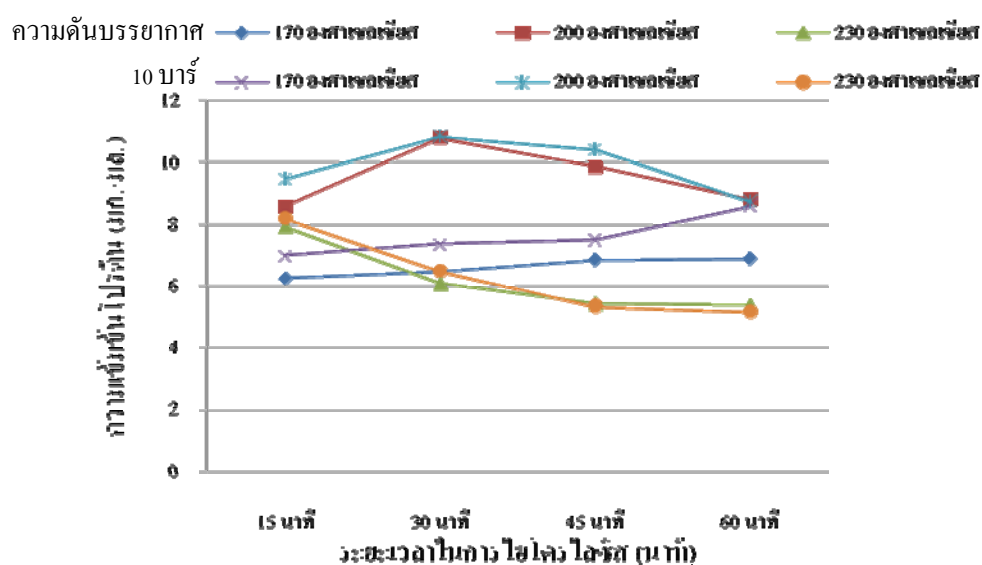


ภาพที่ 25 เปอร์เซ็นต์การละลายได้ของรังไหมที่สภาวะการไฮโดรไลซิสต่างๆ

2.2 ปริมาณความเข้มข้นโปรตีน

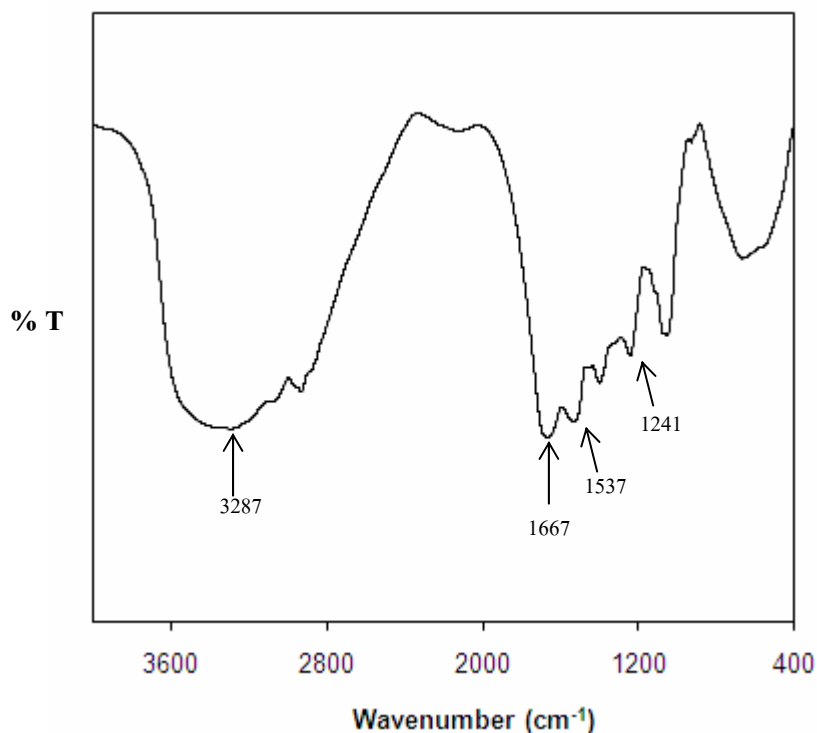
จากการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่ได้โดยวิธีของ Lowry แนวโน้มของความเข้มข้นโปรตีนแสดงในภาพที่ 26 จะเห็นว่า ความดันเริ่มต้นส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่สกัดได้ เนื่องจากความดันส่งผลต่อการละลายของรังไหมดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลอุณหภูมิและระยะเวลา พบว่า ความดันมีผลน้อยกว่า และพบว่าภายใต้ความดันออกซิเจนเมื่ออุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสมากขึ้น ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นดังแสดงให้เห็นที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ปริมาณโปรตีนจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลามากขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของรังไหมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ นั้นใกล้เคียงกันมาก ทำให้ปริมาณโปรตีนจากรังไหมที่ละลายอยู่ในสารละลายมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน สำหรับที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ปริมาณโปรตีนจะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ระยะเวลาในการละลายรังไหมในช่วง 15 ถึง 30 นาที เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการละลายเป็น 45 และ 60 นาที ปริมาณโปรตีนจะเริ่มลดลงตามลำดับ ซึ่งพบว่าเป็นเช่นเดียวกับการทดลองของ Lamoolphak et al. (2006) ที่พบว่าที่หากใช้อุณหภูมิสูง และใช้ระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสนานเกินไป จะส่งผลให้ปริมาณโปรตีนลดลงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อใช้เวลานานโปรตีนจะแปรสภาพและถูกทำให้เสียสภาพด้วยความร้อนจึงทำให้ปริมาณโปรตีนที่วัดได้ลดลง (สิริรัตน์, 2548; วิลาสิน, 2548) สำหรับที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส

ปริมาณโปรตีนที่ลดลงอธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับที่ 200 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสถานะที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสถานะในการทำสารละลายรังไหมเพื่อนำไปทำเป็นผงไหมต่อไป คือ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และเวลาในการไฮโดรไลซ์รังไหมเป็น 30 นาที เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่วัดได้มีค่าสูงสุด และมีความใกล้เคียงกับเมื่อใช้ความดันเริ่มต้นเป็น 10 บาร์ คือ 10.80 และ 10.85 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 26 แนวโน้มปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่สถานะต่างๆ

เมื่อนำสารละลายไหมที่ได้จากสถานะความดันเริ่มต้นที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้เป็นผง ตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลของสารละลายไหมที่เตรียมได้ด้วย FTIR spectra ได้ดังภาพที่ 27 พบว่า ปรากฏพีคขึ้นที่ 1667, 1537, 1241 และ 3287 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง amide I, amide II, amide III และ N-H stretching แสดงให้เห็นว่า สารละลายไหมหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรไลซ์ยังมีโครงสร้างโปรตีนเป็นแบบทุติยภูมิเป็น α -helix/random coil (Lampoolphak et al., 2008; Wang et al., 2005; Hino et al., 2003; Sheng et al., 2000)

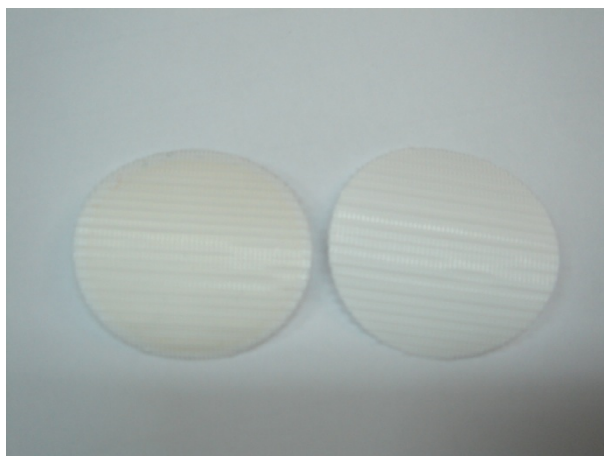


ภาพที่ 27 FTIR spectra ของสารละลายไหมที่ความดันเริ่มต้นที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาไฮโดรไลซิส 30 นาที

