



การพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูกจากการปลูกผลึกนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์  
บนเส้นไหมไฟโบรอิน

Development of bone replacement material via  
nanohydroxyapatite crystal growth on silk fibroin fiber

โดย

ดร. ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

ดร. กัลทิมา เซาร์ชาญชัยกุล

นางสาววรรณช ดีละมัน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๗

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการเสนอแนวทางในการสร้างวัสดุผสมสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนกระดูกในอนาคต ด้วยการปลีกลีกลีอะพาไทต์บนเส้นใยไฟโบรอิน การปลีกลีกลีอะพาไทต์ถูกเตรียมผ่านปฏิกิริยาการตกตะกอนระหว่างสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  และสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  โดยใช้สารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  เป็นสารปรับ pH

งานวิจัยนี้จะตรวจสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายและค่า pH เริ่มต้นที่มีต่อผลลึกลีอะพาไทต์ที่เกิดขึ้น เปลือกไขไก่ถูกใช้เป็นวัสดุดิบของแคลเซียมโดยการเผาผงเปลือกไข่ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อจะได้รับผง  $\text{CaO}$  จากนั้นจึงนำไปละลายในกรด  $\text{HNO}_3$  ก็จะได้รับสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  โดยสารละลายนี้จะถูกปรับความเข้มข้นเป็น 3 ระดับ และปรับค่า pH เป็น 7, 8 และ 9 ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการปลีกลีกลี นำเส้นใยไหมไฟโบรอินไปแช่ในสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นก็เติมสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  ลงไปในเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถูกแช่อยู่ในสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  จากนั้นปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นเวลา 1 นาที ก่อนที่จะนำเส้นใยไหมไฟโบรอินล้างตะกอนต่างๆที่ติดอยู่บนผิวของเส้นใยไหมไฟโบรอิน ผลการทดลองสรุปได้ว่า ผลลึกลีที่เกิดขึ้นมีรูปร่างสี่เหลี่ยมทั้งแบบแผ่น แบบทรงกลม และแบบดอกไม้ ความเข้มข้นของสารละลายและระดับ pH ของสารละลาย มีผลต่ออัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลลึกลีอะพาไทต์ที่เกิดขึ้น โดยอัตราส่วน  $\text{Ca/P}$  เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น หรือระดับ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น ในส่วนสุดท้ายของงานวิจัย ได้ทำการถักทอเส้นใยไหมไฟโบรอินเป็น 2 รูปแบบ คือ แบบลายขัดและแบบลายทแยง และนำไปตรวจสอบเพื่อหาค่ามอดุลัสของยั้งก์และค่าความทนของแรงดึงของทั้งสองรูปแบบนี้ ผลการทดลองพบว่าค่ามอดุลัสของยั้งก์ของผ้าฝืนเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยงและลายขัดมีค่าประมาณ 616 MPa และ 425 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความทนต่อแรงดึงของผ้าฝืนเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยงและลายขัดพบว่ามอดุลัสของยั้งก์ประมาณ 40 MPa และ 72 MPa ตามลำดับจากข้อมูลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขของการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานที่  $\text{CP}_{19}$  มีความเหมาะสมที่สุดและการออกแบบเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายขัดมีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนกระดูกในอนาคต

คำสำคัญ: อะพาไทต์, เส้นใยไหมไฟโบรอิน, การปลีกลีกลี

## Abstract

The objective of this research is to propose a new way to fabricate a composite material for future bone replacement development via growing apatite crystal on silk fibroin fiber. Apatite crystallization on silk fibroin fiber was prepared by precipitation reaction between  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  solution and  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  solution adjusted pH by  $\text{NH}_4\text{OH}$  solution.

In this work, Effect of solution concentration and initial pH values was investigated on apatite crystals. Chicken eggshells were used as calcium source by heating sufficiently powdered eggshells at  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  for 4 h to acquire CaO powders, made  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  solution by dissolving in 65%  $\text{HNO}_3$  solution. Prepared  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  solutions were adjusted concentration as 3 levels and were adjusted different pH values of 7, 8 and 9, respectively. For processing of apatite crystallization, silk fibroin fibers were immersed in  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  solutions for 30 min. After that  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  solutions were added in silk fibroin fibers immersed in  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  solutions. Reaction time was fixed about 1 min before cleaning to remove impurity precipitates on surface of silk fibroin fiber. Finally, apatite crystallization on silk fibroin fibers occurred. The obtained result can conclude morphologies of apatite crystals on silk fibroin fibers was sheets sphere and flower. Solution concentrations and initial pH values directly influenced on Ca/P ratio of obtained apatite crystals by Ca/P ratio increases as increased solution concentrations or increased pH values. Finally research, silk fibroin fibers were woven as two patterns of plain weave and twill weave and they were investigated Young's modulus and tensile strength. The result indicates that Young's modulus of silk fibroin fiber sheets woven as twill weave and as plain weave were about 616 MPa and 425 Mpa and tensile strengths of them weave were about 40 Mpa and 72 Mpa, respectively. The optimum condition of growing apatite crystals on silk fibroin fibers was sample of CP<sub>19</sub>. Design of silk fibroin fiber with plain weave was an optimum pattern for future biomedical applications.

Keyword: Apatite, Silk fibroin fiber, Crystallization

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องมาจากความร่วมมือที่ได้รับเป็นอย่างดีของนักวิจัยในโครงการ ได้แก่ ดร. กัลทิมา เชาวราชญ์ชัยกุล และ นางสาววรรณช ดีละมัน นอกจากนี้ขอกราบขอบพระคุณ ดร. ภัทริณี คลุ่มดวง ที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลในการสรุปผลงานวิจัย สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง ญาติและเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ .....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย .....	3
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย .....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 วัสดุทางการแพทย์ .....	5
2.1.1 ประวัติของวัสดุทางการแพทย์ .....	5
2.1.2 คำจำกัดความและความหมาย .....	5
2.1.3 การประยุกต์ชีวเชิงกลให้เข้ากับวัสดุที่ใช้ฝังในร่างกาย .....	6
2.2 วัสดุชีวภาพการแพทย์ออร์โธปิดิกส์.....	7
2.3 วัสดุเซรามิกที่นำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ .....	9
2.4 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	10
2.5 หนอนไหม .....	12
2.6 โพรตีนไหม.....	17
2.6.1 โครงสร้างไหมไฟโบรอิน.....	21
2.6.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมไฟโบรอิน .....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	24
2.7.1 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก: XRD .....	24
2.7.1 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด: FT-IR.....	27
2.7.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด: SEM .....	30
2.7.4 เครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์: UTM .....	31
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การเตรียมสารตั้งต้นของแคลเซียมจากเปลือกไข่ .....	33
3.2 การเตรียมเส้นใยไหมไฟโบรอิน.....	37
3.3 การปลีกลูกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน .....	39
3.4 รูปแบบเส้นใยไหมไฟโบรอินและการทดสอบความต้านทานแรงดึง .....	40
3.4.1 รูปแบบการถักทอเส้นใยไหมลายขัด .....	40
3.4.2 รูปแบบการถักทอเส้นใยไหมลายทแยง.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไหมไฟโบรอิน .....	42
4.2 ผลการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน .....	43
4.3 ผลการตรวจสอบอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์ บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน .....	53
4.4 ผลการตรวจสอบความแข็งแรงของเส้นใยไหมไฟโบรอิน ที่ถักทอเป็นผ้าฝืนในรูปแบบขัดและทแยง.....	55
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก .....	60
ภาคผนวก ข.....	64
ภาคผนวก ค .....	70
ประวัตินักวิจัย .....	72



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย .....	18
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติความแข็งแรงของวัสดุต่างๆ.....	23
ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ของชิ้นงานตัวอย่าง .....	40
ตารางที่ 4.1 สรุปรูปร่างสัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน .....	52
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน ..	53
ตารางที่ 4.3 สรุปค่ามอดุลัสของยังก์และค่าความทนของแรงดึงของ ผ้าฝ้ายเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยงและลายขัด .....	56





## สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 วงจรของหนอนไหม	14
รูปที่ 2.2 ต่อมสร้างเส้นไหม	16
รูปที่ 2.3 รังไหมพันกันน้อย	17
รูปที่ 2.4 โครงสร้างสามมิติของไหม	21
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงของไหมไฟโบรอินชนิดแผ่นจีบ	22
รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึก	25
รูปที่ 2.7 การทำงานของเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	26
รูปที่ 2.8 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	27
รูปที่ 2.9 แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer	28
รูปที่ 2.10 แสดง อินฟราเรดสเปคตรัม ( IR Spectrum )	29
รูปที่ 2.11 เครื่อง FT-IR Spectrometer	30
รูปที่ 2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์	32
รูปที่ 3.1 การเตรียมผงเปลือกไข่ไก่	34
รูปที่ 3.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ไก่ก่อน และหลังการแคลไซน์ใน บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิในช่วง 200-600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	35
รูปที่ 3.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ไก่ก่อน และหลังการแคลไซน์ใน บรรยากาศปกติที่อุณหภูมิในช่วง 700-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	36
รูปที่ 3.4 การเตรียมเส้นใยไฟโบรอินเพื่อใช้ในการปลี๊กผลึกอะพาไทต์	38
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการปลี๊กผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไฟโบรอิน	39
รูปที่ 3.6 รูปการถักทอเส้นใยไหมเป็นผ้าฝืนแบบลายขัด	41
รูปที่ 3.7 รูปการถักทอเส้นใยไหมเป็นผ้าฝืนแบบลายทแยง	41
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปคตรัมของเส้นใยไหมไฟโบรอิน	42
รูปที่ 4.2 สันฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>17</sub>	43
รูปที่ 4.3 สันฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>18</sub>	44
รูปที่ 4.4 สันฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>19</sub>	45
รูปที่ 4.5 สันฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>27</sub>	46
รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>28</sub>	47

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7	สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>29</sub> .....	48
รูปที่ 4.8	สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>37</sub> .....	49
รูปที่ 4.9	สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>38</sub> .....	50
รูปที่ 4.10	สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่างที่ CP <sub>39</sub> .....	51
รูปที่ 4.11	กราฟอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์ บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน .....	54
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ ผ้าฝืนเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยง .....	55
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ ผ้าฝืนเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายขัด .....	55



## บทที่ 1

### บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงที่มาและความสำคัญว่ามีความเป็นมาอย่างไร มีวัตถุประสงค์อย่างไรบ้าง ขอบเขตรวมทั้งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันการวิจัยพัฒนาด้านวัสดุชีวภาพ (biomaterial) ได้รับความสนใจเป็นอันมาก เนื่องจากวิทยาการทางการแพทย์มีความก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้มนุษย์มีอายุที่ยืนยาวมากขึ้น การพัฒนาวัสดุชีวภาพเพื่อนำมาใช้งานเป็นวัสดุซ่อมแซมหรือทดแทนอวัยวะภายในร่างกายที่บกพร่องหรือถูกทำลายไปจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง วัสดุชีวภาพที่สามารถนำมาใช้กับร่างกายมนุษย์นั้นต้องสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของร่างกาย จากงานวิจัยและพัฒนาในวงการศัลยกรรมกระดูกและฟัน พบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ : HAp) ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกที่มีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกที่คล้ายคลึงกับสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดูกและฟัน [1-3] HAp จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูก โดยพบว่าร่างกายมนุษย์สามารถสร้างเนื้อเยื่อใหม่มาเชื่อมต่อระหว่างกระดูกจริงกับ HAp ได้เองตามธรรมชาติ (Bioactivity) ทำให้เกิดการประสานกันระหว่างกระดูกจริงและ HAp อย่างแน่นหนาและถาวร HAp มีความสามารถในการเข้ากันทางชีวภาพได้ดีมากกับเนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์ (Biocompatibility) อย่างไรก็ตามการนำ HAp มาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูก ณ บริเวณที่ต้องรองรับแรงกระทำสูง ๆ ยังคงมีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจาก HAp มีความต้านทานต่อความเค้นค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะกับการนำมาทำเป็นวัสดุทดแทนกระดูก ณ บริเวณที่ต้องรับความเค้นสูง ๆ เช่น กระดูกข้อต่อบริเวณสะโพก กระดูกบริเวณหน้าแข้ง

การวิจัยและพัฒนาปรับปรุง HAp ให้มีสมบัติทางด้านความแข็งแรงที่สูงขึ้นจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาปรับปรุงความแข็งแรงให้กับวัสดุทดแทนกระดูกจาก HAp มี 2 แนวทางด้วยกัน คือ การเติมสารเสริมแรงลงในเมทริกซ์ HAp และการเตรียมฟิล์มบาง HAp ลงบนวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงด้วยวิธีพลาสมาสเปร์ย์ อย่างไรก็ตาม วัสดุผสม HAp ยังคงมีความแข็งแรงไม่เพียงพอในการนำไปใช้งานบริเวณที่รองรับแรงกระทำสูง ส่วนฟิล์ม HAp บนวัสดุรองรับสามารถเกิดการสลายตัวของ HAp เปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมฟอสเฟตตัวอื่นและแคลเซียมออกไซด์ปะปนมา ณ อุณหภูมิที่ใช้ระหว่างการเคลือบด้วยวิธีพลาสมาสเปร์ย์ สารที่ปะปนมานี้สามารถสลายตัวออกมาซึ่งมีผลทำให้ชั้นผิวของ HAp บางลงเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาไม่นาน และมีผลต่อสมบัติการเข้ากันได้ทางชีวภาพของ HAp และเนื้อเยื่อ ประกอบกับปัจจุบันประเทศไทยยังคงนำเข้าวัสดุทดแทนกระดูกจากต่างประเทศในปริมาณที่สูง ในปี 2554 ประเทศไทยมีการนำเข้าเครื่องมือและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นมูลค่า 4,013 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [4 ]

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นที่มีวิจัยจึงเกิดแนวคิดวิจัยและพัฒนาโครง สร้างวัสดุทดแทนกระดูกด้วยกระบวนการปลูกผลึกนาโน HAp บนวัสดุรองรับที่มีความแข็งแรงสูง แทนการใช้วิธีพลาสมาสเปร์ย์ เพื่อเป็นการพัฒนาสมบัติของวัสดุทดแทนกระดูก และลดการนำเข้าจากต่างประเทศ และเพื่อเตรียมความพร้อมในการรองรับปัญหาทางด้านสุขภาพของประชากรผู้สูงอายุที่กำลังจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นในอนาคต การเลือกใช้ผลึก HAp ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรมาทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวัสดุที่มีขนาดนาโนเมตรมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูง จึงมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะระหว่างวัสดุที่เราสร้างขึ้นกับกระดูกหรือฟันให้สามารถยึดเหนี่ยวกันได้อย่างแน่นหนามากยิ่งขึ้น สำหรับวัสดุรองรับที่มีความแข็งแรงสูงมีส่วนอย่างมากในการยับยั้งการแตกหักของโครงสร้างวัสดุที่เราสร้างขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เส้นใยไหมไฟโบรอินเป็นชั้นวัสดุรองรับ ทั้งนี้เพราะเส้นใยไหมเป็นเส้นใยโปรตีนที่เข้ากันได้ดีกับร่างกายคล้ายกับคอลลาเจนในกระดูกแต่มีความแข็งแรงสูงกว่าถึง 1000 เท่า [5-7] นอกจากนี้ยังพบว่าในแต่ละปี ประเทศไทยผลิตเส้นไหมได้มากกว่า 1,500 ตัน โดยมีเศษไหมเหลือทิ้งไม่ต่ำกว่า 200 ตัน [8] จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำเศษวัสดุเหลือใช้ในชุมชนมาเพิ่มมูลค่าและทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดและยังเป็นการลดการนำเข้าผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ ซึ่งถือได้ว่าเป็นกลยุทธ์สำคัญที่สามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรและเป็นการยกระดับคุณภาพชีวิตตั้งแต่ระดับครัวเรือน ท้องถิ่นไปจนถึงระดับ ประเทศ รวมถึงเพิ่มศักยภาพในการวิจัยด้านวัสดุทางการแพทย์

แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างเส้นใยไหมไฟโบรอินและ HAp โดยมีการเตรียมให้อยู่ในรูปแบบผงที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร [9-11] แต่ในการนำวัสดุเชิงประกอบนี้ไปใช้งานนั้นต้องมีการนำผงวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นรูปร่างให้เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งพบว่าสมบัติทางเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยังคงมีค่าต่ำไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุทดแทนกระดูก [12] ถึงแม้ว่าเส้นใยไหมตามธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลตั้งต้นที่ดีก็ตาม

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำข้อดีของเส้นใยไหมไฟโบรอินที่มีความแข็งแรงสูงมา ร่วมกับ HAp ที่สามารถเข้ากันได้ดีมากกับเนื้อเยื่อร่างกาย โดยการปลูกผลึก HAp ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรลงบนเส้นใยไหมไฟโบรอิน เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาเป็นโครงสร้างวัสดุทดแทนกระดูก โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์บนแผ่นเส้นใยไหมไฟโบรอินโดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และค่าความเป็นกรด-ด่าง และศึกษารูปแบบการถักทอของเส้นใยไหมไฟโบรอินที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุที่เตรียมขึ้นมา เพื่อการประยุกต์ใช้ในอนาค