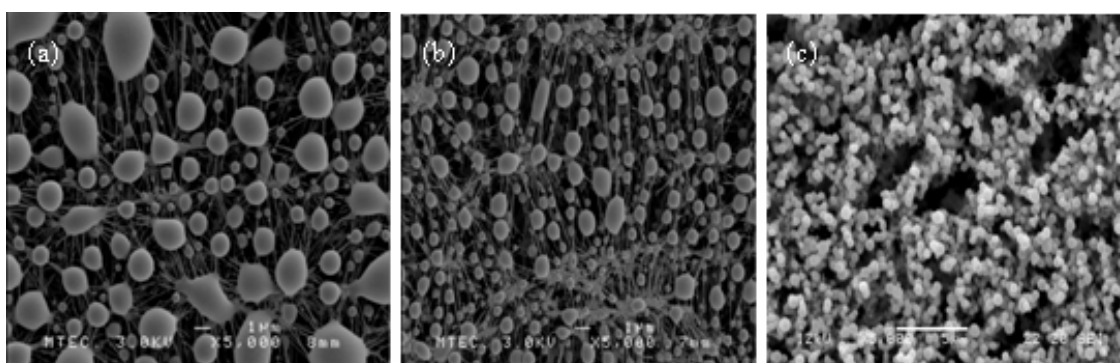
3. การผลิตผงไหม

3.1 การหาอุณหภูมิช่วงดัน/ปลายที่เหมาะสมในกระบวนการเอสพี

จากการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเอสพี โดยการใช้แผ่นไมโครฟิลเตอร์ดักอนุภาคผงไหม โดยจะกำหนดอุณหภูมิช่วงดันที่ทำให้ความร้อนด้วยเทปทำความร้อนไว้ที่ 130 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่วงปลายจะให้ความร้อนจากเครื่องเตาเผาแบบท่อ โดยจะแปรค่าอุณหภูมิเป็น 160 170 และ 180 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ความเข้มข้นเอทานอลเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ใช้อัตราการไหลของแก๊สดำพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที ได้ผลดังภาพที่ 28 จะเห็นว่าที่แผ่นไมโครฟิลเตอร์จะมีสีเหลืองอ่อนๆ นั่นคือผงไหมนั่นเอง เมื่อนำไปขยายด้วย SEM แสดงดังภาพที่ 29 พบว่าที่อุณหภูมิช่วงปลายเป็น 160 และ 170 องศาเซลเซียสผงไหมที่ได้จะยังไม่แห้งสนิท แต่เมื่อใช้อุณหภูมิเป็น 180 องศาเซลเซียสจะทำให้ได้อนุภาคผงไหมที่แห้ง มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 489 นาโนเมตร



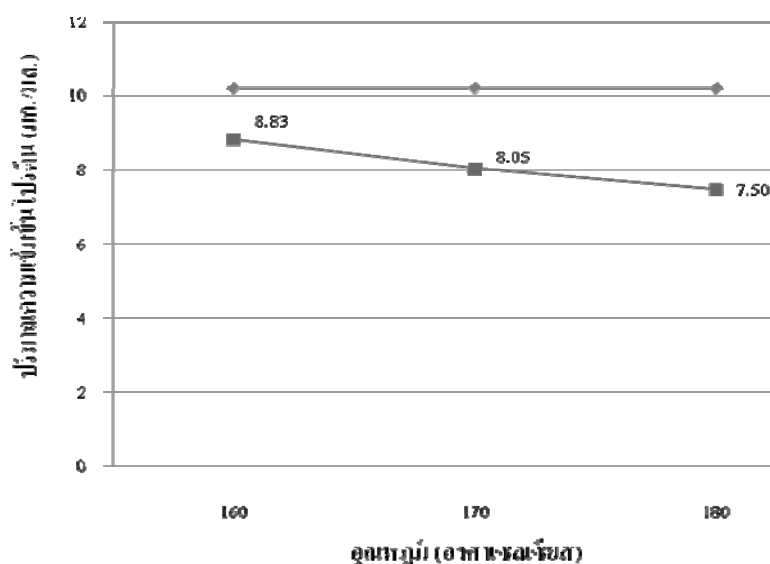
ภาพที่ 28 ผงไหมที่ดักด้วยแผ่นไมโครฟิลเตอร์ (ซ้าย) และแผ่นไมโครฟิลเตอร์ปกติ (ขวา)



ภาพที่ 29 ภาพจาก SEM ของผงไหมที่ใช้ความเข้มข้นเอทานอลเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สดำพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ (a) 160 (b) 170 และ (c) 180 องศาเซลเซียส

เมื่อนำผงไหมที่ได้ไปตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นโปรตีน พบว่า หลังจากผ่านกระบวนการเอสพีปริมาณความเข้มข้นโปรตีนมีแนวโน้มที่จะลดลงตามอุณหภูมิในกระบวนการเอสพีที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 30 ก่อนผ่านกระบวนการเอสพีวัดปริมาณความเข้มข้นโปรตีนได้เท่ากับ 10.22 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมที่อุณหภูมิ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านกระบวนการเอสพีปริมาณความเข้มข้นโปรตีนลดลงเหลือ 8.83, 8.05 และ 7.50 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากโปรตีนบางส่วนถูกทำลายเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นั่นคือกระบวนการเอสพีทำให้ปริมาณโปรตีนลดลงประมาณ 13.60, 21.23 และ 26.61 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองเบื้องต้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิช่วงต้น/ปลายในกระบวนการเอสพี

เป็น 130/180 องศาเซลเซียสในการผลิตผงไหมโดยเปลี่ยนอุปกรณ์ในการดักเก็บอนุภาคผงไหมจากแผ่นไมโครฟิลเตอร์เป็นเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต เนื่องจากผงไหมที่ดักโดยแผ่นไมโครฟิลเตอร์ไม่สามารถนำออกมาใช้ได้



ภาพที่ 30 ปริมาณโปรตีนของผงไหมที่ความเข้มข้นไหมต่อน้ำเป็น 1:100 เมื่อใช้เอทานอลความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อใช้สภาวะดังกล่าวในการผลิตผงไหมโดยใช้เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตในการดักเก็บผงไหม ปรากฏว่าสภาวะในกระบวนการเอสพีเป็นในช่วงปลายเป็น 180 องศาเซลเซียสทำให้ผงไหมที่ผลิตได้เหนียวติดกับผนังเครื่องตกตะกอนแบบไฟฟ้าสถิต ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคผงไหมที่ดักจากแผ่นไมโครฟิลเตอร์เกิดการอุดตันรูของเมมเบรน ทำให้อนุภาคมีระยะเวลาอยู่ในช่วงของการทำแห้งนานกว่าที่ใช้เครื่องตกตะกอนแบบไฟฟ้าสถิตซึ่งไม่ทำให้เกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงได้ปรับสภาวะในการทดลองใหม่เป็นอุณหภูมิช่วงที่สองเป็น 200 องศาเซลเซียส เหตุผลในการเลือกเพิ่มอุณหภูมิในช่วงปลาย คือ ในการวิจัยนี้จะใช้กระบวนการการเอสพีในการสังเคราะห์อนุภาคทรงตันเพื่อให้ได้ผงไหมขนาดเล็ก เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงต้นอาจเป็นผลให้ได้อนุภาคกลางซึ่งจะทำให้ผงไหมที่ได้มีขนาดที่ใหญ่กว่า และเพื่อให้ได้ผงไหมที่มีขนาดเล็กลงจึงเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลขึ้น

3.2 การผลิตผงไหม

ในการผลิตผงไหมขนาดนาโนเมตรนั้นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคที่จะสังเคราะห์ได้นั้น ได้แก่ ขนาดของละอองสารละลายเริ่มต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการเอสพี ซึ่งขนาดของละอองสารละลายจะขึ้นกับสมบัติของสารละลายตั้งต้น และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องทำละออง (Gürmen et al., 2006 และ Ko et al., 2006) นอกจากนั้นยังขึ้นกับอัตราการไหลของแก๊สตัวพา และอุณหภูมิในการทำแห้งและการแตกตัวอีกด้วย ซึ่งสมการที่ใช้ในการประมาณขนาดอนุภาคเริ่มต้นจากเครื่องพ่นละอองอัลตราโซนิกนั้นใช้ตามสมการของ Lang ตามที่ Gürmen et al. (2006); Ko et al. (2006); Chapron et al. (2007) และ Singh et al. (2007) ใช้ในการประมาณขนาดเริ่มต้นดังสมการที่ (1)

$$D_d = 0.34 \left(\frac{8\pi\gamma}{\rho f^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

โดยที่ D_d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคละออง (nm)

γ = ความตึงผิวของสารละลาย (mN/m)

ρ = ความหนาแน่นของสารละลาย (g/cm³)

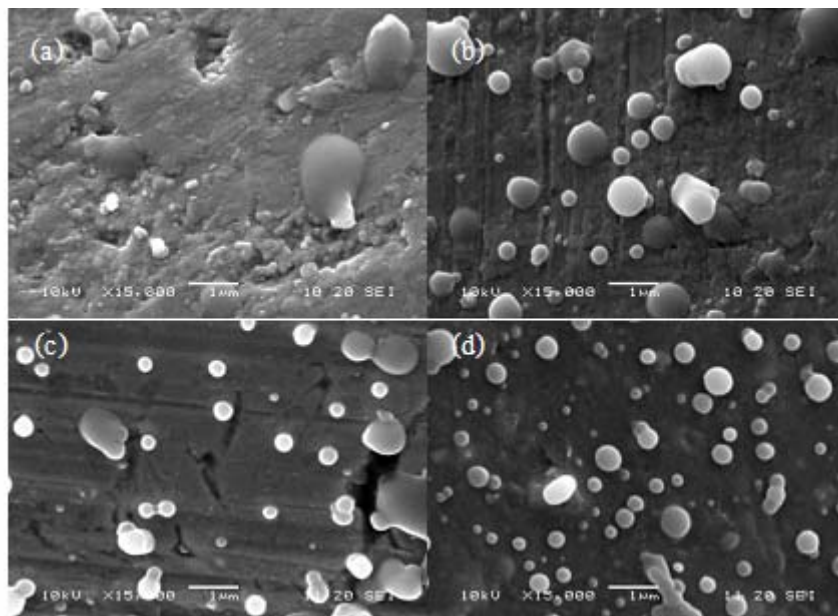
f = คลื่นความถี่อัลตราโซนิกของเครื่องพ่นละอองอัลตราโซนิก