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกนาโนอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน
2. ศึกษารูปแบบการกักตอมของเส้นใยไหมไฟโบรอินที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุที่เตรียมขึ้นมา

## 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Meinel และคณะ [13] ได้ทดสอบการตอบสนองของเซลล์ต่อวัสดุชีวภาพที่ทำจากไหมทั้ง in vitro และ in vivo พบว่าเส้นใยไหมมีส่วนช่วยทำให้เซลล์เกิดการเกาะติด และเกิดการเพิ่มจำนวนและขนาดของเซลล์นำไปสู่การสร้างเนื้อเยื่อของเซลล์ได้เป็นอย่างดี
2. Cheung และคณะ [5] พบว่าวัสดุทดแทนกระดูกที่ทำจากไหม มีส่วนช่วยในการกระตุ้นและเพิ่มการสร้างเซลล์กระดูกบริเวณตำแหน่งของกระดูกที่ได้รับความเสียหาย และส่งเสริมให้เซลล์มีการสร้างโปรตีนที่สำคัญในการสร้างกระดูกเพิ่มมากขึ้น
3. Niu และคณะ [9] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไหมไฟโบรอิน และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในรูปแบบผงที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร พบว่า วัสดุเชิงประกอบของ SF/HAp มีรูปร่างคล้ายเข็ม โดยมีอนุภาค HAp ขนาดประมาณ 25 นาโนเมตรตามความยาว เกาะอยู่บนผิวของอนุภาค SF ที่มีขนาดประมาณ 400 นาโนเมตรตามยาว และจากการทดสอบทางชีวภาพ พบว่าวัสดุเชิงประกอบของ SF/HAp มีความสามารถในการกระตุ้นเซลล์ของเนื้อเยื่อกระดูกและเจริญเติบโตเป็นเนื้อเยื่อกระดูกบนวัสดุเชิงประกอบของ SF/HAp ได้เป็นอย่างดี
4. Wang และคณะ [10] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างไหมไฟโบรอิน และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ปลูกลงบนเส้นใยไหมมีการเจริญเติบโตของผลึกในระนาบ (0 0 2) ซึ่งเป็นทิศทางที่คล้ายคลึงกับกระดูกธรรมชาติ
5. He และคณะ [11] ได้ศึกษาพบว่ารูปร่างของไฟโบรอินของไหมมีผลต่อรูปร่างของ HAp ที่เข้าเคลือบลงบนผิวของไหม จากงานวิจัยพบว่า อนุภาคของ HAp ที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรที่มีรูปร่างเหมือนเม็ดข้าวถูกสร้างขึ้นเมื่อเตรียม HAp จากไฟโบรอินของไหมที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมในระดับนาโนเมตร (nanosphere) ขณะที่ HAp ที่มีรูปร่างเหมือนเข็มถูกเตรียมจากการปลูกผลึกลงบนไฟโบรอินของไหมที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยในระดับนาโนเมตร (nanofiber)

#### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ปลูกผลึกนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน ด้วยปฏิกิริยาการตกตะกอนร่วมระหว่างสารละลายแคลเซียมไนเตรต ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) และไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ )
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่าง  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  กับ  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  ที่มีผลต่อการเกิดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่อัตราส่วน
3. ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง pH 7-12 ที่มีผลต่อการเกิดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์
4. ศึกษาารูปแบบเส้นใยไหมไฟโบรอินที่มีการถักทอ 2 แบบ
5. ตรวจสอบสมบัติของวัสดุทดแทนกระดูกที่เตรียมขึ้นจากการปลูกผลึกนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDX), scanning electron microscope (SEM) และ universal testing machine

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างวัสดุทดแทนกระดูกที่เสริมแรงด้วยเศษวัสดุเหลือใช้จากเส้นใยไหม
  2. สามารถนำเศษไหมซึ่งเป็นทรัพยากรที่สูญเปล่ามาสร้างมูลค่าเพิ่ม และสร้างสรรค์ให้เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ที่เกิดจากการบูรณาการความรู้ทางด้านนาโนเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์การแพทย์ และภูมิปัญญาชาวบ้าน
- สามารถสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่และกลุ่มวิจัยวัสดุที่มีความพร้อมในการบูรณาการความรู้ทางด้านนาโนเทคโนโลยีเข้ากับภูมิปัญญาชาวบ้านและเผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้สู่ชุมชน

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่จะนำมาใช้ในการทำงานวิจัย โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.1 วัสดุทางการแพทย์ [14-16]

#### 2.1.1 ประวัติของวัสดุทางการแพทย์

การใช้วัสดุต่างๆ เพื่อนำมาทดแทนอวัยวะในร่างกายที่ไม่สามารถทำหน้าที่ได้หรือสูญเสียไปนั้น ได้เริ่มใช้กันนานมาก นับตั้งแต่ที่เริ่มนำเทคโนโลยีมาใช้ทางการแพทย์ และเริ่มมีความรู้ทางเทคโนโลยีของวัสดุต่างๆ ประวัติการนำมาใช้ที่สำคัญได้แก่ การใช้โลหะเพื่อนำมายึดกระดูกที่หักให้ติดกันรวมทั้งนำโลหะหลายอย่างมาใช้ในศัลยกรรมดังต่อไปนี้

- เหล็ก ลวดที่จะทำจากเหล็กนั้นเป็นโลหะชนิดแรกที่ใช้ในการยึดกระดูกที่หัก
- ทองคำ โลหะชนิดนี้ได้ใช้ตั้งแต่ศตวรรษที่ 16 เพื่อซ่อมแซมภาวะเพดานโหว่ แพลตตินัม ใช้เป็นลวดโลหะที่ทำให้เกิดการระคายเคืองได้น้อยที่สุด เมื่อได้ทดลองในสุนัข
- เงิน ได้ใช้ลวดเงินเพื่อยึดติดกระดูกที่หักให้ติดกัน แม้ว่าโลหะชนิดนี้จะไม่เป็นพิษต่อร่างกาย แต่เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้น้อย จึงไม่นิยมใช้
- นิกเกิล ได้ถูกนำมาใช้ในฐานะที่เป็นโลหะสำหรับเคลือบโลหะที่ใช้ฝังในร่างกาย
- แมกนีเซียม ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในการเร่งสร้างกระดูก

#### 2.1.2 คำจำกัดความและความหมาย

คำที่จำเป็นต้องทราบนั้นมีอยู่ 2 คำ ซึ่งต้องแยกความหมายให้ชัดเจนคือคำว่า biomaterials และ biological materials คำว่า biomaterials นั้นมีความหมายว่า เป็นวัสดุอย่างหนึ่งอย่างใดที่นำเข้าไปฝังอยู่ในร่างกาย เพื่อทำหน้าที่เป็นอวัยวะเทียมหรือเพื่อการรักษาบางอย่าง หรือเรียกได้ว่าเป็น “วัสดุชีวภาพ” ส่วนคำว่า biological materials เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเยื่อของร่างกาย เรียกว่า “วัสดุทางชีวภาพ”

ชีววิทยา” วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ได้ถูกจำกัดความหมายโดย Clemson Advisory Board ในการประชุมวัสดุชีวภาพนานาชาติครั้งที่ 6 (The Sixth Annual International Biomaterial Symposium) ว่า “A biomaterials is a systemically, Pharmacologically inert substance designed for implantation within or incorporation with living system” ซึ่งมีความหมายว่า เป็นวัสดุที่มีความเฉื่อยต่อเนื้อเยื่อของร่างกายทั่วไป รวมทั้งความเฉื่อยทางเภสัชวิทยาด้วย หมายความว่า ต้องไม่มีคุณสมบัติเป็นยา เมื่อนำวัสดุนั้นฝังเข้าไปในร่างกายหรือให้วัสดุนั้นไปสัมผัสเป็นส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกาย วัสดุชีวภาพนี้รวมถึงวัสดุที่ใช้ในทางทันตกรรมเพราะวัสดุดังกล่าวนี้ย่อมต้องสัมผัสเนื้อเยื่อร่างกาย โดยมีโอกาสสัมผัสหรือซึมเข้าไปในเลือดได้ เนื่องจากว่าเป้าหมายของการใช้วัสดุชีวภาพคือ การทำให้เนื้อเยื่อตามธรรมชาติและอวัยวะต่างๆ ของร่างกายทำหน้าที่ขึ้นมาได้อย่างปกติ จึงมีความสำคัญมากที่ต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ หน้าที่ และโครงสร้างของวัสดุทางชีววิทยา (biological materials) ดังนั้นต้องศึกษาเรื่องใหญ่ๆ 3 เรื่องด้วยกัน คือ วัสดุทางชีววิทยา วัสดุที่ฝังเข้าไปในร่างกาย และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อร่างกายเรื่องที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องทำการศึกษาคือ สมบัติเชิงกลและไดนามิกของเนื้อเยื่อ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคุณสมบัติทั้งสอง โดยทั่วไปการศึกษานี้เรียกว่า biomechanics เพื่อที่จะนำไปใช้ออกแบบของวัสดุที่สอดใส่เข้าไปในร่างกาย

### 2.1.3 การประยุกต์ชีวเชิงกลให้เข้ากับวัสดุที่ใช้ฝังในร่างกาย

สมรรถภาพของวัสดุที่สอดเข้าไปนั้นจะต้องพิจารณาในด้านความเชื่อถือได้ เช่น มีปัจจัยที่สำคัญ 5 ประการ ที่เกี่ยวข้องกับการยึดติดของหัวกระดูกพีเมอร์ คือการแตกหัก การสึกหรอ การหลวม การหลุด และการติดเชื้อโรคความสำเร็จของวัสดุชีวภาพนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ คุณสมบัติและความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของวัสดุที่ฝังเข้าไป ความทนของเนื้อเยื่อต่อวัสดุที่ฝังเข้าไป และผู้ที่ทำการฝังวัสดุนั้นรวมทั้งการติดตามการเปลี่ยนแปลงของวัสดุนั้นด้วยความต้องการคุณสมบัติของการฝังแผ่นโลหะ เพื่อทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของวัสดุนั้น

1. การยอมรับแผ่นโลหะโดยเนื้อเยื่อนั้นๆซึ่งหมายถึงความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อ (biocompatibility)
2. ต้องไม่มีพิษ และไม่ทำให้เกิดโรคมะเร็ง
3. มีความเฉื่อยทางเคมี และมีความทนทานด้วย



4. มีความแข็งแรงเชิงกลเพียงพอ
5. มีช่วงการทำงานพอก่อนที่จะเกิดการล้า
6. มีการออกแบบทางวิศวกรรมที่แข็งแรง
7. มีน้ำหนักและความหนาแน่นที่เหมาะสม
8. มีราคาค่อนข้างถูก สามารถสร้างได้ง่าย และเป็นจำนวนมาก

## 2.2 วัสดุชีวภาพการแพทย์ออร์โธปิดิกส์

วิวัฒนาการของวัสดุที่ใช้ในทางการแพทย์ ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในตลอดระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา ในยุคแรกๆของวัสดุนี้จะเป็นเรื่องของแบบพิมพ์ต่างๆ ทางด้านวิศวกรรม วัสดุที่ใช้คือ โลหะไร้สนิม (stainless steel) แต่ในยุคปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในทางการแพทย์มีมากถึงกว่า 40 ชนิดที่ผลิตเป็นวัสดุชีวภาพและเครื่องมือใช้ในผู้ป่วย วัสดุยุคแรกๆมีคุณลักษณะคือ ขอให้เป็นแค่เพียงวัสดุที่ใช้แล้วไม่เกิดปฏิกิริยาต่อต้านจากเนื้อเยื่อข้างเคียงก็เพียงพอ แต่ปัจจุบันสิ่งที่สำคัญยิ่งยวดคือ ต้องดูถึงปฏิกิริยาผิวสัมผัส (interfacial reaction) ระหว่างวัสดุที่ใช้กับอวัยวะข้างเคียงที่รองรับ ในอดีตวัสดุที่เคยใช้นั้น ขอเพียงให้อยู่คงทนได้นานแค่หลายปี ก็พอ แต่ปัจจุบันควรมีจุดมุ่งหมายที่จะสามารถใช้งานได้คงทนถึง 20 ปี ทั้งนี้เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้ป่วย ในยุคก่อนนี้การตรวจทดสอบวัสดุที่ใช้ในทางการแพทย์มีไม่มากนัก แต่ในปัจจุบันการที่จะได้มาซึ่งวัสดุใหม่ๆที่ใช้การได้ดีและมีประสิทธิภาพนั้น ต้องผ่านการทดสอบทั้งในแง่กลศาสตร์ ในสัตว์ทดลองและการทดสอบในแบบจำลองเหมือนอวัยวะของจริงในมนุษย์ เพื่อให้ได้มาซึ่งความแน่นอนว่าวัสดุนั้นมีพิษต่อร่างกายหรือเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อข้างเคียงหรือไม่ การศึกษาในห้องทดลองและจากร่างกายของผู้เสียชีวิตใหม่ๆ ในเรื่องของ การเปลี่ยนแปลงของผิววัสดุที่ใช้หรือการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อระหว่างผิววัสดุและอวัยวะที่รองรับช่วยให้เกิดความเข้าใจกระจ่างขึ้นเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและปฏิกิริยาของอวัยวะที่มีต่อวัสดุที่ใช้จุดประสงค์ของการใช้วัสดุทางการแพทย์ก็คือ ใช้ทดแทนส่วนอวัยวะและหรือทำหน้าที่ของอวัยวะที่เสียไป ในขณะที่เดียวกันต้องเป็นวิธีการที่ปลอดภัย เชื่อถือได้ ประหยัด และไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวได้ก็ต้องขึ้นอยู่กับความมั่นคง ความคงทนถาวรของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระหว่างผิววัสดุที่ใช้กับอวัยวะที่รองรับ ต้องมีความเข้าใจว่าผิวสัมผัสของเนื้อเยื่อและวัสดุ (biomaterial-tissue interface) เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ฉะนั้น ต้องมีการศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงทั้งในแง่เคมีและเซลล์ที่เกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุไปฝังแทนอวัยวะส่วน

นี้ๆ เช่นจำเป็นต้องเรียนรู้เคมีพื้นผิว (surface chemistry) การสึกกร่อนของโลหะ (metal corrosion) ปฏิกิริยาต่อพอลิเมอร์ (polymer reaction) และพฤติกรรมพื้นผิวของเซรามิกและแก้ว (ceramic & glass surface behavior) ในปีหนึ่งๆ จากตัวเลขที่ปรากฏ การใช้วัสดุทางการแพทย์ในอเมริกาและยุโรปมีรวมกันมีถึง 4-5 ล้านชิ้น ชิ้นส่วนจากวัสดุที่ต่างกันกว่า 40 ชนิดที่กำลังใช้อยู่ วัสดุทางการแพทย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ โดยพิจารณาในแง่ของปฏิกิริยาเนื้อเยื่อได้ตอบต่อการกระตุ้นที่ผิวสัมผัส (interfacial response)

ชนิดที่ 1 ปฏิกิริยาผิวสัมผัสเฉื่อย, พื้นผิวสัมผัสของวัสดุเรียบ (inert, smooth surface)

ชนิดที่ 2 ปฏิกิริยาผิวสัมผัสเฉื่อย, พื้นผิววัสดุมีรูพรุนเล็กๆ (inert, microporous surface)

ชนิดที่ 3 ปฏิกิริยาเคมีที่ผิวสัมผัสควบคุมได้ (controlled chemical reactive surface)

ชนิดที่ 4 ปฏิกิริยาดูดซึมที่ผิวสัมผัส (resorbable)

**ชนิดที่ 1** ได้แก่ วัสดุทางการแพทย์ที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบัน วัสดุในกลุ่มนี้สามารถเข้ากันได้ดีกับอวัยวะที่ยึดหรือทดแทนและเนื้อเยื่อข้างเคียง แต่อย่างไรก็ตามต้องเกิดมีปฏิกิริยาเนื้อเยื่อต่อวัสดุที่ใช้ โดยเกิดเป็นเนื้อเยื่อแผ่นบางๆ (fibrous capsule) หนา 0.1-10  $\mu\text{m}$  ขึ้นเสมอโดยแทรกระหว่างวัสดุที่ใช้กับอวัยวะที่รองรับ ถึงแม้ว่าเนื้อเยื่อ ดังกล่าวจะแนบชิดติดกับวัสดุก็ตาม แต่ก็ไม่ได้ต่อกันสนิท จึงเกิดการเคลื่อนไหวยระหว่างตัววัสดุที่ใช้กับอวัยวะรองรับโดยเฉพาะเมื่อมีแรงมากระทำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้ความคงทนถาวรของวัสดุที่ใช้มีขีดจำกัด ตัวอย่างเช่น แผ่นโลหะและสกรูยึดกระดูก

**ชนิดที่ 2** เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากการวิจัยเพื่อให้มีคุณภาพดีกว่าชนิดที่ 1 ในแง่ของความมั่นคงผิวสัมผัส (interfacial stability) วัสดุในกลุ่มนี้มีรูพรุนเป็นตะขำที่กำหนดรูปแบบได้ (controlled network of porosity) ตรงบริเวณผิววัสดุเพื่อให้เนื้อเยื่อสามารถเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนที่ผิววัสดุนี้ คล้ายกับเนื้อเยื่อบริเวณเชื่อมต่อระหว่างเอ็นและกระดูก หรือพันกับเนื้อเยื่อหุ้มเหงือก ตัวอย่างเช่น ข้อตะโพกเทียมชนิดผิวโลหะมีรูพรุน

**ชนิดที่ 3** เป็นวัสดุที่วิจัยขึ้นเมื่อใช้แล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี บริเวณผิววัสดุกับเนื้อเยื่อรองรับ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นคือผิวสัมผัสจะประสานกันได้สนิทเหมือนธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น glass ceramics hydroxyapatite

**ชนิดที่ 4** เป็นวัสดุทางการแพทย์เมื่อใช้แทนหรือฝังในอวัยวะของส่วนร่างกายนั้นๆ แล้วเมื่อถึงเวลาที่ทำหน้าที่ครบถ้วนสมบูรณ์แล้วจะเกิดการเสื่อมสภาพของส่วนร่างกายนั้นๆ แล้วเมื่อถึงเวลาที่ทำหน้าที่ครบถ้วนสมบูรณ์แล้วจะเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุและไม่ปรากฏร่องรอยของปฏิกิริยาระหว่างผิวพื้นวัสดุกับอวัยวะที่รองรับเลย วัสดุในกลุ่มนี้ถือว่าเป็นวัสดุที่ต้องการที่สุด แต่การผลิตทำได้ยากมาก และที่มีอยู่ในปัจจุบันก็มีน้อยชนิดมาก ตัวอย่างเช่น tricalcium phosphate ceramics วัสดุทางการแพทย์ทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตาม เมื่อใช้ฝังหรือทดแทนอวัยวะในร่างกายแล้ว ปฏิกิริยาเนื้อเยื่อระหว่างวัสดุและอวัยวะที่รองรับจะเป็นแบบใดก็ตามขึ้นกับชนิดของวัสดุนั้นๆ วัสดุนั้นจะคงไว้ซึ่งคุณสมบัติประจำของตัวมันเองไว้ เพื่อทำหน้าที่ต่อไปในร่างกายให้นานเท่าานานที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์และคุณสมบัติของการใช้วัสดุทางการแพทย์ในวิชาโรคกระดูกและข้อ

### 2.3 วัสดุเซรามิกที่นำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

วัสดุเซรามิกที่เป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น วัสดุคาร์บอน ได้ถูกนำมาใช้ทำเป็นลิ้นหัวใจเทียม สายนำที่สอดผ่านผิวหนังเข้าไปในร่างกาย (percutaneous lead) และในทางทันตกรรม (dentistry) วัสดุคาร์บอนนี้ถึงแม้ว่าจะมีสีดำ แต่ก็มีข้อดีหลายอย่างที่ถูกละเออนำมาใช้ก็คือ ทำได้ง่ายและสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อในร่างกายได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาอะลูมินา (alumina) มาใช้งานเกี่ยวกับกระดูกและข้อต่อเทียม เพราะเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงกดได้มากและมีความแข็งแรงอย่างยิ่งวด ในเรื่องของกระดูกและข้อต่อเทียมนี้ได้มีการพัฒนานำเอา ซิลิกอนไนไตรด์ (silicon nitride) มาใช้แทนอะลูมินา เพราะมีความแข็งแรงที่สูงกว่า เปราะน้อยกว่า และง่ายต่อการขึ้นรูปในแบบต่างๆ นอกจากนี้ยังมีไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) ที่มีรูพรุน ก็ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่ฝังเข้าไปในร่างกาย ในกรณีที่กระดูกหักและสำหรับกระดูกใหม่ที่สร้างสอดแทรกมาตามรูพรุนของวัสดุนี้เป็นการยึดที่มั่นคง แต่เมื่อนำมาใช้งานจริงก็พบว่าวัสดุเซรามิกอาจจะเปราะและความแข็งแรงลดลงได้เมื่อถูกแช่น้ำเกลือหรือถูกฝังไว้ในเนื้อเยื่ออ่อน ตัวอย่างการนำเซรามิกมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

1. อลูมินา (alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) นำมาใช้เป็นกระดูกและข้อเทียม
2. ซิลิคอนไนไตรด์ (silicon nitride) นำมาใช้ในงาน turbine blade ที่มีอุณหภูมิสูง และถูกพิจารณานำมาใช้เป็นกระดูกและข้อเทียมเทียม เพราะมีความแข็งแรงกว่า เปราะน้อยกว่า และขึ้นรูปได้ง่ายกว่าอลูมินา
3. ซีโรเซียม (cerosium, ceramic-epoxy composite) ทำเป็นวัสดุที่มีรูพรุน เพื่อแก้ปัญหาที่เนื้อเยื่อจะไม่ยึดเกี่ยวกับวัสดุที่ฝัง โดยทำการทดลองในหนูและกระต่ายมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1963 แล้วโดยฝังไว้ใต้ผิวหนัง ในกล้ามเนื้อละลายและข้อเข่านานมากกว่า 20 เดือน ไม่พบปฏิกิริยาตอบสนองของเนื้อเยื่อชนิดที่ว่า การอักเสบเฉพาะที่หรือมีแนวโน้มว่าจะเป็นก้อนตม แต่เนื้อเยื่อสามารถสอดแทรกเข้าไปยังรูพรุนได้ ต่อมา Harold Voris ได้รายงานการใช้ซ่อมกระดูกกะโหลกศีรษะในคน ปรากฏว่าได้ผลดี ยึดติดได้ดี ไม่มีปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อโดยรอบ
4. แคลเซียม อลูมิเนต (calcium aluminate,  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) ทำมาจากอลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต กลุ่มที่คล้ายกัน ได้แก่ แคลเซียม ไททาเนต (calcium titanate,  $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ ) และแคลเซียมเซอร์โคเนต (calcium Zirconate,  $\text{CaO} \cdot \text{ZrO}_2$ ) นำมาสร้างเป็นวัสดุที่มีรูพรุน ซึ่งมีขนาดของรูพรุนต่างๆกันถึง 4 ระดับ ตั้งแต่ 45-200 ไมครอน
5. ไพโรไลติกคาร์บอน (pyrolytic carbon, omnicarbon) ใช้ทำลิ้นหัวใจเทียมที่มีข้อดีไม่ ต้องใช้สารกันเลือดแข็งตัว (anticoagulant) เคลือบอีก จากการทดสอบมีอายุการใช้งานมากกว่า 100 ปี
6. แบเรียมไททาเนต (barium titanate,  $\text{BaTiO}_3$ ) และควอตซ์ (Quartz,  $\text{SiO}_2$ ) มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริกกำลังได้รับการศึกษาเพื่อพิจารณาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อธรรมชาติ

#### 2.4 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

แคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate) เป็นแร่ธาตุที่มีน้ำหนักเบา มีความเสถียรทางเคมีและมีองค์ประกอบคล้ายกับเฟสที่เป็นแร่ธาตุในกระดูกจึงมักใช้ทำเป็นวัสดุสังเคราะห์ในรูปของกระดูกเทียม (artificial bone) สำหรับการฝังชนิดต่างๆ หรือสามารถใช้เป็นวัสดุพูนสำหรับเคลือบ (porous coating) ลงไปบนวัสดุสำหรับการฝังชนิดอื่นๆ ด้วยความที่องค์ประกอบของไฮดรอกซีอะปาทิตของแคลเซียมฟอสเฟตสามารถพบได้ตามทั่วร่างกายของมนุษย์ ทำให้มีความเข้ากันได้กับร่างกายนั้นสูงมาก (high compatible) นอกจากนี้เซรามิกชีวภาพในกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตยังมีความคงทนต่อความเสียหายอันเกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ (microbial attack), การเปลี่ยนแปลงค่า pH และสภาวะการเป็นตัวทำ ละลาย (solvent condition) สามารถอยู่ในรูปผลึกของเกลือได้หลากหลายชนิด เช่น

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) และเบต้าไวลอคโคไคท์ ( $\beta$ -whitlockite) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมและฟอสเฟต (Ca:P ratio) การเข้าร่วมปฏิกิริยาของน้ำ สารเจือปน (impurities) และอุณหภูมิ (temperature) ในสภาวะที่มีน้ำเข้าร่วม (wet environment) และที่อุณหภูมิต่ำ ( $< 900^{\circ}\text{C}$ ) แคลเซียมฟอสเฟตจะอยู่ในรูปของไฮดรอกซิล (hydroxyl-; OH) หรือไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในขณะที่สภาวะที่ไม่มีน้ำเข้าร่วม (dry atmosphere) และที่อุณหภูมิสูง แคลเซียมฟอสเฟตจะอยู่ในรูปของเบตาไวลอคโคไคท์ แคลเซียมฟอสเฟตทั้งสองรูปนี้มีสมบัติที่สามารถความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ (tissue compatible) ได้อย่างดีเยี่ยมและมักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกในรูปของเม็ดหรือบล็อกของแข็ง (granular or solid block) ส่วนแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่นๆที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ได้แก่ แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต ( $\alpha$ -tricalcium phosphate;  $\alpha$ -TCP) ไบเฟสิกแคลเซียมฟอสเฟต (biphasic calcium phosphate; BCP) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (monocalcium phosphate monohydrate; MCPM) และอะพาไทต์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์ (unsinter apatite; AP) ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ ซึ่งในการประยุกต์ใช้นั้นจะพิจารณาจากสมบัติการสลายหรือการดูดซึม (biodegradable or resorbable) และการสร้างพันธะกับเนื้อเยื่อ (bioactive or surface reactive) ของตัววัสดุเป็นหลัก ความนิยมในไฮดรอกซีอะพาไทต์เนื่องจากมีความเสถียรอย่างดีเยี่ยมที่ pH สูงกว่า 4.3 ซึ่งในเลือดมีค่า pH 7.3 โดยปกติแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิกทั่วไป (conventional calcium phosphate) จะมีความสามารถในการเผาซินเตอร์ (sinterability) ที่ต่ำมากเนื่องจากว่ามีพื้นที่ผิวที่ต่ำ ( $\sim 2\text{-}5\text{ m}^2/\text{g}$ ) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในกระบวนการดูดซึม (resorption process) ของแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิก โดยทั่วไปจากกระบวนการสังเคราะห์ยังมีความแตกต่างจากแร่ธาตุในกระดูกอย่างสิ้นเชิง เพราะโดยทั่วไปแล้วแร่ธาตุในกระดูกจะมีขนาดในระดับนาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวที่สูงมาก การเจริญของกระดูกจะอยู่ภายใต้เมทริกที่เป็นสารอินทรีย์มีพันธะระหว่างผลึกอย่างหลวมๆ จึงทำให้มีการดูดซึม โดยเซลล์ขนาดใหญ่ที่มีหน้าที่ทำลายหรือขจัดกระดูก (osteoclast) ที่สมบูรณ์และสม่ำเสมอ ดังนั้นแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิกที่มีขนาดอนุภาคไมครอนจึงมีพื้นที่ผิวที่ต่ำ และพันธะระหว่างผลึกที่แข็งแรง กระบวนการดูดซึมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือการแตกสลายของอนุภาคและการแตกตัวของผลึก สมบัติทางกล (mechanical properties) ต่างๆของแคลเซียมฟอสเฟตสังเคราะห์นั้นจะมีค่าต่างๆเป็นไปตามตารางที่ 2.1 สาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลของผลึกเชิงซ้อนของแคลเซียมฟอสเฟตมีค่าต่างๆที่กว้างนั้นเนื่องมาจากมีโครงสร้างที่แตกต่างกันและเป็นผลมาจากกระบวนการเตรียมนอกจากนี้กระบวนการเผาในขั้นสุดท้ายนั้นยังส่งผลให้แคลเซียมฟอสเฟตนั้นสามารถออกมาอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์หรือเบตาไวลอคโคไคท์ แต่ก็มีบางกรณีเมื่อเสร็จสิ้นทางกระบวนการแล้วอาจได้แคลเซียมฟอสเฟตทั้งสองโครงสร้างอยู่ภายในชิ้นงานเดียวกันข้อเสียหลักของแคลเซียมฟอสเฟตก็คือมีความแข็งแรงเชิงกลที่ต่ำ (poor

mechanical strength) ภายใต้สภาวะความเค้น นั้นทำให้แคลเซียมฟอสเฟตสังเคราะห์ (อนุภาคขนาดไมครอน) มีสมบัติการสร้างพันธะกับเนื้อเยื่อที่ต่ำกว่ากระดูกตามธรรมชาติ เช่นเดียวกับเซรามิกชนิดอื่นๆ ความแข็งแรงเชิงดึง (tensile strength) และความแข็งแรงเชิงอัด (compressive strength) ของแคลเซียมฟอสเฟตจะถูกควบคุมโดยรูพรุน (pores) ช่องว่าง (voids) และช่องแคบเล็กๆ (interstices) ซึ่งทั้งหมดนี้เกิดขึ้นหลังจากการทำให้แน่นตัวโดยกระบวนการเผาซินเตอร์ เนื่องจากว่าเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตแตกต่างจากเซรามิกขั้นสูง (advance ceramics) ทำให้การเผาซินเตอร์นั้นกระทำได้อย่างจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าต่ำ

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ

เฟส	โครงสร้างเคมี	อัตราส่วน Ca/P
Hydroxyapatite (HAp)	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	1.67
$\beta$ - Tricalcium Phosphate	$\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1.5
Calcium deficient Hydroxyapatite	$\text{Ca}_{10-x}(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{OH})_2$	1.5-1.67
Etracalcium Phosphate (TTCP)	$\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$	2

## 2.5 หนอนไหม [17]

ไหมเป็นแมลงที่มีการเจริญเติบโตและเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ (Holometabolous หรือ complete metamorphosis) คือ มีระยะไข่ (egg) หนอน (larva) ดักแด้ (pupa) และ ตัวเต็มวัย (adult) ซึ่งในแต่ละระยะจะมีช่วงการเจริญเติบโตและมีลักษณะที่แตกต่างกันไป

ไหม (*Bombyx mori* L.) สามารถจำแนกชั้นได้ดังนี้

Phylum Arthropoda

Class Insecta or Hexapoda

Sub-class Pterygota

Division Endopterygota

Order Lepidoptera

Family Bombycidae

## ชนิดของหนอนไหม

ไหมเป็นแมลงที่มีประโยชน์ เพราะเส้นใยของไหมนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเชิงการค้าและอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี ไหมที่ให้เส้นใย สามารถจำแนกได้ 4 ชนิด คือ

- ไหมกินใบหม่อน (Mulberry silkworms)
- ไหมอีรี (Eri silkworms)
- ไหมทาสาร์ (Tasar silkworms)
- ไหมมูกา (Muga silkworms)

ผลผลิตใยไหมร้อยละ 95 ของผลผลิตใยไหมทั่วโลก มาจากไหมกินใบหม่อน ส่วนใยไหมที่ได้จากไหมชนิดอื่น (ประมาณร้อยละ 5) มีการผลิตน้อยและใช้ประโยชน์เฉพาะบางพื้นที่เท่านั้น