โดยความถี่เครื่องพ่นละอองอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อขนาดละอองสารละลาย ได้แก่ ค่าความหนาแน่น และความตึงผิว ซึ่งหาดังภาคผนวก จ และ ข เมื่อแทนในสมการที่ (1) จะประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคละอองเริ่มต้นได้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคละอองเริ่มต้นแสดงดังตารางที่ 7 ปรากฏว่าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลในสารละลายตั้งต้นเนื่องจากความหนาแน่นและความตึงผิวของสารละลายลดลง จึงส่งผลให้ขนาดละอองเริ่มต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการเอสพีมีขนาดเล็กลงด้วย

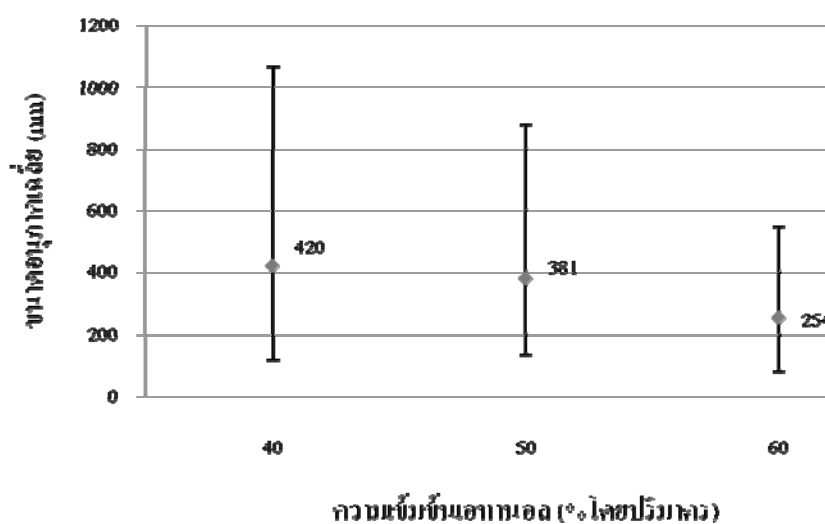
ตารางที่ 7 ค่าความหนาแน่น ความตึงผิว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดสารละลายเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง

ความเข้มข้นเอทานอล (%โดยปริมาตร)	ρ (g/cm ³)	γ (mN/m)	D_d (nm)
0	1.021	17.264	1610
40	0.904	5.628	1154
50	0.870	4.382	1075
60	0.846	2.939	950

อนุภาคของผงไหมที่สังเคราะห์จากการใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลแสดงดังภาพที่ 31 ภาพถ่ายจาก SEM ทำให้เห็นว่าอนุภาคผงไหมที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นทรงกลม ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคเดี่ยว ภาพที่ 32 แสดงขนาดอนุภาคผงไหมที่ได้เมื่อแปรค่าความเข้มข้นเอทานอล พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงไหม คือ 1,065, 119 และ 420 นาโนเมตรตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงไหม คือ 880, 134 และ 381 นาโนเมตรตามลำดับ และเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงไหม คือ 547, 80 และ 254 นาโนเมตรตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคผงไหมที่ได้จะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากขนาดละอองของสารละลายเริ่มต้นก่อนเข้ากระบวนการเอสพีที่ได้จากเครื่องพ่นละอองอัลตราโซนิคมีขนาดเล็กลง ผงไหมที่ได้มีการกระจายตัวของอนุภาคดีขึ้นไม่ติดกันเป็นกลุ่มก้อน เป็นผลให้ได้อนุภาคเดี่ยวมากขึ้น จากตารางที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล ค่า SD จะลดลง ซึ่งบ่งบอกได้ถึงอนุภาคที่ได้นั้นเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยลดลง นั่นคือ ขนาดอนุภาคผงไหมที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 31 ภาพจาก SEM อนุภาคผงไหมที่สังเคราะห์ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอล โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาคงที่ที่ 10 ลิตรต่อนาที (a) ไม่มีเอทานอล (b) เอทานอล 40% (c) เอทานอล 50% (d) เอทานอล 60%



ภาพที่ 32 ช่วงของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาคงที่ 10 ลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทานอล

ตารางที่ 8 ขนาดและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคผงไหม (SD) เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพา 10 ลิตรต่อนาที

ความเข้มข้นเอทานอล (%โดยปริมาตร)	ขนาดผงไหม (nm)	SD
40	420	39.62
50	381	25.15
60	254	19.06

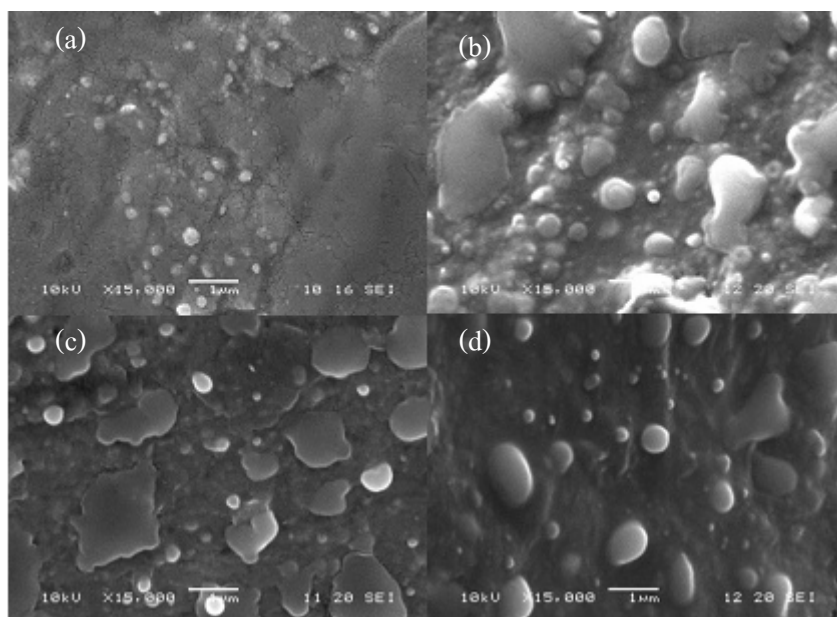
เมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจาก SEM ของอนุภาคผงไหมที่สังเคราะห์จากการใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาเป็น 20 ลิตรต่อนาที ละอองสารละลายไหมจะมีช่วงเวลา (resident time, τ) ที่ได้รับความร้อนในกระบวนการเอสพีที่สั้นลง ซึ่งสามารถคำนวณ τ ได้จากสมการที่ (2)

$$\text{จาก} \quad \tau = \frac{V}{v_0} \quad (2)$$

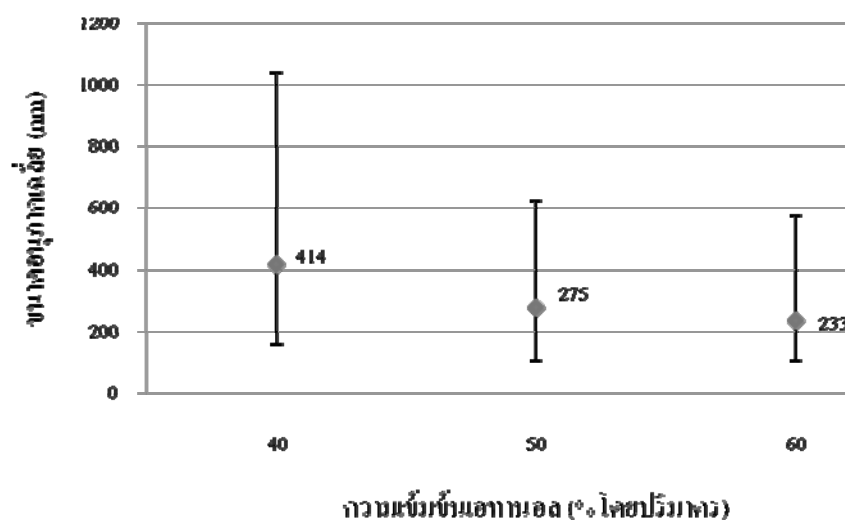
เมื่อ V คือ ปริมาตรของท่อในช่วงกระบวนการเอสพี (cm^3)

v_0 คือ อัตราการไหลของแก๊สดั่วพา (l/min)