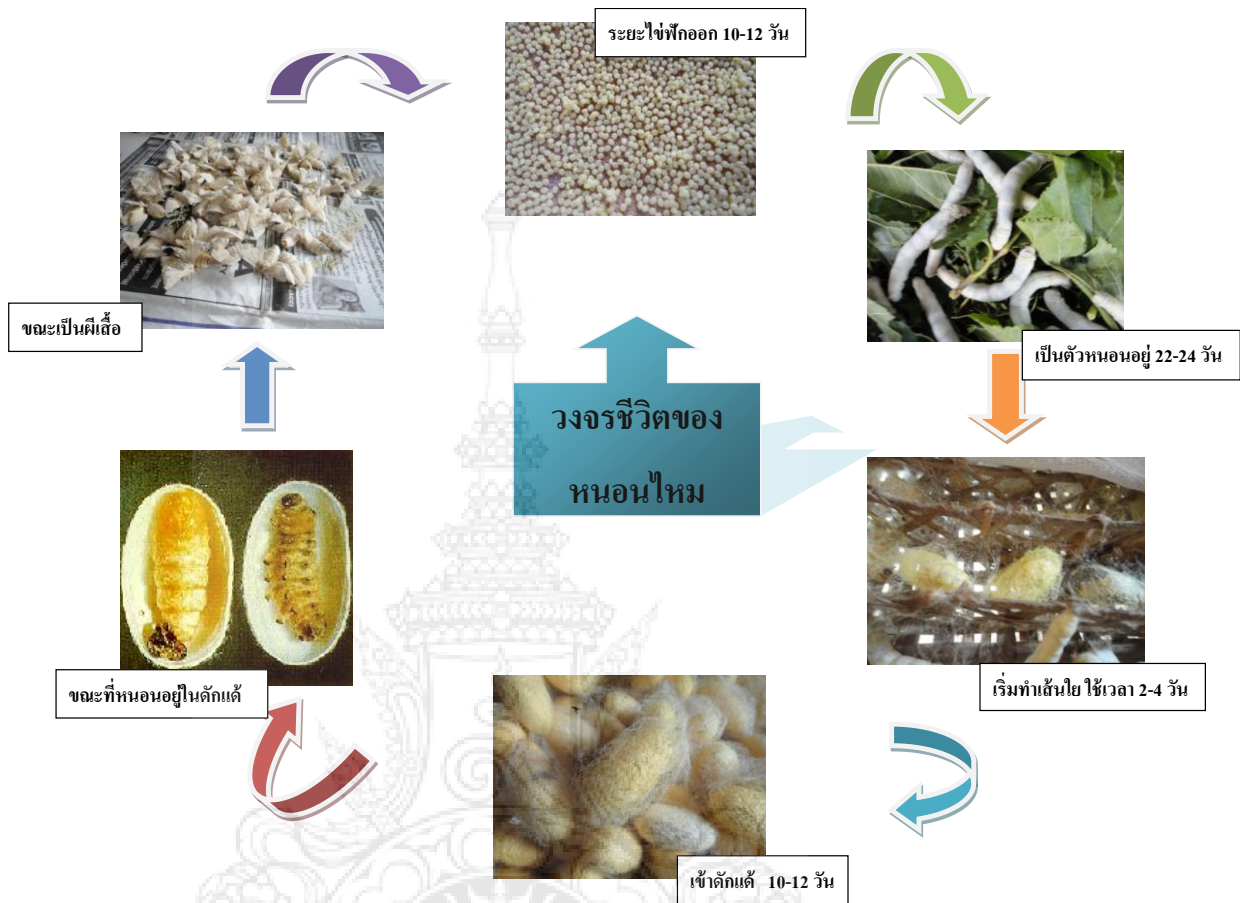
## ไหมกินใบหม่อน

ไหมกินใบหม่อนเป็นแมลงชนิดหนึ่งที่มนุษย์เราเลี้ยงกันมาเป็นอาชีพนานกว่า 4,000 ปีมาแล้ว ตัวไหมที่ใช้เลี้ยงกันอยู่ถึงปัจจุบันนี้ มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Bombyx mori* L. ซึ่งนักวิทยาศาสตร์เชื่อกันว่าเป็นไหมที่กลายพันธุ์มาจากไหมต้นกำเนิด *Bombyx* (*Theophila*) *mandarina* ตามปกติแล้ว *B. mandarina* มี haploid chromosome (n) อยู่ 27 (ในขณะที่เป็น สเปิร์ม (sperm) และไข่ (egg)) เมื่อเกิดการแยกตัว (segregation) ของ chromosome 1 ตัวในพ่อแม่โดยไม่ทราบสาเหตุ ทำให้มี haploid chromosome (n) เพิ่มขึ้นเป็น 28 กลายเป็นพันธุ์ไหมที่เรียกว่า *B. mori*

ไหมกินใบหม่อนนี้ถูกจำแนกออกเป็นพันธุ์ต่าง ๆ ได้อีกหลายชนิด โดยเรียกชื่อไปตามท้องถิ่นที่มีการเลี้ยงไหมชนิดนี้ เช่น พันธุ์ญี่ปุ่น พันธุ์จีน พันธุ์ยุโรป พันธุ์อินเดีย หรือตั้งชื่อไปตามพันธุ์ที่จำนวนการฟักออกตามธรรมชาติในรอบ 1 ปี เช่น ฟักออกปีละ 1 ครั้ง (univoltine) ฟักออกปีละ 2 ครั้ง (bivoltine) และฟักออกตลอดปี (multivoltine หรือ polyvoltine) นอกจากนี้อาจจำแนกเป็นชนิดโดยใช้จำนวนการลอกคราบของตัวหนอนไหมเป็นหลัก เช่น พวกที่ลอกคราบ 3 ครั้ง (trimolters), 4 ครั้ง (tetramolters) และ 5 ครั้ง (pentamolters)

เส้นใยไหมที่ได้จากการกินใบหม่อนนี้มีลักษณะดีเด่นพิเศษคือ เส้นใยยาวติดต่อกันไม่ขาดเป็นช่วง และมีขนาดเท่ากัน จึงเหมาะสำหรับสาวด้วยเครื่องจักรในระดับอุตสาหกรรม ไหมที่ได้จากการสาวนี้เรียกว่า ไหมดิบ (raw silk)

## วงจรชีวิตของไหม



รูปที่ 2.1 วงจรของหนอนไหม

วงจรชีวิตของไหมแบ่งได้เป็นระยะสำคัญๆ 4 ระยะ ดังนี้

1. ระยะไข่ ระยะนี้จะใช้เวลามากน้อยขึ้นอยู่กับพันธุ์ไหม เช่น พันธุ์ที่ฟักออกหลายครั้งต่อปี จะมีระยะเวลาจากไข่จนเป็นตัวอ่อนประมาณ 10-12 วัน แต่พันธุ์โดยทั่วไปที่ฟักออก 1-2 ครั้งต่อปี จะมีระยะฟักไข่นาน 4-10 เดือน เป็นต้น

2. ระยะตัวหนอน เป็นระยะที่ใช้เวลามากที่สุดในวงจรชีวิตโดยทั่วไป คือประมาณ 20-25วัน และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างมากที่สุด ในระยะปลายของหนอนไหม เรียกว่า ไหมสุก นั้นไหมจะหยุดกินอาหาร ลำตัวค่อนข้างโปร่งแสงและคลานหาสถานที่ที่เหมาะสมต่อการทำรังโดยพันเส้นใยออกมาเกาะกับวัตถุที่อยู่รอบตัว ในชวงนี้ไหมจะถ่ายมูลเป็นครั้งสุดท้าย จากนั้นไหมจะเริ่มทำรังส่วนในซึ่งถือว่าเป็นรังแท้ ประมาณ 1-3 วัน หนอนไหมก็จะลอกคราบและกลายเป็นดักแด้อยู่ในรัง

3. ระยะดักแด้ ระยะนี้จะนอนเฉยๆ ประมาณ 10-12 วัน ก็จะลอกคราบเป็นผีเสื้อ



ต่อไป

4. ระยะผีเสื้อ ใหมจะพ่นน้ำลาย ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างออกมาละลายรังไหมให้เป็นช่องเพื่อจะออกมา นอกรัง จากนั้นลำตัวจะค่อยๆ แห้งพร้อมกับกางปีกออกและพร้อมจะผสมพันธุ์และวางไข่ภายใน 24 ชั่วโมง จากนั้นอีก 7-9 วันผีเสื้อก็จะตาย

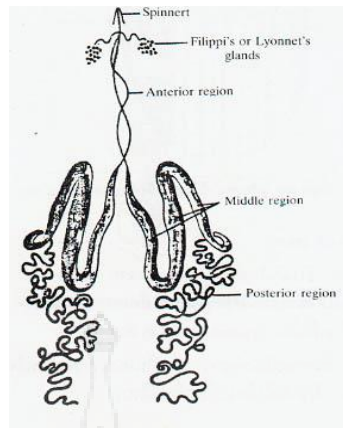
### ต่อมสร้างเส้นไหม

หนอนไหมมีต่อมสร้างเส้นไหม 1 คู่ เจริญมาจาก ectodermal ที่อยู่ในส่วนปาก เมื่อไหม เจริญเต็มที่แล้วต่อมนี้จะขยายใหญ่อยู่ในส่วนท้องระหว่างปล้องที่ 4 และ 8 โดยตั้งอยู่ด้านซ้าย - ขวา ต่อมสร้างเส้นไหมจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ตอนหน้า ลักษณะเป็นท่อยาว เพื่อเป็นทางผ่านของสารเส้นไหม (silk substance) จากนั้นก็จะถูก พ่นออกมาเป็นเส้นใยไหมเพื่อสร้างรังไหม
2. ตอนกลาง เป็นส่วนที่ใหญ่ที่สุดจะขดอยู่เป็นรูปตัวเอส (S) มีหน้าที่เก็บพัก mature fibroin และ สร้าง sericin (gelatinous protein) ล้อมรอบ fibroin
3. ตอนปลาย มีลักษณะเป็นท่อขดไปมามีหน้าที่ในการสร้าง fibroin (silk protein หรือ elastic protein)

บริเวณส่วนหน้าของต่อมสร้างเส้นไหมตอนหน้าท่อทั้งด้านซ้าย-ขวา จะมารวมกันเป็นท่อ เดียวกัน และด้านข้างของท่อดังกล่าวจะมี Filippi's หรือ Lyommet's glands 1 คู่ แยกอยู่ด้านข้าง ของท่อด้านซ้าย-ขวา ต่อมคู่นี้จะทำหน้าที่ช่วยในการพ่นสารเส้นใยไหมต่อมสร้างเส้นไหมจะมีขนาด ใหญ่ขึ้นเมื่อไหมวัย 4 และวัย 5 โดยมีการเจริญเพิ่มขนาดขึ้นอย่างรวดเร็วและแทนที่ท่อทางเดิน อาหาร จนกระทั่งท่อทางเดินอาหารไปอยู่ในส่วนท้ายของลำตัว เส้นไหมที่เกิดขึ้นเป็นสารโปรตีนที่เกิด จากการเปลี่ยนแปลงของสารโปรตีนในเนื้อเยื่อของหนอนไหมแต่ไม่ใช่โปรตีนจากใบหม่อนโดยตรง ต่อมสร้างเส้นไหมจะสร้างและส่งเส้นไหมในรูปของเหลวไปยังท่อคายเส้นไหมที่อยู่ด้านหน้าของต่อม เพื่อพ่นทำรังไหมในช่วงนี้เส้นไหมที่พ่นออกมาจะแข็งตัวเป็นเส้นไหมที่อยู่ในรูปร่างไหม ลักษณะการพ่น เส้นใยของหนอนไหมจะพ่นออกมา 2 ลักษณะ คือ

1. ลักษณะตัวเอส S (S-type) หนอนไหมจะพ่นออกมาในช่วงการสร้างรังระยะแรก ซึ่งเป็นส่วนของ รังนอกการเรียงตัวของเส้นใยในลักษณะนี้จะสวยงาม
2. ลักษณะเลขแปด (8 type) ซึ่งมักพบช่วงทำรังตอนใน เส้นไหมที่พ่นออกมาจะเล็ก สววยาก และ ขาดบ่อย



รูปที่ 2.2 ต่อมสร้างเส้นไหม

### ความรู้เกี่ยวกับรังไหม

รังไหม หมายถึง เส้นใยที่ตัวหนอนไหมพ่นออกมาพันตัวเพื่อเป็นเกราะป้องกันตัวเองจากศัตรูก่อนที่จะเป็นตัวหนอนไหมจะพัฒนาเป็นดักแด้ และป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอากาศส่วนประกอบของรังไหมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

1. ชั้นนอก มีลักษณะเป็นเส้นใยปุยฟูที่หุ้มส่วนที่เป็นรังไหมโดยรอบ มีสีเหลืองหรือขาวขึ้นอยู่กับพันธุ์
2. ชั้นที่สอง คือ ส่วนที่เป็นเปลือกรังไหมหรือส่วนที่มีใยไหมแท้ๆ เรียงตัวเกาะแน่น
3. ชั้นในสุด คือ ส่วนที่เป็นเยื่อบางถัดจากชั้นที่สองซึ่งห่อหุ้มตัวดักแด้ไว้ เกษตรกรผู้ผลิตรังไหมจะทำการคัดเลือกรังไหมตามความแตกต่างของคุณภาพรังไหม โดยคัดรังไหมที่มีคุณภาพดีเท่านั้นขายให้กับโรงงานสาวไหม ส่วนรังไหมที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งหมายถึงรังเสีย หรือรังไหมที่มีรูปร่างผิดปกติไม่สามารถนำไปสาวด้วยเครื่องจักรได้ เช่น รังแผ่ ไหมตายในรัง รังติดจอร์เจี้ยน รังหัวท้าย บางรังไหมที่ถูกหนอนแมลงวันทำลาย และรังหลวม จะนำไปสาวเองหรือนำออกขายพร้อมเส้นไหมที่เกิดจากขบวนการผลิต

พันธุ์ไหมในประเทศไทยมีจำนวน 28 พันธุ์ โดยมีทั้งพันธุ์แท้ของไทยและพันธุ์ผสมที่ได้จากการพัฒนาในที่นี้จะยกตัวอย่างพันธุ์ไหมที่ใช้ทำการวิจัย

นางน้อย (นางขาว)

ประวัติ -

ลักษณะเด่น

- เป็นไหมพันธุ์แท้สายพันธุ์ไทย มีความแข็งแรง เลี้ยงง่าย
- จำนวนไข่ไหมต่อแม่สูงกว่าพันธุ์พื้นเมืองที่เกษตรกรนิยมเลี้ยง
- สามารถเลี้ยงได้ในที่มีอุณหภูมิสูง (33-35 องศาเซลเซียส)
- รูปร่างหนอนไหม รังไหม มีความสม่ำเสมอ

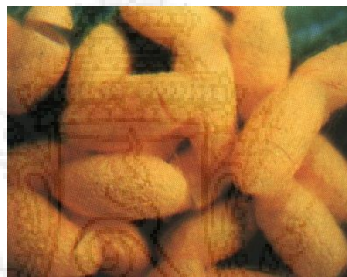
ลักษณะประจำพันธุ์

### 1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

- เป็นไหมพันธุ์แท้สายพันธุ์ไทย ชนิดฟักออกตลอดปี
- ลำตัวหนอนไหมมีสีขาวนวล
- รูปร่างรังไหม หัวรังป้าน ท้ายรังค่อนข้างแหลม

### 2. ลักษณะทางการเกษตร

- ระยะเวลาการเลี้ยง 18-22 วัน ในฤดูร้อนและฤดูหนาว
- จำนวนไข่ไหมต่อแม่ 378 ฟอง
- ความยาวรังไหม 3 เซนติเมตร ความกว้าง 1.5 เซนติเมตร
- น้ำหนักรังสด 1 รัง 0.96 กรัม
- น้ำหนักเปลือกรัง 1 รัง 13.00 เซนติกรัม
- ความยาวเส้นใยต่อรัง 370-410 เมตร



รูปที่ 2.3 รังไหมพันธุ์นางน้อย

## 2.6 ไพรตินไหม [18]

ไหมเป็นโปรตีนชนิด พอลิเอไมด์ (polyamide) ถือเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวด้วยการควบแน่นซึ่งพ่นมาจากต่อมไหมของหนอนไหมพันธุ์ต่างๆ (silkworm silk) เพื่อห่อหุ้มรอบตัวเอง นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในแมลงจำพวกแมงมุม (spider silk) ที่ทำการพ่นใยเพื่อสร้างตาข่ายสำหรับเป็นรังหรือห่อหุ้มไข่ หรือไว้ดักแมลงตัวอื่น

รังไหมที่ได้จากหนอนไหม *Bombyx Mori* มีส่วนประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ส่วน คือ ซีรีซิน (Sericin protein) และโปรตีนไฟโบรอิน (Fibroin protein)

- โปรตีนซีรีซินถูกสร้างมาจากต่อมบริเวณส่วนกลางของลำตัวหนอนไหม มีคุณสมบัติเหนียวคล้ายกาว เคลือบอยู่รอบๆ เส้นไหมหรือไฟโบรอิน ทำหน้าที่เคลือบหรือห่อหุ้มและเป็นกาวยึดเกาะเส้นไฟโบรอินให้คงสภาพเป็นรังไหมไว้ได้ สามารถละลายน้ำได้ดีประมาณ 20-30 %
- ส่วนโปรตีนไฟโบรอินถูกสร้างมาจากต่อมบริเวณส่วนหลังของหนอนไหม

เป็นโปรตีนประเภทเส้นใย ซึ่งเป็นส่วนที่นำมาใช้ในการทอผ้าไหมและเป็นโปรตีนที่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายส่วนใหญ่ รวมน้ำ กรด ต่าง มีประมาณร้อยละ 70-80 % โดยโปรตีนที่ได้จากหนอนไหมดังกล่าวจะประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีคุณค่า ดังตารางที่ 1 และเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายของมนุษย์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย

ชนิดกรดอะมิโนในผงไหม	หน้าที่และคุณสมบัติ
Glycine #	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอล</li> <li>- ป้องกันและรักษาความดันโลหิตสูง</li> <li>- ช่วยเสริมสร้างการทำงานของตับ</li> </ul>
Alanine #	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นแหล่งพลังงานสำคัญต่อเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ สมอง และ ระบบประสาทส่วนกลาง</li> <li>- ผลิต antibodies ที่ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันดีขึ้น</li> <li>- ช่วยในระบบการทำงานของน้ำตาลและกรดอินทรีย์ digest alcohol (สลายแอลกอฮอล์)</li> </ul>
Serine #	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นแหล่งสะสมน้ำตาลกลูโคสในตับ และกล้ามเนื้อ จึงช่วยส่งเสริมระบบการทำงานของอินซูลิน (Insulin) เป็นการลดน้ำตาลในซึ่งช่วยในการเผาผลาญไขมันที่สะสมในร่างกาย</li> <li>- ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันแข็งแรงขึ้น</li> <li>- ช่วยสังเคราะห์กรดไขมันล้อมรอบ Never fibers</li> </ul>
Aspartic acid*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยขับไล่อาการเจ็บ และสารพิษแอมโมเนียออกจากร่างกาย</li> <li>- ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเหนียวอ่อน</li> </ul>

	- ช่วยระบบกล้ามเนื้อ และการเคลื่อนไหว
Tyrosine	- ช่วยในการส่งผ่านเส้นประสาทไปยังสมอง อีกทั้งมีผลดีต่อระบบประสาท - ช่วยความจำ - กระตุ้นการเต้นของหัวใจ
Glutamic acid	- ช่วยลดแอมโมเนียในเลือดซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับโปรตีน ในสมอง และระบบการทำงานของน้ำตาล - ช่วยควบคุมโรคสุรา (Alcoholism) - รักษาปริมาณน้ำของผิวหนัง และป้องกันผิวหนังแห้ง
Threonine*	- ป้องกันการเกิดไขมันในตับ - ช่วยย่อยและช่วยระบบการทำงานของร่างกาย
Isoleucine*	- กระตุ้นการทำงานของสมองส่วนบน
Leucine*	- ลดน้ำตาลในเลือด - ช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น
Arginine	- เสริมสร้างภูมิคุ้มกันต่อเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส และเซลล์เนื้องอก - ช่วยให้แผลแห้งเร็วขึ้น - ช่วยเสริมสร้างตับ
Cystine	- ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และเพิ่มความแข็งแรงให้ร่างกายต่อต้านรังสี และมลพิษ - ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความจำเป็นต่อการสร้างผิวหนัง ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิร่างกาย และ แผลผ่าตัดหายเร็วขึ้น</li> <li>- ส่วนของนมและผิวหนังจะประกอบไปด้วย Cytine 10-14 %</li> </ul>
Lysine*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต่อต้านริเริ่ม ภูสวิต โดยจะช่วยให้เกิดความสมดุลของธาตุอาหาร และการเจริญเติบโตของไวรัส</li> <li>- การขาด Lysine มีผลทำให้เหนื่อยง่าย ยับยั้งการเติบโต ผสม่วง โรคโลหิตจาง และเกิดปัญหาต่อระบบสืบพันธุ์</li> </ul>
Phenylalanine*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีผลต่อระบบเส้นประสาท</li> </ul>
Methionine*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นแหล่งที่ให้สารกำมะถันซึ่งป้องกันการเกิดโรคเกี่ยวกับผิวหนังและเล็บ</li> <li>- ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอล โดยการผลิตเลซิทินในตับ</li> <li>- ลดไขมันตับ และป้องกันไต</li> <li>- ป้องกันผอมร่วงและส่งเสริมการเจริญของเส้นผม</li> </ul>
Valine*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยให้จิตใจกระปรี้กระเปร่า ประสานการทำงานของกล้ามเนื้อ</li> </ul>
Tryptophan*	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สนับสนุนการผลิตเม็ดเลือดแดง</li> <li>- ป้องกันและช่วยลดอันตรายที่เกิดกับเส้นโลหิตแดง และการชักกระตุกของหัวใจ</li> <li>- ทำงานร่วมกับ Lysine ในการลดคอเลสเตอรอล</li> </ul>
Proline	<ul style="list-style-type: none"> <li>- รักษาความดันโลหิต</li> <li>- มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของข้อ และเอ็น</li> <li>- ช่วยบำรุงรักษากล้ามเนื้อหัวใจ</li> </ul>

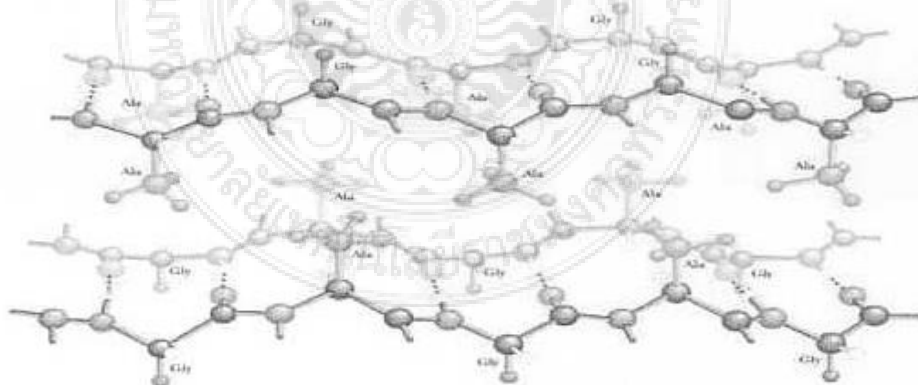
Histidin	<p>-พบมากในเม็ดเลือดแดง ใช้ในการรักษาโรคมาตอยโรคข้ออักเสบ</p> <p>อาการผื่นคัน โรคผื่นคัน แผลพุพอง และโรคโลหิตจาง</p> <p>-ถ้าขาดจะมีผลต่อการได้ยินเสียงลดลง</p> <p>-ส่งเสริมการผลิตเซลล์เม็ดเลือด ช่วยขยายหลอดเลือด</p>
----------	--

หมายเหตุ \* กรดอะมิโนที่มีจำเป็น (Essential amino acid)

# กรดอะมิโนในใหม่ที่พบมาก และมีความสำคัญต่อร่างกายมากที่สุด (3ชนิด)

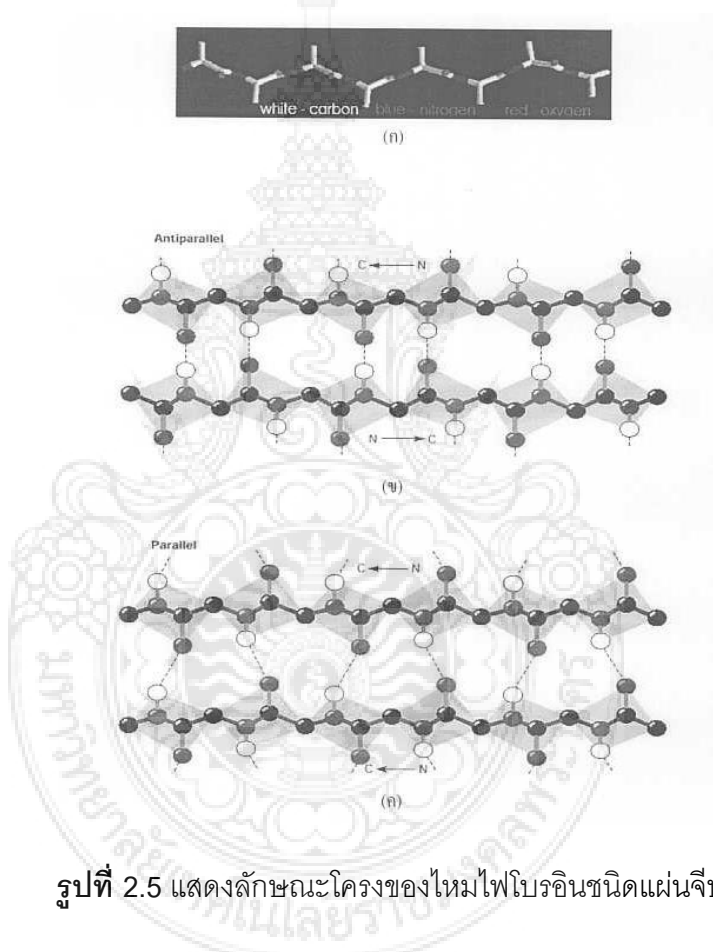
### 2.6.1 โครงสร้างไฟโบรอิน

โปรตีนเส้นใยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ โปรตีนที่เรียกว่าไฟโบรอิน(Fibroin) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณ 78 % ของน้ำหนักไหมดิบ) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 15 ชนิด กรดอะมิโนหลักๆ ที่พบในเส้นใยได้แก่ ไกลซีน (Glycine, 40 %) อะลานีน(Alanine, 29%) และเซรีน (Serine, 12 %) แต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R (โซ่ข้าง) ดังแสดงในตาราง 2.2 กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายยาวที่เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์เป็นสายยาวขนานกับแกนในลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น มีความแข็ง เหนียวและอาจยืดหยุ่นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 □ และมีโครงสร้างปฐมภูมิที่ซ้ำกัน คือ (Gly-Ala- Gly-Ala-Gly-Ser)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสามมิติของไหม

โปรตีนทั้งหลายในธรรมชาติประกอบด้วยสายพอลิเพปไทด์ที่มีสูตรโครงสร้างทุติยภูมิ โดยปกติในไฟโบรอินของไหมมักพบโครงสร้างชนิดแผ่นพับ ซึ่ง  $\beta$ -พ्लीทเทดชีทมีด้วยกัน 2 โครงสร้าง (รูปที่ 2.5 ก) คือ  $\beta$ -พ्लीทเทดชีทที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยัง C ที่อยู่ตรงข้ามกันเรียกว่าแอนติพาราเลล  $\beta$ -พ्लीทเทดชีท (Antiparallel pleated sheet structure) (รูปที่ 2.5 ข.) และ  $\beta$ -พ्लीทเทดชีทที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยังฝั่ง C เหมือนกัน เรียกว่าพาราเลล  $\beta$ -ชีท (parallel pleated sheet structure) (รูปที่ 2.5 ค.) ไฟโบรอินของไหมส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างแผ่นพับแบบแอนติพาราเลล



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงของไหมไฟโบรอินชนิดแผ่นพับ

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแบบเบต้า ( $\beta$ -pleated sheet)
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแบบแอนติพาราเลล (Antiparallel pleated sheet structure)
- (ค) พาราเลล (Parallel pleated sheet structure)



## 2.6.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมไฟโปอิน

สมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง โดยมีค่าการต้านแรงดึง 500-900 MPa และมีการยืดตัว 20-30 % ซึ่งถือได้ว่าเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ วัสดุชีวภาพชนิดอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังพบว่าไหมมีความสามารถในการคืนกลับได้ดี จึงไม่เกิดการยับง่าย มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ไม่ดี สำหรับสมบัติทางเคมี พบว่า มีความคงทนต่อสารทำลายอินทรีย์ทุกชนิด แต่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริกเข้มข้นได้ สำหรับความคงทนในด่างพบว่า ไหมถูกทำลายในด่างเข้มข้น และแคลเซียมไฮดรอกไซด์

หากเปรียบเทียบสมบัติความแข็งแรงของไหมที่ผลิตจากไหมเลี้ยงและไหมป่า พบว่าไหมป่าจะให้ลักษณะความแข็งแรงต่ำกว่า แต่มีความยืดหยุ่นตัวดีกว่า และค่า yield point ซึ่งอธิบายได้จากโครงสร้างของไหมป่าเองที่มีความไม่เป็นระเบียบสูงกว่าในระดับโมเลกุล รวมทั้งไหมป่ามีองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่ประกอบด้วยหมู่ข้างเคียงขนาดใหญ่กว่าไหมเลี้ยงในปริมาณสองเท่า จึงส่งผลให้การยืดตัวของไหมป่ามีค่าสูงเป็นสองเท่าของไหมเลี้ยง สำหรับสมบัติเชิงกลของไหมจากแมงมุม จะเห็นได้ว่าส่วนของไหมที่ใช้ในการทำกรอบของใยแมงมุมจะมีความแข็งแรงสูง ส่วนไหมที่ใช้สำหรับดักแมลงมีค่าการยืดตัวสูงถึง 500% แต่มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าเป็น 2-3 เท่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยการจัดเรียงโครงสร้างของกรดอะมิโนดังที่อธิบายไปแล้วข้างต้น

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติความแข็งแรงของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	Tensile strength (MPa)	Modulus (GPa)
ไหมหม่อน	875-972	11-13
คอลลาเจน	0.9-7.4	0.0018-0.046
กระดูก	130-180	20

## 2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

- เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction : XRD)
- เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (UNIVERSAL TESTING MACHINE: UTM)

โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.7.1 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (X-ray diffraction : XRD) [19-20]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive analysis) ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในวัสดุเบื้องต้น ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยข้อมูลของชุดค่า  $d$  - spacing และความเข้มของรังสีที่ตรวจจับได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters) โครงสร้างผลึก (Crystal structure) อย่างคร่าวๆ ชนิดของเฟสที่ปรากฏ ขนาดของเกรน (Grain size) และในบางกรณียังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงของส่วนประกอบของโครงสร้าง (Texture analysis) ได้อีกด้วย

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตร เมื่อรังสีเอกซ์เกิดอันตรกิริยากับสารจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเปล่งแสง การดูดกลืน การกระเจิงหรือการเลี้ยวเบน ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับสารแต่ละชนิด เนื่องจากของแข็งที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบในสามมิติและมีหลายชุดระนาบ เมื่อรังสีเอกซ์มาตกกระทบบนผิวของชุดระนาบต่างๆ ด้วยมุมที่เหมาะสมจะทำให้เกิดพฤติกรรมการเลี้ยวเบน ซึ่งการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง (Powder X – ray Diffraction) และสำหรับตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single – crystal X – ray Diffraction)

1. ตัวอย่างที่เป็นผง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ สามารถบอกวิฤภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่ามีความเป็นผลึกหรือเป็นอสัณฐาน เทคนิคนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งวิฤภาคของวัสดุได้
2. ตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวสามารถหาโครงสร้างของโมเลกุลได้ คือ สามารถบอกการจัดเรียงตัวของอะตอม ความยาวพันธะ มุมระหว่างอะตอมในโมเลกุล เนื่องจากวัสดุตัวอย่างสำหรับเทคนิคนี้

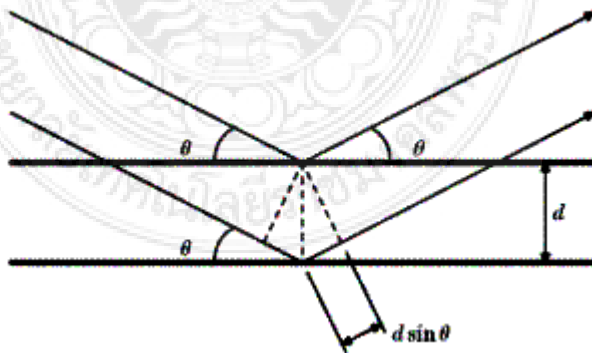
ต้องเป็นผลึกเดี่ยว ดังนั้นขั้นตอนการตกผลึกจึงมีความสำคัญมากในการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์นั้น

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึกจะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผลึกแล้วเกิดการกระเจิง โดยชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึก รังสีเอกซ์ที่กระเจิงนี้ยังคงมีความยาวคลื่นไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่า การกระเจิงแบบอาพันธ์ (Coherent scattering) หรือการกระเจิงแบบแบรกก์ (Bragg scattering) การเลี้ยวเบนนี้อธิบายได้ 2 แบบ คือ ตามสมการของเลาเอ (Laue equation) และตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) แต่ในที่นี้จะอธิบายตามกฎของแบรกก์ ซึ่งเหมาะกับผลึกผง เมื่อรังสีเอกซ์ความยาวคลื่น  $\lambda$  ตกกระทบผลึกจะเกิดการกระเจิงจากชุดระนาบของอะตอม ถ้ามุมตกกระทบ  $\theta$  ทำมุมที่พอเหมาะกับความยาวผลึกและ  $d$  คือระยะระหว่างระนาบในชุดเดียวกัน สำหรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจะทำมุม  $2\theta$  กับแนวรังสีตกกระทบ ซึ่งรังสีทั้งสองจะมีค่าความแตกต่างของทางเดิน (Path difference) และมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ นั่นคือรังสีเอกซ์ทั้งสองอยู่ในเฟสเดียวกัน จะได้

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

โดยที่  $n$  คือ เลขจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ  $0, \pm 1, \pm 2, \dots$

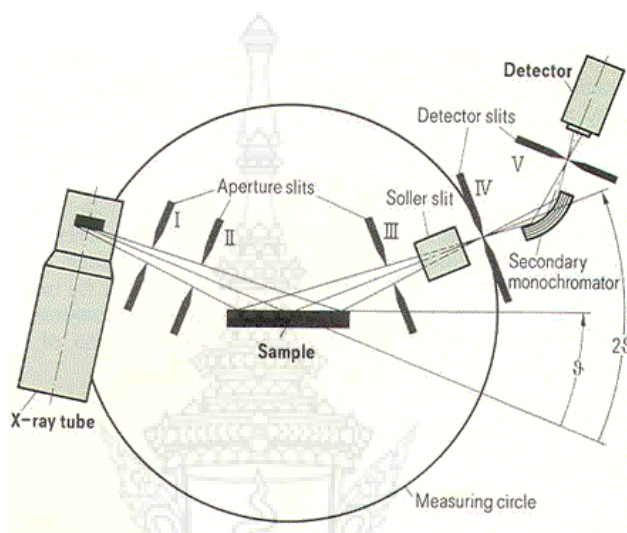
$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึก

เครื่องมือที่วัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์คือ เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว และใช้กับตัวอย่างแร่ที่บด