นั่นคือ เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาเป็น 10 ลิตรต่อนาทีจะมีช่วงเวลาในกระบวนการเอสพีประมาณ 12.72 วินาที แต่เมื่อใช้อัตราการไหลของแก๊สดั่วพาเป็น 20 ลิตรต่อนาทีจะมีช่วงเวลาในกระบวนการเอสพีลดลงถึง 2 เท่า นั่นคือ 6.36 วินาที จึงเป็นผลให้อนุภาคที่ได้ไม่แห้งสนิท ทำให้อนุภาคที่ดักเก็บเกิดการชนและรวมตัวกันเป็นแผ่นบาง หรือเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 33 อย่างไรก็ตามเมื่อวัดขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงไหมเฉพาะอนุภาคที่ค่อนข้างเป็นทรงกลมเดี่ยว พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลจะทำให้ได้อนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลมมากขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา ดังแสดงในภาพที่ 34 เนื่องจากเอทานอลมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเอทานอลขึ้นจึงทำให้อัตราการระเหยของตัวทำละลายเร็วขึ้นด้วย และค่า SD มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 9



ภาพที่ 33 ภาพจาก SEM อนุภาคผงใหม่ที่ได้สังเคราะห์ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอล โดยใช้อัตราการใช้ของแก๊สดั่วพาที่ 20 ลิตรต่อนาที (a) ไม่มีเอทานอล (b) เอทานอล 40% (c) เอทานอล 50% (d) เอทานอล 60%



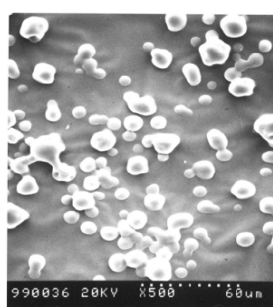
ภาพที่ 34 ช่วงของขนาดอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยเมื่อใช้อัตราการใช้ของแก๊สดั่วพาเป็น 20 ลิตรต่อนาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทานอล

ตารางที่ 9 ขนาดและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคผงไหม (SD) เมื่อใช้อัตราการไหลแก๊สตัวพา 20 ลิตรต่อนาที

ความเข้มข้นเอทานอล (%โดยปริมาตร)	ขนาดผงไหม (nm)	SD
40	414	32.64
50	275	19.80
60	233	20.85

จากผลการทดลองที่ผ่านมามีพบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากอนุภาคที่ได้แห้งสนิท และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 254 นาโนเมตร เมื่อนำไปตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นโปรตีน หลังจากผ่านกระบวนการเอสพี พบว่าปริมาณความเข้มข้นโปรตีนลดลงจาก 4.42 เป็น 2.37 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร นั่นคือลดลง 53.62 เปอร์เซ็นต์

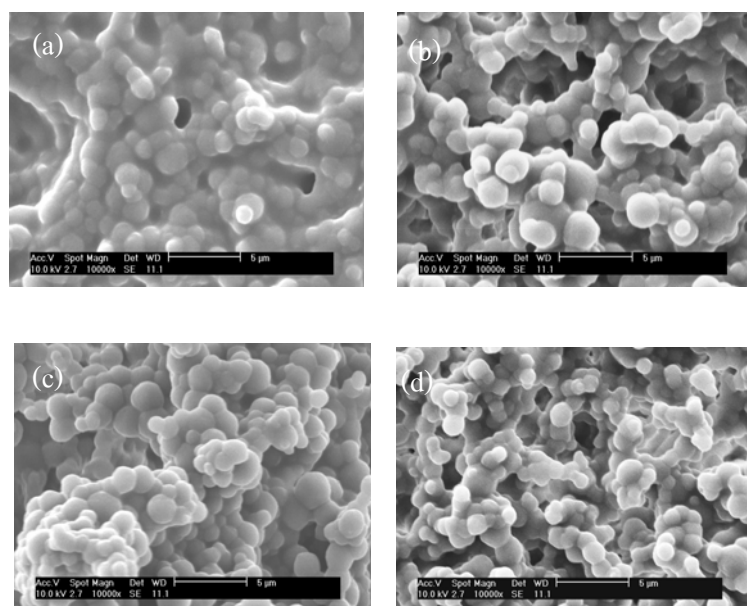
เมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคผงไหมที่ได้กับของ Sheng et al. (2000) ที่เตรียมผงไหมจากน้ำทิ้งหลังกระบวนการผลิตเส้นไหมโดยใช้วิธี Atomizing drying จะเห็นว่าผงไหมของ Sheng et al. (2000) มีลักษณะเป็นทรงกลม แต่มีขนาดใหญ่กว่าของงานวิจัยนี้ ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ Sheng et al. (2000) อยู่ระหว่าง 5-10 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ผงไหมเซริซินของ Sheng et al. (2000)

ที่มา: Sheng et al. (2000)

เมื่อพิจารณาการผลิตผงไหมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำละลายไหมของวันกิ (2549) เมื่อนำสารละลายไหมที่ได้ไปผ่านกระบวนการเอสพีผลิตเป็นผงไหม จะเห็นว่าหากใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาช้าๆ อนุภาคที่ผลิตก็ยิ่งหลอมรวมติดกัน ไม่เป็นอนุภาคเดี่ยว ดังภาพที่ 36 ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย จะพบว่าการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายให้ผลที่ดีกว่า เนื่องจากการใช้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำๆ อนุภาคที่ได้มีขนาดเล็กกว่า ลักษณะของอนุภาคที่ได้เป็นอนุภาคเดี่ยว และมีการกระจายตัวที่ดีกว่า



ภาพที่ 36 ผลการวิเคราะห์ SEM ของผงไหมใช้สารละลายไหมเข้มข้น 0.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อุณหภูมิ 80/150 องศาเซลเซียสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวสกัดโปรตีนและอัตราการไหลของแก๊สที่ (a) 3 ลิตรต่อนาที (b) 6 ลิตรต่อนาที (c) 14 ลิตรต่อนาที (d) 20 ลิตรต่อนาที

ที่มา: วันกิ (2549)

สรุป

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารละลายจากรังไหม พบว่าความดันมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการละลายและปริมาณความเข้มข้นของโปรตีน รังไหม 1 กรัมในน้ำ DI 100 มิลลิลิตร ที่สภาวะอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการไฮโดรไลซิส 30 นาที ที่ความดันบรรยากาศ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมสารละลายไหมตั้งต้น เนื่องจากเป็นสภาวะที่รังไหมสามารถละลายได้มาก อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ไม่สูงหรือมากเกินไป จึงเป็นผลให้ความเข้มข้นของโปรตีนรวมสูงที่สุด ในส่วนของการผลิตผงไหมอัตราการไหลของแก๊สดัฟฟาที่เหมาะสม คือ 10 ลิตรต่อนาที เนื่องจากทำให้ได้อนุภาคผงไหมที่เป็นทรงกลมและเป็นอนุภาคเดี่ยว และพบว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่เป็นตัวทำละลายร่วมมีผลต่อขนาด การกระจายขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงไหมที่ได้ คือเมื่อความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กลง และการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีขึ้นด้วย ขนาดของผงไหมที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผงไหมอยู่ในช่วง 200–400 นาโนเมตร สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงไหม คือ อุณหภูมิในกระบวนการเอสพีเป็น 130/200 องศาเซลเซียส และใช้เอทานอลความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในสภาวะการทดลองนี้กระบวนการเอสพีจะทำให้ปริมาณโปรตีนลดลง 53.62 เปอร์เซ็นต์

ข้อเสนอแนะ

การใช้สภาวะน้ำกึ่งวิกฤตในการทำสารละลายไหมตั้งต้นนั้นเป็นการใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นอาจทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพไปบางส่วน หากใช้เอนไซม์ในการย่อยรังไหมอาจทำให้ได้ปริมาณโปรตีนที่สูงกว่า

เนื่องจากเครื่องฟั่นละอองอัลตราโซนิกที่ใช้ผลิตขึ้นเพื่อเป็นเครื่องฟั่นละอองยาจึงมีความสามารถในการผลิตค่อนข้างต่ำ คือ ระยะเวลาในการใช้งานไม่ควรเกิน 20 นาที จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยมาก จนไม่สามารถหลุดจากผนังเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ได้ ดังนั้นถ้าจะใช้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมควรหาหัวฟั่นละอองอัลตราโซนิกที่มีความสามารถในการผลิตสูง หรืออาจใช้หัวฟั่นละอองหลายๆ หัว และปรับปรุงความถี่ของหัวฟั่นละอองให้มีความถี่สูงขึ้น เพื่อให้ได้อนุภาคที่ขนาดเล็กลง

สเปรย์ไฟโรลิซิสเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อน ดังนั้นปริมาณโปรตีนจึงสูญเสียไปค่อนข้างมาก แต่มีข้อดีคือทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่เล็ก ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานของผงไหม เช่น ถ้าใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง อนุภาคเล็กก็มีส่วนช่วยให้ซึมซาบเข้าสู่ผิวได้ง่ายกว่า แต่ถ้าต้องการปริมาณโปรตีนที่สูงกว่า เช่น ใช้ผสมในอาหารหรือใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุทางการแพทย์ ที่ไม่ต้องการขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ก็ควรเลือกกระบวนการอื่น เช่น การทำแห้งแบบแช่แข็ง แล้วนำไปบดต่อให้ได้ขนาดที่ต้องการ น่าจะเป็นวิธีที่ได้ปริมาณโปรตีนที่สูงกว่า

เพื่อที่จะลดอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการสเปรย์ไฟโรลิซิส ควรทำให้ช่วงเวลาละอองสารละลายไหมที่จะอยู่ในกระบวนการเอสพีเพิ่มขึ้น ผงไหมจะได้ถูกทำลายโปรตีนน้อยลง และมีระยะเวลาในการทำแห้งเพิ่มขึ้น ดังนั้นควรเพิ่มความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ ในขั้นตอนเอสพี

นอกจากจะใช้รังไหมแล้ว ในประเทศไทยยังมีเศษไหมและน้ำเหลือทิ้งจากกระบวนการลอกกาไหมอีกมากมาย เนื่องจากรังไหมประกอบด้วยกาไหมมีประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือจะมีโปรตีนเซรีซิน อยู่ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ในน้ำลอกกาไหม หากนำน้ำทิ้งจากกระบวนการลอกกาไหมมาผลิตเป็นผงไหม ซึ่งเป็นการลดของเสียและเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งได้ เนื่องจากโปรตีนไหมมีราคาแพง

หากจะผลิตผงไหมในเชิงอุตสาหกรรมควรแยกผลิตเป็นผงไหมเซริชินหรือผงไหมไฟโบรอิน เนื่องจากการใช้ประโยชน์ของผงไหมทั้งสองชนิดแตกต่างกัน และน่าจะได้ปริมาณโปรตีนที่มากกว่า เนื่องจากสภาวะปกติที่ใช้ในการลอกกาวไหมโดยใช้น้ำภายใต้ความดันสูง ซึ่งมีโปรตีนเซริชินอยู่ คือ 120 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (สิริรัตน์, 2548ก) หรือ การทดลองของ Lampoolphak et al. (2008) พบว่า อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เหมาะสำหรับเตรียมสารละลายไหมเซริชิน ส่วนอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เหมาะสำหรับเตรียมสารละลายไหมไฟโบรอิน เมื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง (Autoclave)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2546. 30 ปี วิชาการหม่อนไหม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ.

ชูขวัญ ทรัพย์มณี. 2550. สกัดโปรตีนจากรังไหมสู่ผงไหม. เกษตรกรรมธรรมชาติ (10) 5: 10-18.

ธีระ ชีโวรินทร์. ม.ป.ป.. เคมีและหน้าที่ของกรดอะมิโนและโปรตีน. แหล่งที่มา:

<http://www.med.cmu.ac.th>, 17 กันยายน 2551.

นิรนาม. 2548. การผลิตผงไหม. สถาบันหม่อนไหมแห่งชาติเฉลิมพระเกียรติ สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์พระบรมราชินีนาถ. แหล่งที่มา: <http://www.moac.go.th>, 28 ตุลาคม 2550.

นิรนาม. ม.ป.ป.. การผลิตผงไหมเชิงพาณิชย์ (Production of Silk Powder). เปิดโลกนวัตกรรมไทย. แหล่งที่มา: <http://products.innook.com/product.php?pid=48>, 9 กันยายน 2551.

ประดิษฐ์ มีสุข. 2549. ชีวเคมีเบื้องต้น (เคมีชีวิต). พิมพ์ครั้งที่ 5. มหาวิทยาลัยทักษิณ.

ประทีป มีศิลป์ และ วิทชาวัฒน์ ฤกษ์จร ญ อุษยา. ม.ป.ป.. ผงไหม. แหล่งที่มา:

<http://www.moac.go.th/>, 8 กันยายน 2551.

พรรณนิษฐ์ วิชชาชู และ พนารัตน์ เสรีทวีกุล, ม.ป.ป.. สบู่ไหมไทย. แหล่งที่มา:

<http://www.eto.ku.ac.th/>, 9 กันยายน 2551.

ไพศาล คงกาญจนา. 2542. กระบวนการสังเคราะห์เซรามิกชั้นสูง. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วันกวี กล้ายไม้. 2549. การผลิตผงไหมขนาดเล็กกว่าไมครอนจากเส้นไหมด้วยเทคนิคสเปรย์ไฟโรลีซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิลาสินี คชพงษ์. 2548. การศึกษาโปรตีนในนมที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำโดยเทคนิค SDS-PAGE. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิริรัตน์ จารุจินดา. 2548ก. ไหม: การลอกกาวยไหม และการฟอกขาวไหม. คัลเลอร์เวย์ (10) 56: 34-38.

สิริรัตน์ จารุจินดา. 2548ข. ไหม: การลอกกาวยไหม และการฟอกขาวไหม. คัลเลอร์เวย์ (10) 57: 23-26.

อภิชาติ สนธิสมบัติ. 2551. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: สวมเสื้อผงไหมผืนเนียนนุ่มมทร.ชัยบุรี เย็บเป็นเสื้อกีฬาสวมสบาย-ไม่อับ. คมชัดลึก. แหล่งที่มา: <http://www.komchadluek.net>. 9 กันยายน 2551.

อรุณี คงดี. 2548. โปรตีนไหม/ชีรีซิน. วารสารแม่ใจปริทัศน์ (6) 1: 50-54.

อิสระ เสรีวัฒนวุฒิ, สุรวิทย์ ประพนธ์ทิพย์ และ อาทิวรรณ โชติพฤกษ์. ม.ป.ป.. ผลผลิตจากโปรตีน และกรดอะมิโนมูลค่าเพิ่มที่ได้จากการไฮโดรไลซิสของรำข้าวสาคู ด้วยน้ำกึ่งวิกฤต. แหล่งที่มา: http://www.irpus.org/project_file/2548_2006-08-28_I4810016.pdf, 8 กันยายน 2551.

เออีอีชี คาวาอิ และ เข็มชัย เหมะจันทร์. 2530. วิทยาการไหม เล่ม 1. คณะกรรมการส่งเสริมไหมไทย กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. แปลจาก โมโตอิ มินากาวะ. ญี่ปุ่น.

Bucko, M. M. and J. Oblakowski. 2007. Preparation of BaZrO₃ nanopowders by spray pyrolysis method. **Journal of the European Ceramic Society**. 27: 3625-3628.

Chapron, D., M. Girtana, J.-Y. Lepommelec and A. Bouteville. 2007. Droplet dispersion calculations for ultrasonic spray pyrolysis depositions. **Journal of optoelectronics and advanced materials**. 9: 902-906.

- Chen C.Y., T.K. Tseng, S.C. Tsai, C.K. Lin and H.M. Lin. 2006. Effect of precursor characteristics on zirconia and ceria particle morphology in spray pyrolysis. **Ceramic International**.
- Gürmen, S., S. Stopic and B. Friedrich. 2006. Synthesis of nanosized spherical cobalt powder by ultrasonic spray pyrolysis. **Materials Research Bulletin**. 41: 1882-1290.
- Hino T., M. Tanimoto and S. Shimabayashi. 2003. Change in secondary structure of silk fibroin during preparation of its microspheres by spray-drying and exposure to humid atmosphere. **Journal of Colloid and Interface Science**. 266: 68-73.
- Hong, S. K., H. Y. Koo, D. S. Jung, I. S. Suh and Y. C. Kang. 2007. Preparation of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-BaO-SiO}_2$ glass powders with spherical shape by spray pyrolysis. **Journal of Alloys and compounds**. 437: 215-219.
- Ishikawa H., M. Nagura and Y. Tsuchiya. 1987. Fine structure and physical properties of blend film compose of silk sericin and polyvinyl alcohol. **Sen'i Gakkaishi**. (6) 43: 283-287.
- Ju, S. H., D. Y. Kim, H. Y. Koo, S. K. Hong, E. B. Jo and Y. C. Kang. 2006. The characteristics of nano-sized manganese oxide particles prepared by spray pyrolysis. **Journal of Alloys and compounds**. 425: 411-415.
- Ko, J.-W., J. Yoo, Y.-K. Kim, K.C. Chung, S.-I. Yoo, X.L. Wang, S.X. Dou. 2006. MgB_2 powder preparation though a spray pyrolysis process. **Physica C**. 445-448: 797-800.
- Kongdee A. and N. Chinthawan. 2007. Modification of cotton fibers with sericin using non-formaldehyde released crosslinking agents. **RJTA**. (11) 3: 18-26.