เป็นผงละเอียดอัดลงในที่ใส่ตัวอย่างหรือฉาบบนแผ่นสไลด์ เครื่องนี้จะปล่อยรังสีให้ตกกระทบบนตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะหมุนไป โดยทำมุม  $\theta$  กับแนวยิง หลอดสำหรับนับความเข้มข้นของรังสีที่สะท้อนออกจากผงผลึกจะหมุนไปเช่นกันเป็นมุมเท่ากับ  $2\theta$  เครื่องนับความเข้มของรังสีจะส่งข้อมูลที่ได้ไปยังเครื่องขยาย (Amplified) และแปลงค่าเป็นตัวเลขหรือบันทึกบนกระดาษตารางบันทึก ซึ่งเคลื่อนที่ในอัตราเร็วที่ปรับได้ตามต้องการ



รูปที่ 2.7 การทำงานของเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์



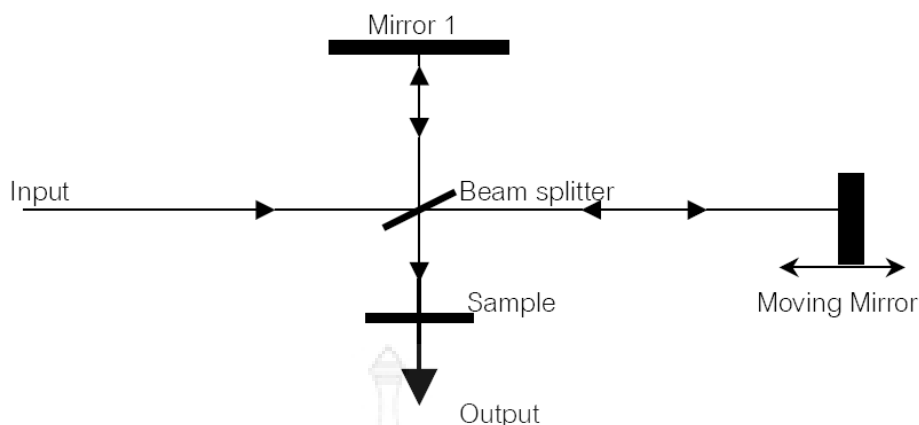


รูปที่ 2.8 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Philips diffractometer )

### 2.7.2 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

(Fourier Transform Infrared Spectrometer: FT-IR) [21]

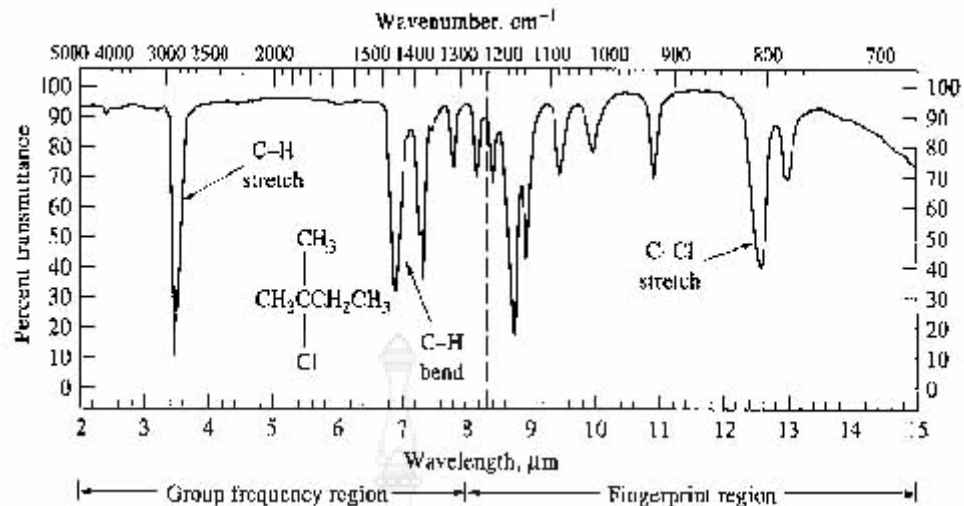
เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อยๆได้ แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR Spectrometer เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด สู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือตัวแยกแสง ( Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีก ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า The Michelson Interferometer ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรด แบ่งเป็น ช่วงๆคือ ช่วง wave number  $4,000 - 12,800 \text{ ซม.}^{-1}$  (2.5 – 0.78 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรด ใกล้ (Near infrared region) ช่วง wave number  $200 - 4,000 \text{ ซม.}^{-1}$  (50-2.5 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วง wave number  $10 - 200 \text{ ซม.}^{-1}$  (1,000 – 50 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจ และใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น

คลื่นอินฟราเรดในช่วง wave number  $4,000 - 400 \text{ ซม.}^{-1}$  ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนซ์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า อินฟราเรด สเปกตรัม (Infrared Spectrum –IR spectrum) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม ( IR Spectrum )

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสารนั้นๆว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่นสารกลุ่มแอลกอฮอล์ จะพีดของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3,300-3,600  $\text{cm}^{-1}$  หมู่เอมีน มีพีดพันธะ N-H อยู่ที่ 3,500  $\text{cm}^{-1}$  สารเอสเทอร์ พีดของหมู่ C-O อยู่ที่ประมาณ 1,000-1,300  $\text{cm}^{-1}$  เป็นต้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน IR spectrum พีดในช่วง 1,350 – 4,000  $\text{cm}^{-1}$  จะ เป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (Group functional region) และในช่วงประมาณ 910 – 1,350  $\text{cm}^{-1}$  จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่าย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region) การใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาอันน้อยมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมีจึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณา เปรียบเทียบจากอินฟราเรด สเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่าง ที่วัดในตัวอย่างชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พีดต่อพีด ถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่นการวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างโพลีเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการเทียบ ค่า %Transmittance เช่น การหาปริมาณตัวยา, สารออกฤทธิ์ในยาเม็ด เป็นต้น



รูปที่ 2.11 เครื่อง FT-IR Spectrometer

### 2.7.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope: SEM) [22]

เทคนิคที่สามารถสร้างภาพสามมิติจากสัญญาณของอิเล็กตรอน ซึ่งมีหลักการดังนี้เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานสูง (primary electron) กระแทกหรือทำปฏิกิริยากับวัตถุอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เหล่านี้ (เวคิน นพนิตย์. 2527 : 85-89) อิเล็กตรอนของวัตถุนั้นถูกกระแทกให้หลุดออกจากกันเป็น secondary electron หากวัตถุนั้นมีองค์ประกอบต่างกันจะมีปริมาณ secondary electron ที่แตกต่างกันด้วยปริมาณที่แตกต่างกันนี้สามารถตรวจวัดและแปลผลเป็นภาพเรียกว่า secondary electron image(SEI)อิเล็กตรอนกระแทกลงบนวัตถุแล้วเกิดการกระเจิงกลับเป็น backscattered มีปริมาณ 85% ของ primary electron ทั้งหมดหากวัตถุนั้นมีองค์ประกอบต่างกันก็จะมีปริมาณ backscattered ที่แตกต่างกันด้วยปริมาณที่แตกต่างกันนี้สามารถตรวจวัดและแปลผลเป็นภาพได้ เรียกว่า backscattered image (BEI) ซึ่งสามารถบอกความแตกต่างของตำแหน่งธาตุที่พบในวัตถุนั้นได้ วัตถุที่มีความบางมาก (ไม่เกิน 200 nm) อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านวัตถุนั้นไปได้อะตอมเมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไป อิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่ในวงชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่าจะปลดปล่อยพลังงานบางส่วนออกมาแล้วเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไป เพื่อรักษาความเสถียรของอะตอม พลังงานที่ปลดปล่อยออกมานี้เรียกว่า X-rays ซึ่งมีระดับพลังงานเฉพาะในธาตุแต่ละชนิด ระดับพลังงานที่แตกต่างกันนี้สามารถตรวจวัดเพื่อแปลผลเป็นชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุนั้นได้ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงมักมีเครื่องแปลผลระดับพลังงาน X-rays เป็นชนิดและปริมาณของธาตุ ที่เรียกว่าเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Energy dispersive X-rays spectrometry, EDX หรือ EDS) อิเล็กตรอนบางส่วนอาจถูกวัตถุดูดกลืนและ



เปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่นได้เช่น แสง ความร้อน เป็นต้น องค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด column unit ประกอบด้วย

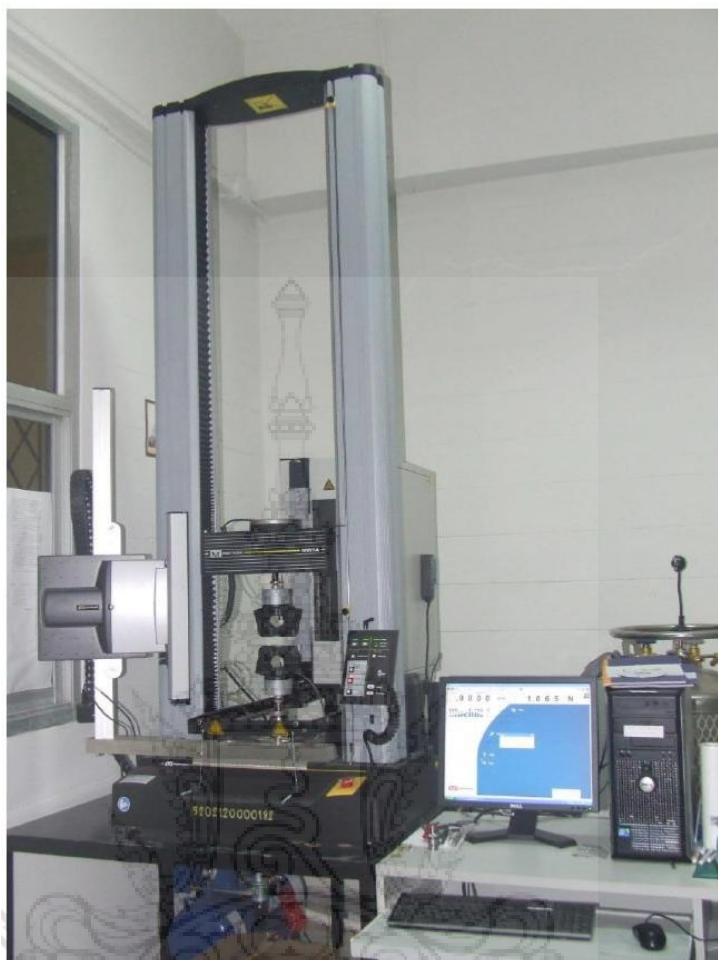
1. filament gun เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สร้าง electron beam ด้วย
  - การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าไปยังโลหะ tungsten (filament) จนแรงให้เกิดการปลดปล่อย electron
  - beam วิ่งลงมายังขั้วบวก (anode) ที่อยู่ด้านล่างให้ผ่านสุญญากาศใน column จนถึงตัวอย่างด้วยการ
  - ควบคุมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจาก electromagnetic lens



รูปที่ 2.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 2.7.4 เครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์ (Universal testing machine: UTM)

เครื่อง Universal testing machine เป็นเครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์ สามารถให้แรงกระทำต่อชิ้นงาน ทั้งแรงดึง แรงอัด แรงดัด ซึ่งแรงที่ให้นั้นจะเป็นแรงทดสอบที่คงที่ในการกระทำต่อชิ้นงาน (static load test) ในการทดสอบนั้น เมื่อนำชิ้นงานมาติดตั้งกับหัวจับชิ้นงาน (บางอันจะเป็นหัวกด) load cell จะออกแรงกระทำต่อชิ้นงาน ซึ่งเซนเซอร์ใน load cell จะแปลงค่าแรงดึง แรงอัด แรงดัด เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าในลำดับต่อไป สำหรับการทดสอบความแข็งแรงในการทดสอบแรงดึง จะเป็นความสามารถของเส้นใยที่จะทนแรงที่มากระทำ โดยการหาแรงดึงทำได้โดยยึดปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน แล้วดึงผ้าให้ขาดออกจากกัน แรง ณ จุดขาดเรียกว่า “Breaking Strength”



รูป 2.13 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้วิจัยและพัฒนา วัสดุทดแทนกระดูกเพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคตโดยการปลูกผลึกสารประกอบอะพาไทต์การเตรียมวัสดุ สำหรับขั้นตอนและวิธีการทดลองได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาการเตรียมวัสดุดิบของแคลเซียมจากเปลือกไข่ ส่วนที่ 2 การเตรียมเส้นใยไหมไฟโบรอิน ส่วนที่ 3 การทดลองในการปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน และส่วนสุดท้ายส่วนที่ 4 จะนำเสนอรูปแบบเส้นใยไหมไฟโบรอินและการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การเตรียมสารตั้งต้นของแคลเซียมจากเปลือกไข่

การเตรียมเปลือกไข่ และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเปลือกไข่ เพื่อเตรียมสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) สำหรับเป็นสารตั้งต้นของแคลเซียมในการปลูกผลึกอะพาไทต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดเปลือกไข่ไก่โดยการล้างน้ำและทำการลอกเยื่อที่ติดกับเปลือกไข่ไก่ออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดค้างออก
2. นำเปลือกไข่ไก่ไปตากให้แห้งและบดให้ละเอียด
3. นำผงเปลือกไข่ไก่ ไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100, 200, 300 จนกระทั่งถึง 1300 องศาเซลเซียส อุณหภูมิละ 4 ชั่วโมง ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. ปล่อยให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วเก็บไว้ในโถกันความชื้น
5. นำตัวอย่างผงเปลือกไข่ไก่ที่เผา ณ อุณหภูมิต่างๆ มาศึกษาโครงสร้างของผลึก ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

รูป 3.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ก่อน และเผาการแคลไซน์ในบรรยากาศปกติช่วงอุณหภูมิ 900 ถึง 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยพบว่า โครงสร้างผลึกของเปลือกไข่ไก่เป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) โดยมีโครงสร้างเฟสเป็น แคลไซต์ โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงของแพม Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS) หมายเลข 12-1690 เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 200 – 600 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่า ทั้งเปลือกไข่ไก่มีเฟสใหม่เกิดขึ้น โดยที่เฟสแคลไซต์เริ่มลดลง และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความสูงของพีคของเฟสใหม่สูงขึ้น ในขณะที่ความสูงของพีคของเฟสแคลไซต์นั้นลดลง และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศา

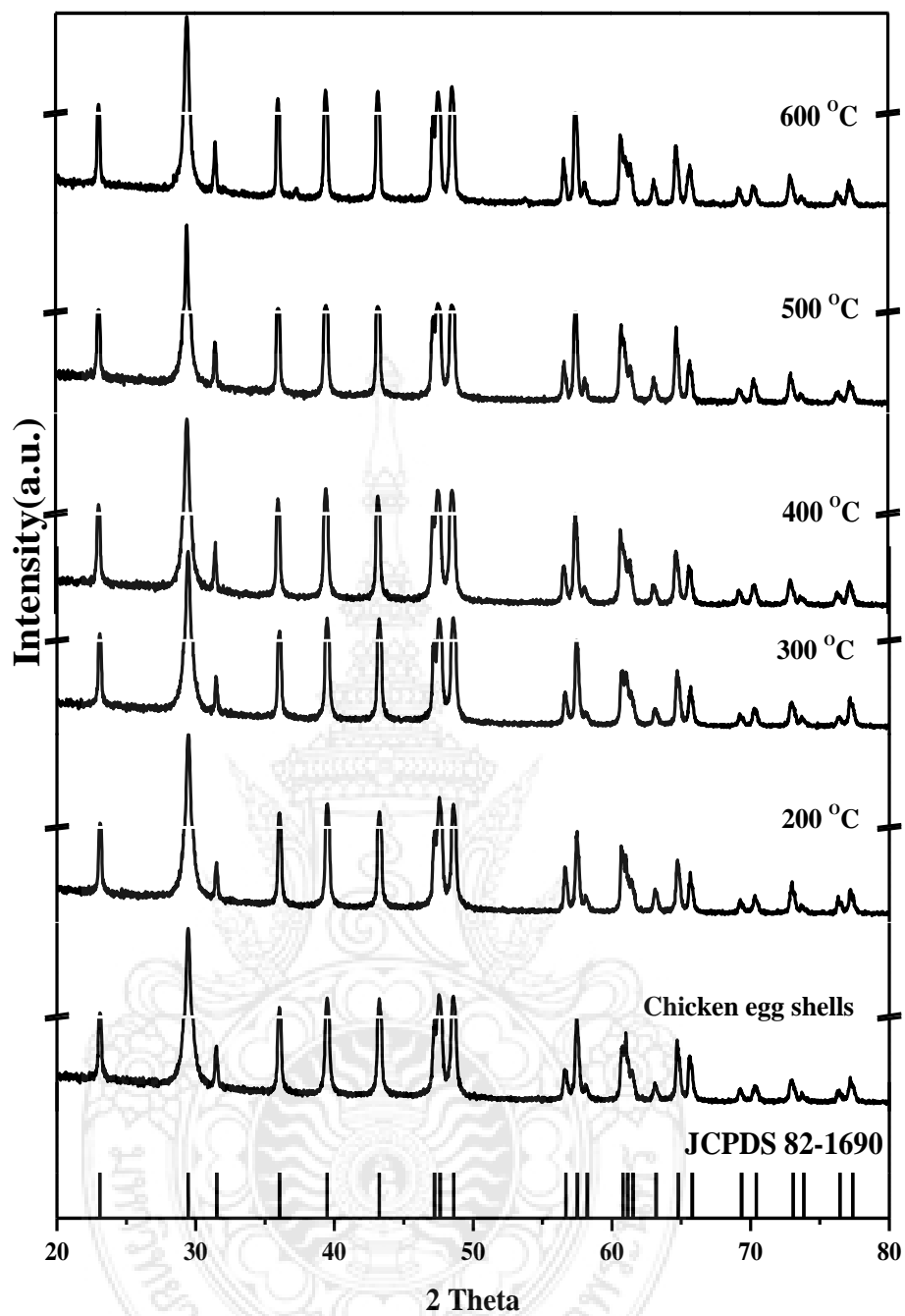
เซลเซียส เฟสแคลไซต์หายไปมีแต่เฟสใหม่เพียงอย่างเดียว โดยเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นนี้ เมื่อเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงของแฟ้ม JCPDS พบว่าตรงกับหมายเลข 48-1467 เป็นเฟสแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1300 องศาเซลเซียส พบว่า เฟสของแคลเซียมออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และไม่ตรวจพบองค์ประกอบของสารอื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 และปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงเป็นไปดังสมการที่ 1 [23]:



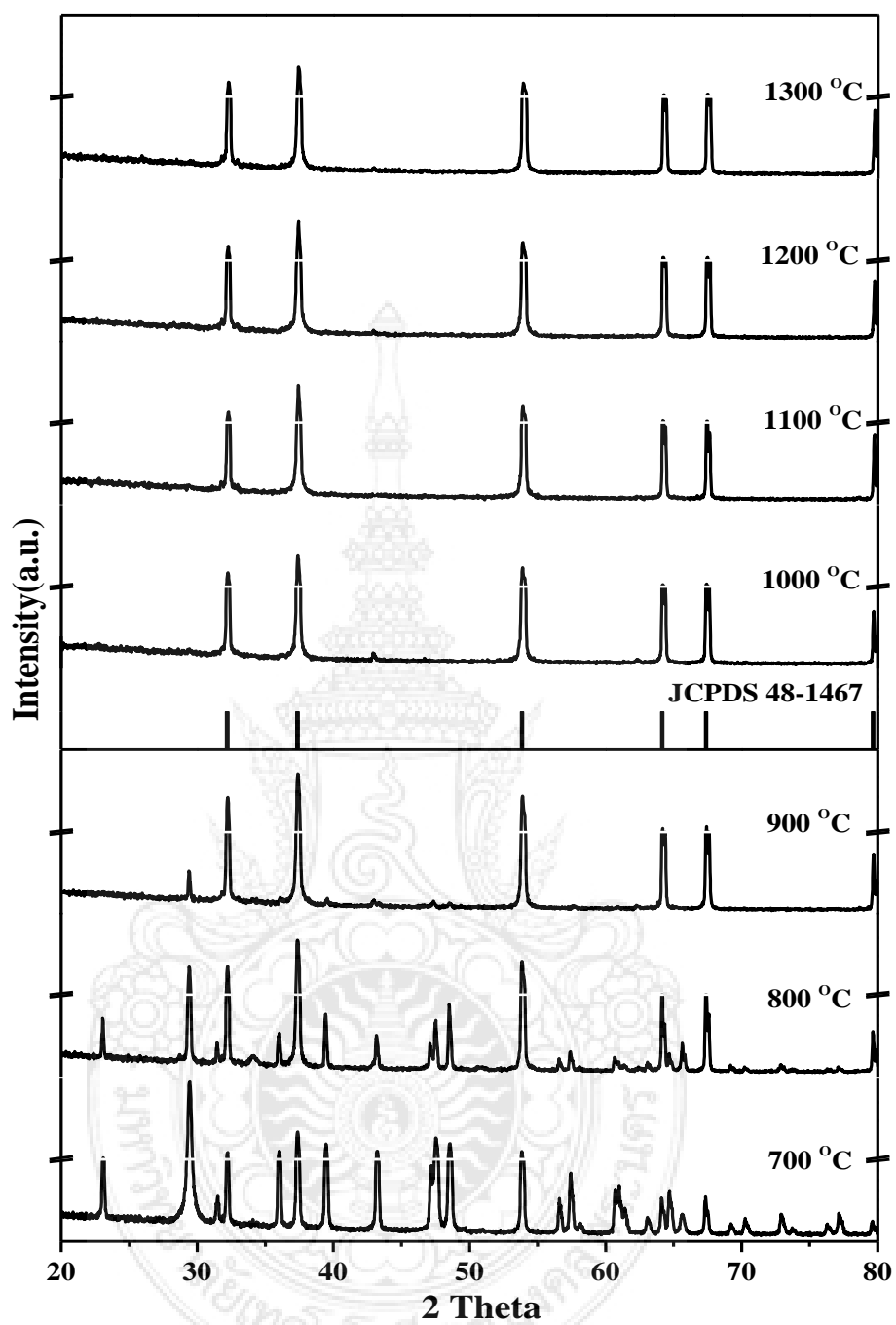
เพื่อความแน่นอนในการเปลี่ยนเฟสของผงเปลือกไข่ เป็นแคลเซียมออกไซด์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เราจะแคลไซน์ผงเปลือกไข่ที่อุณหภูมิที่ 1300 องศาเซลเซียส



รูป 3.1 การเตรียมผงเปลือกไข่ไก่



รูป 3.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ก่อน และหลังการแคลไซน์  
 ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิในช่วง 200-600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

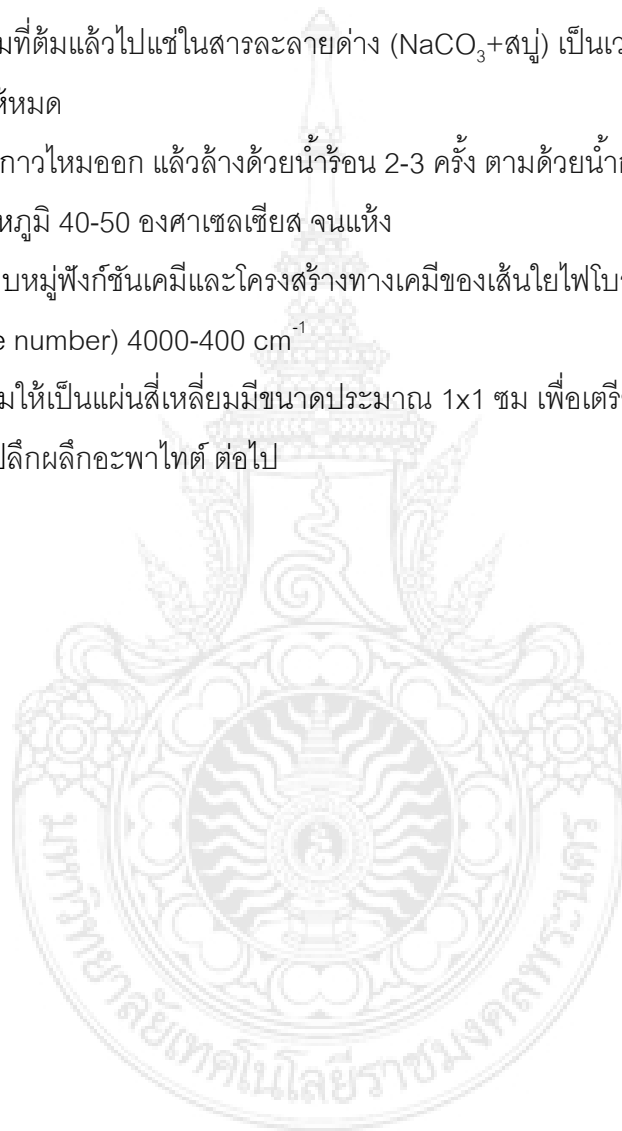


รูป 3.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ก่อน และหลังการแคลไซน์ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิในช่วง 700-1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

### 3.2 การเตรียมเส้นใยไหมไฟโบรอิน

การเตรียมเส้นใยไฟโบรอินเพื่อใช้ในการปลูกผลึกอะพาไทต์ แสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำรังไหมมาต้มในน้ำเดือด 1 ชั่วโมง เพื่อสกัดกาวไหม (โปรตีนซีรีซิน)
2. เตรียมสบู่ 0.225 กรัม,  $\text{NaCO}_3$  0.159 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมสารละลายต่าง
3. นำรังไหมที่ต้มแล้วไปแช่ในสารละลายต่าง ( $\text{NaCO}_3$ +สบู่) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อสกัดกาวไหมที่ตกค้างออกให้หมด
4. กรองน้ำกาวไหมออก แล้วล้างด้วยน้ำร้อน 2-3 ครั้ง ตามด้วยน้ำกลั่น 4-5 ครั้ง จนมีสภาพเป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส จนแห้ง
5. ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมีและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไฟโบรอินโดยใช้ ATR-FT-IR ในช่วงเลขคลื่น (wave number)  $4000-400\text{ cm}^{-1}$
6. ตัดรังไหมให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีขนาดประมาณ  $1 \times 1$  ซม เพื่อเตรียมเส้นใยไฟโบรอินในการศึกษาการปลูกผลึกอะพาไทต์ ต่อไป





นำรังไหมมาล้างทำความสะอาดเพื่อ  
ชะล้างสิ่งสกปรกออก



ต้มรังไหมในน้ำเดือด 1 ชั่วโมง  
เพื่อสกัดกาวไหมออก



ล้างรังไหมให้สะอาด



แช่รังไหมในสารละลายต่างๆที่  
เตรียมไว้พร้อมกวน



ล้างรังไหมจน pH เป็นกลาง  
และนำไปอบให้แห้ง

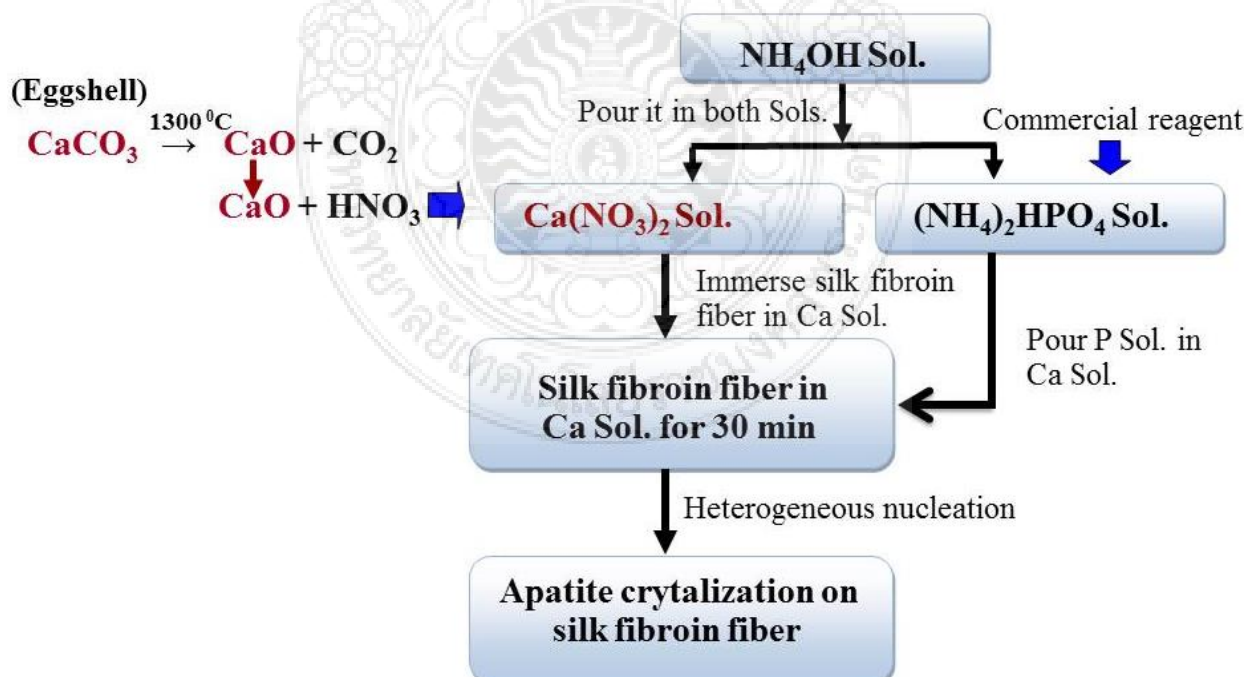
รูป 3.4 การเตรียมเส้นใยไฟโบรอินเพื่อใช้ในการปลูกผลึกอะพาไทต์



### 3.3 การปฏิกิริยาของอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน

การปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไฟโบรอิน มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมสารละลายแคลเซียมไนเตรท ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) โดยการละลายผงแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) 16.5 กรัม ในสารละลายกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ )  $113 \text{ cm}^3$  และเติมน้ำกลั่นลงไป ในสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  เพื่อปรับระดับความเข้มข้นของสารละลาย โดยความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ระดับ ถูกกำหนดสัญลักษณ์ดังตารางที่ 3.1
2. เตรียมสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) โดยการละลายผง  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  ในน้ำกลั่นปริมาตร  $500 \text{ cm}^3$
3. ปรับค่า pH ในสารละลายแคลเซียมและฟอสเฟตด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เป็น 7 8 และ 9 ตามลำดับ โดยถูกกำหนดสัญลักษณ์ดังตารางที่ 3.1
4. นำเส้นใยไหมไฟโบรอินไปแช่ในสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  เป็นเวลา 30 นาที
5. ปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินโดย นำสารละลาย  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  เทลงไปในสารละลาย  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ที่มีเส้นใยไหมไฟโบรอินแช่อยู่ และวางไว้เป็นเวลา 1 นาที
6. นำเส้นใยไหมไฟโบรอินล้างทำความสะอาดจนไม่มีตะกอนของสารติดอยู่บนเส้นใย
7. นำเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ผ่านกระบวนการปลูกผลึกไปวัด SEM และ EDX



รูป 3.5 ขั้นตอนการปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไฟโบรอิน

ตาราง 3.1 สัญลักษณ์ของชิ้นงานตัวอย่าง

สัญลักษณ์ชิ้นงาน ตัวอย่าง	ระดับความเข้มข้นของ สารละลาย	ค่า pH เริ่มต้น ของสารละลาย
CP <sub>17</sub>		7
CP <sub>18</sub>	1	8
CP <sub>19</sub>		9
CP <sub>27</sub>		7
CP <sub>28</sub>	2	8
CP <sub>29</sub>		9
CP <sub>37</sub>		7
CP <sub>38</sub>	3	8
CP <sub>39</sub>		9

### 3.4 รูปแบบเส้นใยไหมไฟโบรอินและการทดสอบความต้านทานแรงดึง

นำเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ผ่านกระบวนการสาวไหมมาทำการถักทอเป็นผืน โดยมีรูปแบบการจัดเรียงเส้นใย 2 รูปแบบ โดยรูปแบบการถักทอจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ ลายขัด (Plain weave) และ ลายทแยง (Twill weave) ซึ่งเป็นการถักทอที่มีโครงสร้างหรือลายไม้ซับซ้อน โดยเส้นใยไหมที่นำมาถักทอเป็นผืนจะประกอบด้วยเส้นใยไหม 2 แนว คือ เส้นแนวตามยาวหรือเรียกว่า เส้นยืน และเส้นแนวขนานหรือเรียกว่า เส้นพุ่ง ซึ่งจะขัดกันเป็นมุม 90 องศา และวางตัวขนานและตั้งฉากกัน

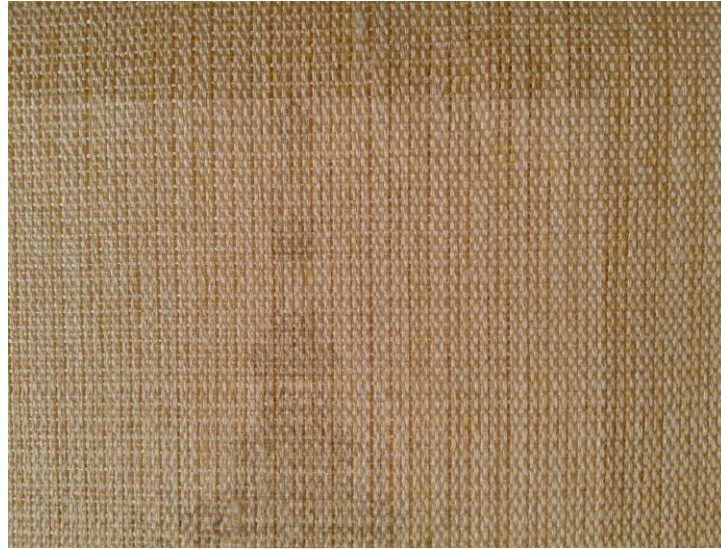
#### 3.4.1 รูปแบบการถักทอเส้นใยไหมลายขัด

ลายขัด เส้นไหมยืนจะข้ามเส้นไหมพุ่งหนึ่งเส้นและลอดเส้นไหมพุ่งหนึ่งเส้นสลับกันตลอดความยาวผ้าผืน เส้นไหมยืนสองเส้นที่ติดกันจะขัดกับเส้นไหมพุ่งตรงข้ามกัน ในทำนองเดียวกันกับเส้นไหมพุ่งที่ติดกัน ดังแสดงในรูป 3.6