- Lamoolphak, W., M. Goto, M. Sasaki, M. Suphantharika, C. Muangnapoh, C. Prommuag and A. Shotipruk. 2006. Hydrothermal decomposition of yeast cells for production of proteins and amino acids. **Journal of Hazardous Material**. 137 : 1643-1648
- Lamoolphak, W., W. De-Eknamkul and A. Shotipruk. 2008. Hydrothermal production and characterization of protein and amino acid from silk waste. **Bioresource Technology**. 99: 7678-7685.
- Lowry, O.H., N.J. Rosebrough, A.L. Farr, and R.J. Randall. 1951. Protein Measurement with Foline Phenol Reagent. **J. Biol. Chem**. 193 : 265-275
- Robson R.M. (1998). **Handbook of fibre chemistry**. Marcel Dekker.INC, NewYork.
- Sashina E. S., A. M. Bochek, N. p. Novoselov and D. A. Kirichenko. 2006. Structure and solubility of natural silk fibroin. **Russian Journal of Applied Chemistry**. (79) 6: 869-876.
- Sheng, J., H. Lin, L. Wang, Y. Yu and H. Hu. 2000. Study on the microstructure and physical chemical properties of diffluent sericin powder. **SILK**. 6: 6-9.
- Shuler M. L. and F. Kargi. 2002. **Bioprocess engineering**. 2nd ed. Prentice Hall PTR, United States of America.
- Singh, P., A. Kumar, D. Kumar and D. Kaur. 2007. Growth and characterization of ZnO nanocrystalline thin films and nanopowder via low cost ultrasonic spray pyrolysis. **J. of Crystal Growth**. 306: 303-310.
- Tanaka T. 2001. **Antifrosting method, antifrosting agent and snow melting agent**. Japan Patent. 2001-055562A.

- Tsubouchi K. 1999. **Wound covering material**. US Patent. US5951506.
- Vaithanomsat, P. and C. Punyasawon. 2006. Production of water-soluble silkpowder from *Bombyx mori* Linn (Nang-Noi Srisakate 1). **Kasetsart J. (Nat. sci.)**. 40 : 152-158.
- Vaithanomsat, P. and V. Kitpreechavanich. 2008. Sericin separation from silk degumming waste water. **Separation and Purification Technology**. 59: 129-133.
- Wang H., Y. Zhang, H. Shao and X. Hu. 2005. A study on the flow stability of regenerated silk fibroin aqueous solution. **International Journal of Biological Macromolecules**. 36: 66–70.
- Wu, J.-H., Z. Wang, and S.-Y. Xu. 2007. Preparation and characterization of sericin powder extracted from silk industry wastewater. **Food Chemistry**. 103: 1255-1262.
- Zhang, Y.-Q. 2002. Applications of natural silk protein sericin in biomaterials. **Biotechnology Advances**. 20: 91-100.
- Zhang, Y.-Q., M.-L. Tao, W.-D. Shen, Y.-Z. Zhou, Y. Ding, Y. Ma, and W.-L. Zhou. 2004. Immobilization of L-asparaginase on the microparticles of the natural silk sericin protein and its characters. **Biomaterials**. 25: 3751-3759.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การละลายของรังไหม

ตารางผนวกที่ ก1 เปอร์เซ็นต์การละลายของรังไหมเมื่อใช้ความดันบรรยากาศ

ตัวอย่าง		น้ำหนัก (กรัม)			% การละลาย
อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ ไฮโดรไลซิส (นาทีก)	รัง ไหม	กระดาษ กรอง	เศษรังไหมที่ เหลือและ กระดาษกรอง	
170	15	1.002	1.072	1.737	33.63
		1.005	1.083	1.729	35.72
					เฉลี่ย 34.68
170	30	1.001	1.079	1.678	40.16
		1.000	1.072	1.685	39.90
					เฉลี่ย 40.03
170	45	1.002	1.073	1.670	40.42
		1.000	1.082	1.673	40.90
					เฉลี่ย 40.66
170	60	1.002	1.085	1.681	40.52
		1.002	1.088	1.679	41.02
					เฉลี่ย 40.77
200	15	1.000	1.077	1.386	69.10
		1.002	1.083	1.409	67.60
					เฉลี่ย 68.35
200	30	1.002	1.076	1.203	87.50
		1.001	1.086	1.250	83.70
					เฉลี่ย 85.60

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ตัวอย่าง		น้ำหนัก (กรัม)			% การละลาย
อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ ไฮโดรไลซิส (นาที)	รัง ไหม	กระดาษ กรอง	เศษรังไหมที่ เหลือและ กระดาษกรอง	
200	45	1.002	1.102	1.174	92.81
		1.001	1.071	1.158	91.31
					เฉลี่ย 92.06
200	60	1.000	1.066	1.138	92.80
		1.000	1.077	1.156	92.10
					เฉลี่ย 92.45
230	15	1.000	1.086	1.089	99.70
		1.000	1.089	1.093	99.60
					เฉลี่ย 99.65
230	30	1.000	1.075	1.079	99.60
		1.001	1.093	1.096	99.70
					เฉลี่ย 99.65
230	45	1.002	1.082	1.084	99.80
		1.000	1.071	1.073	99.80
					เฉลี่ย 99.80
230	60	1.000	1.084	1.085	99.90
		1.000	1.082	1.083	99.90
					เฉลี่ย 99.90

ตารางผนวกที่ ก2 เปอร์เซ็นต์การละลายของรังไหมเมื่อใช้ความดัน 10 บาร์

ตัวอย่าง		น้ำหนัก (กรัม)			% การละลาย
อุณหภูมิ (°c)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (นาทีก)	รัง ไหม	กระดาษ กรอง	เศษรังไหมที่ เหลือและ กระดาษกรอง	
170	15	1.002	1.095	1.719	37.72
		1.002	1.094	1.727	36.83
					เฉลี่ย 37.28
170	30	1.003	1.084	1.673	41.28
		1.002	1.093	1.682	41.21
					เฉลี่ย 41.24
170	45	1.003	1.119	1.690	43.07
		1.001	1.096	1.667	42.96
					เฉลี่ย 43.02
170	60	1.002	1.087	1.584	50.40
		1.003	1.094	1.596	49.95
					เฉลี่ย 50.18
200	15	1.005	1.092	1.395	69.85
		1.003	1.095	1.394	70.40
					เฉลี่ย 70.12
200	30	1.000	1.079	1.138	94.10
		1.002	1.093	1.154	94.10
					เฉลี่ย 94.10
200	45	1.002	1.096	1.130	96.61
		1.002	1.088	1.129	95.91
					เฉลี่ย 96.26
200	60	1.000	1.092	1.132	96.00
		1.002	1.096	1.128	96.81
					เฉลี่ย 96.41

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ตัวอย่าง		น้ำหนัก (กรัม)			% การละลาย
อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการทำ ปฏิกิริยา (นาทีก)	รัง ไหม	กระดาษ กรอง	เศษรังไหมที่ เหลือและ กระดาษกรอง	
230	15	1.001	1.099	1.121	97.80
		1.002	1.090	1.117	97.30
					เฉลี่ย 97.56
230	30	1.003	1.096	1.119	97.71
		1.001	1.092	1.107	98.50
					เฉลี่ย 98.10
230	45	1.002	1.092	1.102	99.00
		1.002	1.094	1.105	98.90
					เฉลี่ย 99.00
230	60	1.000	1.103	1.108	99.50
		1.003	1.097	1.102	99.50
					เฉลี่ย 99.50

การคำนวณหา % การละลายของรังไหม สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ การละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักรังไหมเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักรังไหมหลังการละลาย}}{\text{น้ำหนักรังไหมเริ่มต้น}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อสภาวะไฮโดรไลซิส คือ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และ มีระยะเวลาในการละลาย เป็น 15 นาที เมื่อใช้ความดันบรรยากาศ

น้ำหนักของรังไหมเริ่มต้น 1.002 กรัม

น้ำหนักของกระดาษกรอง 1.072 กรัม

น้ำหนักของกระดาษกรองและรังไหมที่เหลือ	1.737 กรัม
น้ำหนักของรังไหมที่เหลือ	0.665 กรัม

$$\text{ดังนั้น} \quad \% \text{ การละลาย} = \frac{1.002 - 0.665}{1.002} \times 100 = 33.63$$

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารละลาย A และ สารละลาย B

กำหนด : มวลโมเลกุลโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 40

การเตรียมสารละลาย A เตรียมได้จากซังโซเดียมคาร์บอเนต 2.5 กรัมใส่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลต่อลิตร 100 cm³

วิธีเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลต่อลิตร จากสูตร

$$\frac{\text{น้ำหนักสาร (g)}}{\text{มวลโมเลกุลสาร (g/mol)}} = \frac{\text{ความเข้มข้นสารละลาย (mol/L) x ปริมาตรสารละลาย (cm}^3\text{)}}{1000}$$

$$\text{ดังนั้น ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หนัก} = \frac{0.1 \times 100 \times 40}{1000} = 0.4 \text{ กรัม}$$

การเตรียมสารละลาย B เตรียมได้จากใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรผสมกับสารละลายโพแทสเซียมโซเดียมคาร์เตต 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

วิธีการเตรียมสารละลายอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตร คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} &\text{ในสารละลาย } 100 \text{ cm}^3 \text{ จะมีคอปเปอร์ซัลเฟตอยู่ } 0.5 \text{ กรัม} \\ &\text{ถ้าในสารละลาย } 10 \text{ cm}^3 \text{ จะมีคอปเปอร์ซัลเฟตอยู่ } \frac{0.5 \times 10}{100} = 0.05 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ก

การเตรียมสารละลาย BSA ที่เจือจางตามความเข้มข้น

การเตรียมสารละลาย BSA ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวน 10 มิลลิลิตร
เตรียมได้ดังนี้

สารละลาย 1 มิลลิลิตร จะมี BSA 2 มิลลิกรัม

ถ้าสารละลาย 10 มิลลิลิตร จะมี BSA = $2 \times 10 = 20$ มิลลิกรัม

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงการเจือจางสารละลาย BSA ตามความเข้มข้นต่างๆ

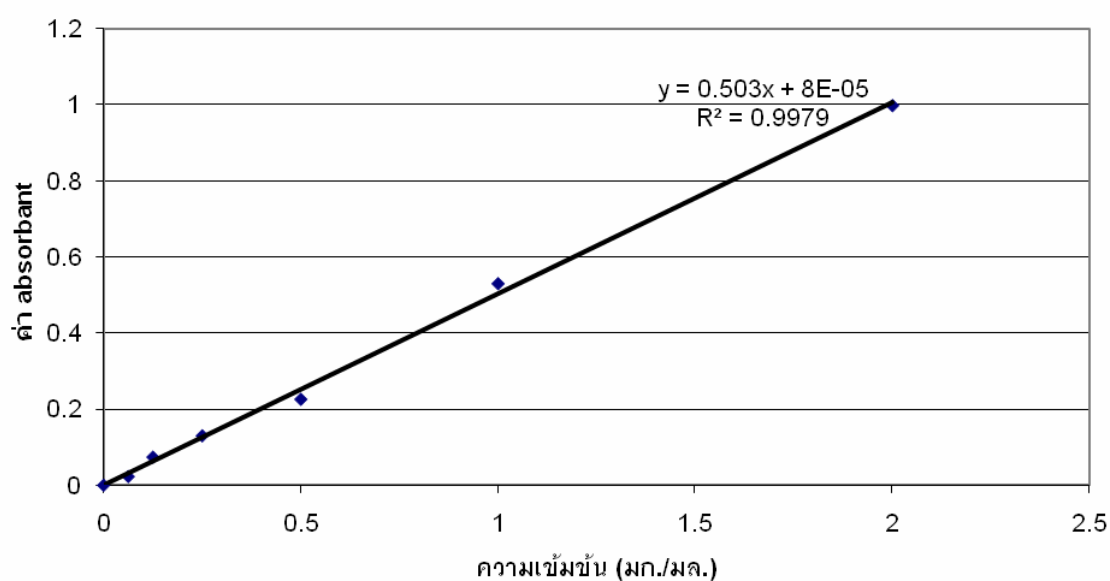
ความเข้มข้นสารละลาย BSA (mg./ml.)	ปริมาตรสารละลาย BSA เข้มข้น 2 mg./ml. (ml)	ปริมาตรน้ำ DI (ml)	ปริมาตรสารละลายรวม (ml)
2.0000	-	-	-
1.0000	5.000	5.000	10
0.5000	2.500	7.500	10
0.2500	0.500	3.500	4
0.1250	0.250	3.750	4
0.0625	0.125	3.875	4

ภาคผนวก ง

กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นโปรตีน

ตารางผนวกที่ ง1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน BSA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ความเข้มข้นของ สารละลาย มาตรฐาน BSA	การดูดกลืนแสง เฉลี่ย ซ้ำการ ทดลองที่ 1	การดูดกลืนแสง เฉลี่ย ซ้ำการ ทดลองที่ 2	การดูดกลืนแสง เฉลี่ย ซ้ำการ ทดลองที่ 3	ค่าการ ดูดกลืนแสง เฉลี่ย
blank	0	0	0	0
0.0625	0.022	0.026	0.020	0.023
0.125	0.071	0.076	0.076	0.074
0.25	0.126	0.131	0.132	0.130
0.5	0.226	0.226	0.225	0.226
1	0.531	0.530	0.528	0.530
2	0.997	0.998	0.999	0.998



ภาพผนวกที่ ง1 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

ภาคผนวก จ

ค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณความเข้มข้นโปรตีนของสารละลายโปรตีนไหม

ตารางผนวกที่ จ1 ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่ได้จากสารละลายไหม เมื่อใช้ความดันบรรยากาศ

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ระยะเวลา ไฮโดรไลซ์ (นาที)	ค่าการ ดูดกลืนแสง เฉลี่ย	ปริมาณโปรตีน (มก./มล.)
170	15	0.315	6.26
170	30	0.326	6.48
170	45	0.346	6.88
170	60	0.348	6.92
200	15	0.432	8.59
200	30	0.544	10.82
200	45	0.496	9.86
200	60	0.443	8.81
230	15	0.400	7.95
230	30	0.306	6.08
230	45	0.274	5.45
230	60	0.272	5.41

ตารางผนวกที่ จ2 ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนที่ได้จากสารละลายไหม เมื่อใช้ความดัน 10 บาร์

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ระยะเวลาไฮโดร ไลซ์ (นาทีก)	ค่าการดูดกลืน แสงเฉลี่ย	ปริมาณโปรตีน (มก./มล.)
170	15	0.352	7.00
170	30	0.371	7.38
170	45	0.378	7.51
170	60	0.433	8.61
200	15	0.477	9.48
200	30	0.546	10.85
200	45	0.525	10.44
200	60	0.439	8.73
230	15	0.412	8.19
230	30	0.327	6.5
230	45	0.269	5.35
230	60	0.260	5.17

ตารางผนวกที่ จ3 ค่าการดูดกลืนแสง และปริมาณโปรตีนของผงไหมที่ความเข้มข้นไหมต่อน้ำเป็น 1:100 ความเข้มข้นของเอทานอลเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่อุณหภูมิช่วงที่สองของกระบวนการเอสพีต่างๆ

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย		ปริมาณโปรตีน (มก./มล.)	
	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน
	กระบวนการเอสพี	กระบวนการเอสพี	กระบวนการเอสพี	กระบวนการเอสพี
160	0.514	0.444	10.22	8.83
170	0.514	0.405	10.22	8.05
180	0.514	0.377	10.22	7.50

ตารางผนวกที่ จ4 ปริมาณความเข้มข้นโปรตีนของผงไหมหลังจากผ่านกระบวนการเอสพี จากสถานะความเข้มข้นเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเป็น 10 ลิตรต่อนาที

การทดลอง	ค่าการดูดกลืนแสงก่อนผ่านกระบวนการเอสพี	ปริมาณโปรตีนก่อนผ่านกระบวนการเอสพี (มก./มล.)	ค่าการดูดกลืนแสงหลังผ่านกระบวนการเอสพี	ปริมาณโปรตีนหลังผ่านกระบวนการเอสพี (มก./มล.)
1	0.225		0.121	
	0.222	4.47	0.117	2.38
	0.228		0.122	
เฉลี่ย	0.225		0.120	
	0.215		0.119	
2	0.218	4.37	0.116	2.36
	0.226		0.122	
เฉลี่ย	0.220		0.119	
ความเข้มข้นโปรตีนเฉลี่ย (มก./มล.)		4.42		2.37

การคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นโปรตีนโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$\text{ปริมาณของโปรตีน (มก./มล.)} = \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสง} \times \text{ค่าการเจือจาง}}{\text{ความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้น}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อสถานะการไฮโดรไลซิส คือ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ และระยะเวลาในการละลายเป็น 15 นาที

ค่าการเงิอจางที่ใ้ ในการทดสอบ 10 เท่า

การดูดกลืนแสง	0.315
---------------	-------

ความชันที่ได้จากกราฟที่พล็อตระหว่างความเข้มข้นสารละลายกับการดูดกลืนแสง 0.503

$$\text{ปริมาณความเข้มข้นโปรตีน} = \frac{0.315 \times 10}{0.503} = 6.26 \text{ มิลลิกรัม/มิลลิลิตร}$$

ภาคผนวก จ

หาความหนาแน่น

ความหนาแน่น (ρ) หาจากชั่งน้ำหนักสารละลายใส่ในขวดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จดบันทึกไว้ เมื่อนำค่าที่ได้แทนในสมการ (3) จะได้ความหนาแน่นดังตารางผนวกที่ ง1

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวลสารละลาย}}{\text{ปริมาตรสารละลาย}} \quad (3)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของสารละลายใหม่ที่ไม่ได้ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายรวม} &= \frac{25.105}{25} \\ &= 1.021 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ จ1 แสดงค่าความหนาแน่น

ความเข้มข้น เอทานอล (% โดยปริมาตร)	มวล (กรัม)				ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ρ (g/cm ³)
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย		
0	25.573	25.498	25.515	25.105	25	1.021
40	22.574	22.642	22.623	24.523	25	0.904
50	21.713	21.792	21.725	22.348	25	0.870
60	21.230	21.056	21.135	21.135	25	0.846

ภาคผนวก ข

แรงดึงผิว

ใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดึงผิวที่ประกอบด้วย วงแหวน เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง เครื่องออกแรงดึง แรงดึงผิว (T) หาได้จากสมการ (4)

$$T = \frac{F}{L} = \frac{mg}{L_{in} + L_{out}}$$

(4)

โดยที่ T = แรงดึงผิว

F = แรงที่มากที่สุดที่ใช้ในการดึงวงแหวน

m = ค่ามวลที่อ่านได้จากเครื่องชั่ง ค่าที่อ่านได้จะเป็นลบเนื่องจากทิศทางตรงข้ามกับค่า g (เพราะเราดึงขึ้น)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงโลก มีค่าเท่ากับ 9.8 เมตร/วินาที²

L_{in} และ L_{out} = ความยาวของภายในและภายนอกของวงแหวน ตามลำดับ เท่ากับ $2\pi r_{in}$ และ $2\pi r_{out}$ ตามลำดับ

วิธีทำ นำวงแหวนจุ่มลงในสารละลาย 20 มิลลิลิตร ปล่อยให้ผิวน้ำ กด tare จากนั้นค่อยๆ หมุนเครื่องออกแรงดึง อ่านค่าที่มากที่สุดที่ได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักก่อนวงแหวนหลุดจากผิวน้ำ

ตัวอย่างการแสดงผลการคำนวณค่าความดึงผิว

$$\text{ความดึงผิว} = \frac{1.316 \times 10^{-3} \times 9.8}{0.368 + 0.379} = 17.264 \text{ mN / m}$$

เมื่อ รัศมีวงแหวนภายใน = 5.819, 5.748, 5.785 cm เฉลี่ย 5.854 ซม.

รัศมีวงแหวนภายนอก = 5.998, 6.060, 6.029 cm เฉลี่ย 6.029 ซม.

ตารางผนวกที่ ข1 แสดงค่าความตึงผิว

ความเข้มข้นเอทานอ (%โดยปริมาตร)	มวลที่อ่านได้จากเครื่องชั่ง (กรัม)				L _{in} (เมตร)	L _{out} (เมตร)	γ (mN/m)
	ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3	เฉลี่ย			
0	1.299	1.257	1.337				
	1.295	1.294	1.377				
	1.268	1.351	1.362				
	เฉลี่ย	1.287	1.301	1.359	1.316	0.368	0.379
40	0.412	0.444	0.425				
	0.425	0.426	0.428				
	0.439	0.448	0.416				
	เฉลี่ย	0.425	0.439	0.423	0.429	0.368	0.379
50	0.356	0.329	0.338				
	0.347	0.316	0.324				
	0.345	0.326	0.329				
	เฉลี่ย	0.349	0.324	0.330	0.334	0.368	0.379
60	0.227	0.226	0.228				
	0.221	0.221	0.217				
	0.219	0.230	0.223				
	เฉลี่ย	0.222	0.226	0.223	0.224	0.368	0.379

ภาคผนวก ข

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคผงไหมที่วัดได้จากโปรแกรม Image J

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้	อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้
1	159.812	20	124.338
2	36.878	21	66.483
3	29.120	22	79.624
4	63.246	23	22.804
5	39.850	24	64.9
6	22.000	25	126.016
7	124.000	26	32.062
8	98.184	27	130
9	17.889	28	70.711
10	50.160	29	26.077
11	43.267	30	39.294
12	44.045		
13	20.000		
14	53.254		
15	38.833		
16	38.833	Mean	62.933
17	124.016	SD	39.617
18	50.359	Minimum	17.889
19	51.923	Maximum	159.812

เมื่อ 1 micron = 150

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้	อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้
1	50.000	20	46.000
2	42.000	21	48.000
3	58.034	22	100.000
4	40.050	23	56.886
5	46.043	24	38.000
6	40.000	25	55.606
7	56.036	26	132.015
8	66.121	27	128.888
9	60.033		
10	58.000		
11	40.050		
12	64.498		
13	42.000		
14	52.000		
15	54.000		
16	54.000	Mean	57.199
17	44.000	SD	25.146
18	20.100	Minimum	20.100
19	52.000	Maximum	132.015

เมื่อ 1 micron = 150

ตารางผนวกที่ ข3 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้	อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้
1	60.000	24	14.000
2	66.000	25	46.000
3	16.000	26	64.000
4	20.100	27	82.000
5	26.077	28	40.000
6	16.125	29	58.000
7	14.000	30	58.000
8	40.000	31	42.000
9	22.000	32	28.000
10	32.000	33	44.045
11	32.062	34	48.000
12	50.000	35	64.125
13	28.000	36	42.000
14	58.000	37	47.539
15	42.000	38	16.000
16	22.091	39	12.000
17	30.000	40	12.166
18	50.000	41	20.396
19	50.000		
20	38.000	Mean	38.164
21	78.000	SD	19.060
22	22.000	Minimum	12.000
23	14.000	Maximum	82.000

เมื่อ 1 micron = 150

ตารางผนวกที่ ๗4 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการใช้ของแก๊สตัวพาที่ 20 ลิตรต่อนาที

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้		
1	26.077		
2	32.000		
3	38.000		
4	40.000		
5	80.000		
6	76.000		
7	58.000		
8	52.000		
9	92.000		
10	48.000		
11	54.000		
12	156.000		
13	112.000		
14	24.000		
15	55.317	Mean	62.107
16	58.000	SD	32.638
17	68.118	Minimum	24.000
18	48.415	Maximum	156.000

เมื่อ 1 micron = 150

ตารางผนวกที่ ๕5 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการใช้ของแก๊สตัวพาที่ 20 ลิตรต่อนาที

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้		
1	56.036		
2	60.000		
3	54.000		
4	44.000		
5	24.000		
6	22.000		
7	40.000		
8	46.000		
9	38.000		
10	56.000		
11	16.000		
12	20.000		
13	34.059	Mean	41.238
14	93.295	SD	19.798
15	24.413	Minimum	16.000
16	32.000	Maximum	93.295

เมื่อ 1 micron = 150

ตารางผนวกที่ ๗6 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจากสารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 60 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 20 ลิตรต่อนาที

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้		
1	28.000		
2	38.000		
3	28.000		
4	36.000		
5	86.000		
6	34.000		
7	16.000		
8	17.889		
9	18.000	Mean	35.000
10	18.111	SD	20.846
11	36.000	Minimum	16.000
12	64.000	Maximum	86.000

เมื่อ 1 micron = 150

ตารางผนวกที่ ข7 ข้อมูลทางสถิติของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของผงไหมที่ผลิตจาก
อนุภูมิ 130/180 สารละลายไหมที่ประกอบด้วยเอทานอล 15 เปอร์เซ็นต์โดย
ปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สดั่วพาที่ 10 ลิตรต่อนาที

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้	อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้
1	10.000	24	9.487
2	13.416	25	13.000
3	12.000	26	9.000
4	14.000	27	9.000
5	17.029	28	12.000
6	12.000	29	8.000
7	12.000	30	16.000
8	14.000	31	10.198
9	7.000	32	17.000
10	9.000	33	16.000
11	11.000	34	9.000
12	9.000	35	19.313
13	8.000	36	11.000
14	23.000	37	12.000
15	13.000	38	14.560
16	15.524	39	9.849
17	20.248	40	12.000
18	20.100	41	9.000
19	12.000	42	11.180
20	18.682	43	9.000
21	9.220	44	10.000
22	10.000	45	16.125
23	12.042	46	15.000

อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้	อนุภาคที่	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่วัดได้
47	16.000	72	10.000
48	12.000	73	13.342
49	15.000	74	11.000
50	6.000	75	14.142
51	10.050	76	15.000
52	13.000	77	12.806
53	12.000	78	14.000
54	19.209	79	11.180
55	12.207	80	10.000
56	16.000	81	7.280
57	12.000	82	14.560
58	11.000	83	9.220
59	8.062	84	12.166
60	11.662	85	10.440
61	8.000	86	14.866
62	9.000	87	10.000
63	14.036	88	10.000
64	12.369	89	8.000
65	8.062	90	12.806
66	11.000		
67	16.763		
68	11.705	Mean	12.215
69	9.434	SD	3.318
70	10.000	Minimum	6.000
71	14.000	Maximum	23.000

เมื่อ 5 micron = 125

ตัวอย่างการคำนวณ

สารละลายใหม่ที่ประกอบด้วยเอทานอล 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ 10 ลิตรต่อนาที

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของผงใหม่ เท่ากับ 62.933

150 เท่ากับ 1 ไมครอน

ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย = $\frac{62.993}{150} = 0.420$ ไมโครเมตร = 420 นาโนเมตร

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	ดั่งฤทัย รัตนสุวรรณ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 กันยายน 2525
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2548)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัย ด้านวิศวกรรม ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2549)