#### 3.4.2 รูปแบบการถักทอเส้นใยไหมลายทแยง

ลายทแยงหรือบางครั้งเรียกว่าลายสองนั้นเป็นลายที่บอกลักษณะ โดยแนวทแยงของเส้นไหมยืนที่ข้ามเส้นไหมพุ่งพร้อมกับแนวทแยงของเส้นไหมพุ่งที่ข้ามเส้นไหมยืนซึ่งปรากฏอยู่ทั้งด้านหน้าและ

ด้านหลังผ้าฝ้าย ทิศทางแนวทแยงบนด้านหน้าผ้าฝ้ายจะตรงข้ามกับแนวทแยงด้านหลังผ้าฝ้าย ในหนึ่งลายซ้ำของลายทแยงจะมีจำนวนเส้นด้ายไหมยืนเท่ากับเส้นไหมพุ่ง ลายทแยงที่เล็กที่สุดอย่างน้อยต้องประกอบด้วยเส้นด้ายไหมยืน 3 เส้น และเส้นด้ายไหมพุ่ง 3 เส้น ทิศทางของแนวทแยงขึ้นไปทางขวาหรือทางซ้ายดังแสดงดังรูป 3.7



รูปที่ 3.6 รูปการถักทอเส้นใยไหมเป็นผ้าฝ้ายแบบลายขัด



รูปที่ 3.7 รูปการถักทอเส้นใยไหมเป็นผ้าฝ้ายแบบลายทแยง

สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่ามอดุลัสของยังก์ (Young's modulus) และค่าความทนของแรงดึง (tensile strength) จะทำการเตรียมชิ้นงานทั้ง 2 ลวดลายให้มีขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร หนา 0.35 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine (Lloyds LR-5K) Load cell 5 kN ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D638-10 และ อัตราเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที

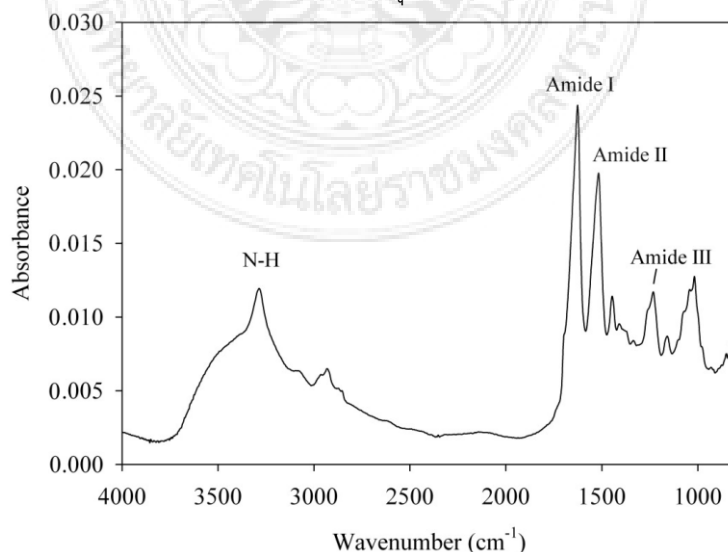
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ผลการศึกษาการปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน ประกอบด้วย ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไหมไฟโบรอิน ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาและอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน อันเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารตั้งต้น และ pH ส่วนสุดท้ายจะเป็นผลการตรวจสอบความแข็งแรงของเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอเป็นผ้าฝืนในรูปแบบขัดและทแยง

#### 4.1 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยไหมไฟโบรอิน

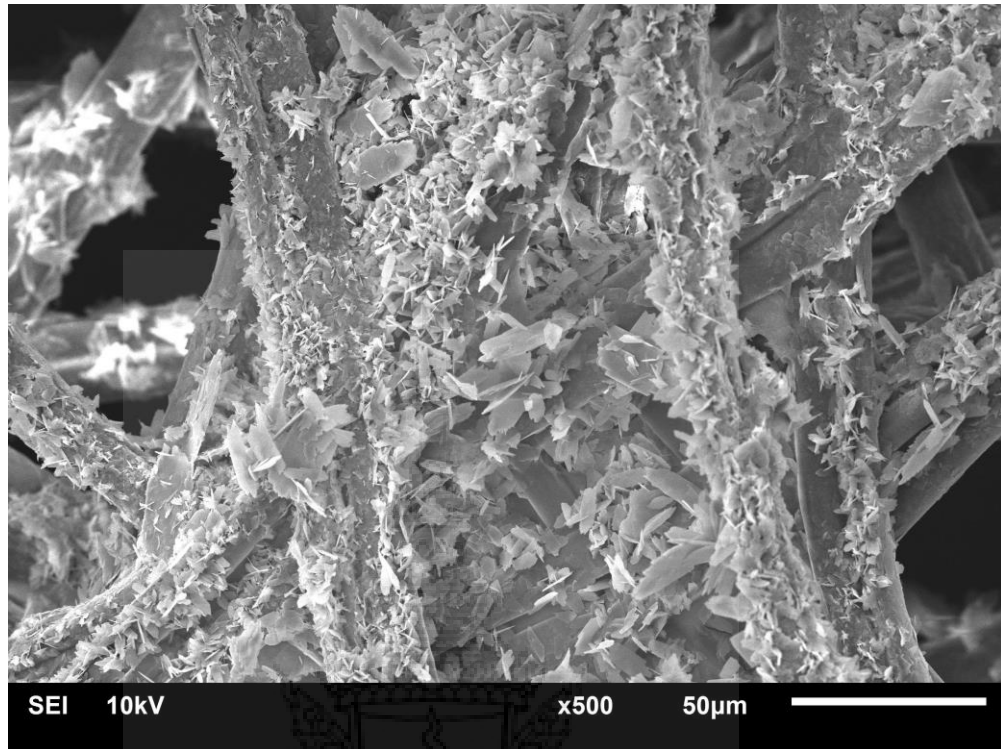
จาก ATR-FTIR (Fourier transform Infrared) spectrum ของเส้นใยไหมไฟโบรอินดังแสดงในรูปที่ 4.1 แสดงการสั่นของ หมู่ N-H, amide I, amide II และ amide III อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 3215, 1650, 1530 และ 1238  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของ amide I, amide II และ amide III ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างของเส้นไหมประกอบด้วยเฟสผลึก (crystalline phase) และเฟสอสัณฐาน (amorphous phase) พีคที่ตำแหน่ง 1650  $\text{cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบ  $\alpha$ -helix ในบริเวณที่เป็นเฟสผลึก พีคที่ตำแหน่ง 1530  $\text{cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของไฟโบรอินที่มีโครงสร้างแบบ  $\beta$ -sheet ในบริเวณที่เป็นเฟสอสัณฐาน สำหรับพีคที่ตำแหน่ง 1238  $\text{cm}^{-1}$  เป็นผลมาจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของไฟโบรอินทั้งแบบ  $\alpha$ -helix และ  $\beta$ -sheet การที่ไฟโบรอินของเส้นไหม มีส่วนของ  $\beta$ -sheet อยู่เป็นจำนวนมากนั้น จะส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงของเส้นไหมที่เพิ่มขึ้น อัน เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบมากขึ้นในเฟสผลึก [24]



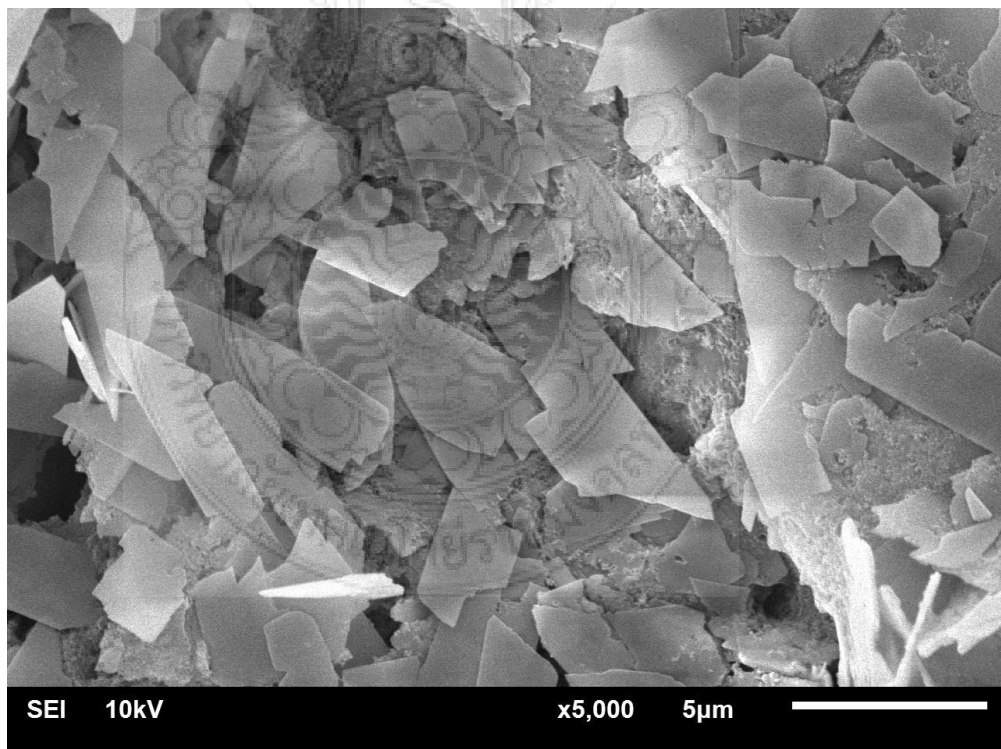
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเส้นใยไหมไฟโบรอิน

#### 4.2 ผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน

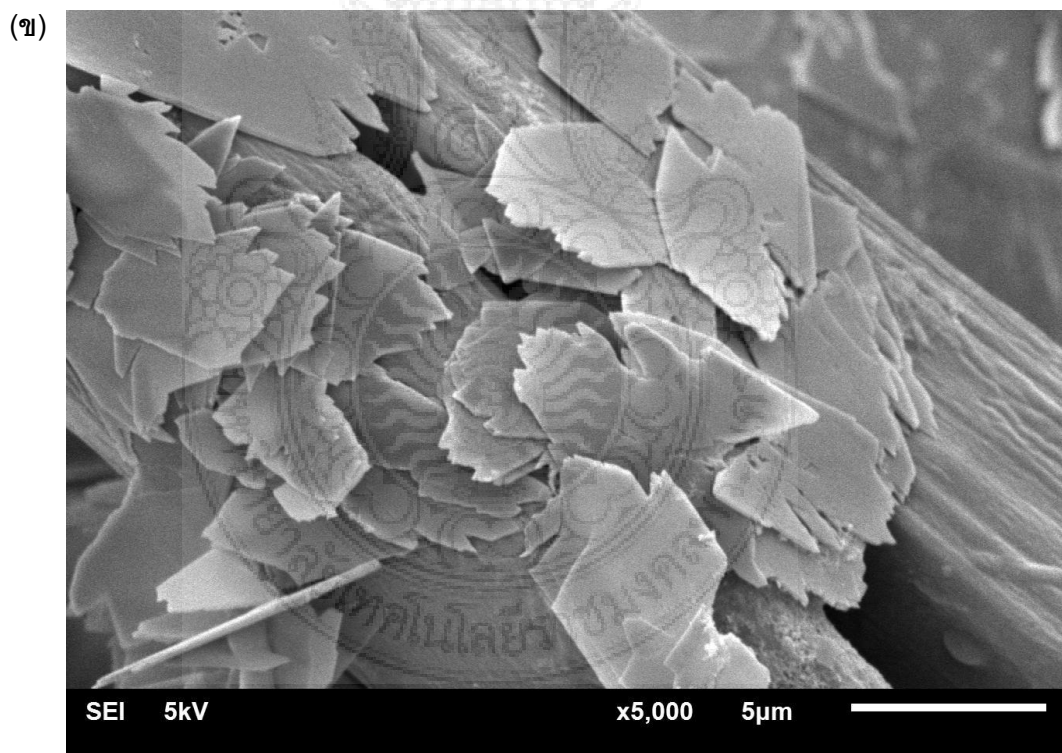
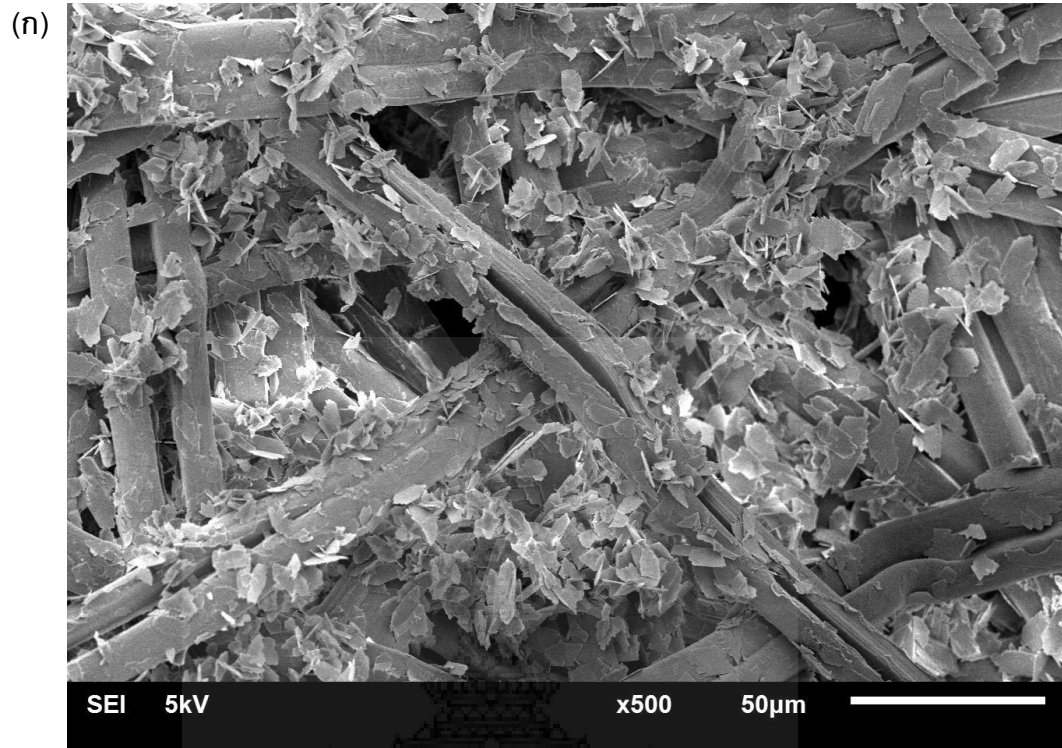
(ก)



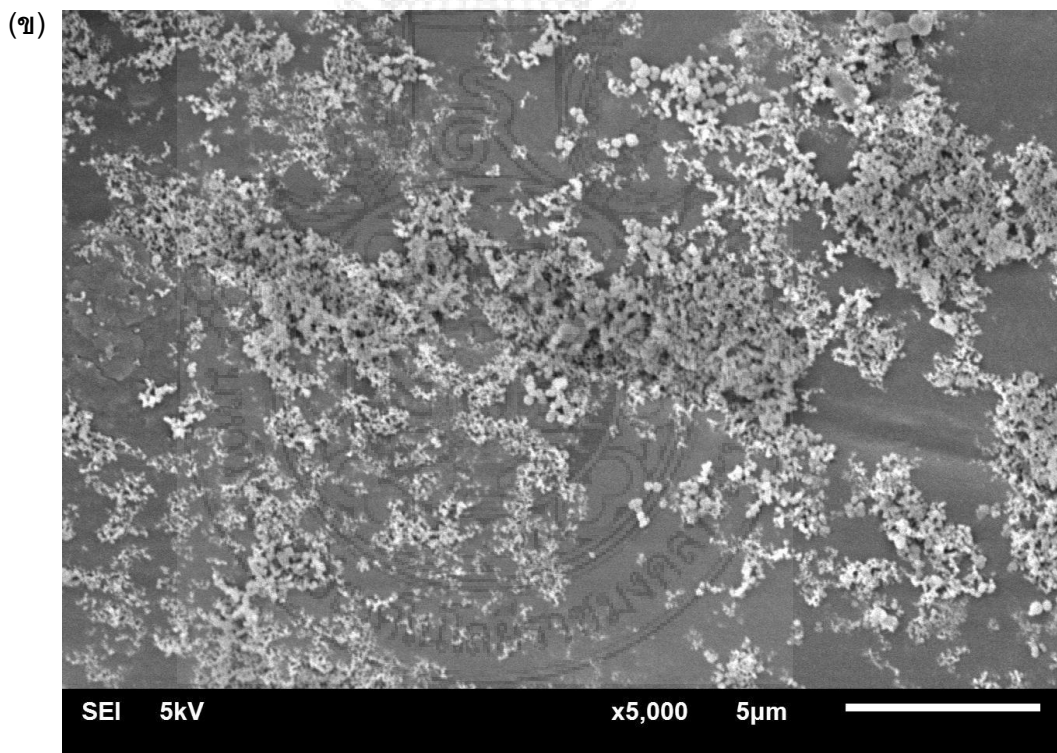
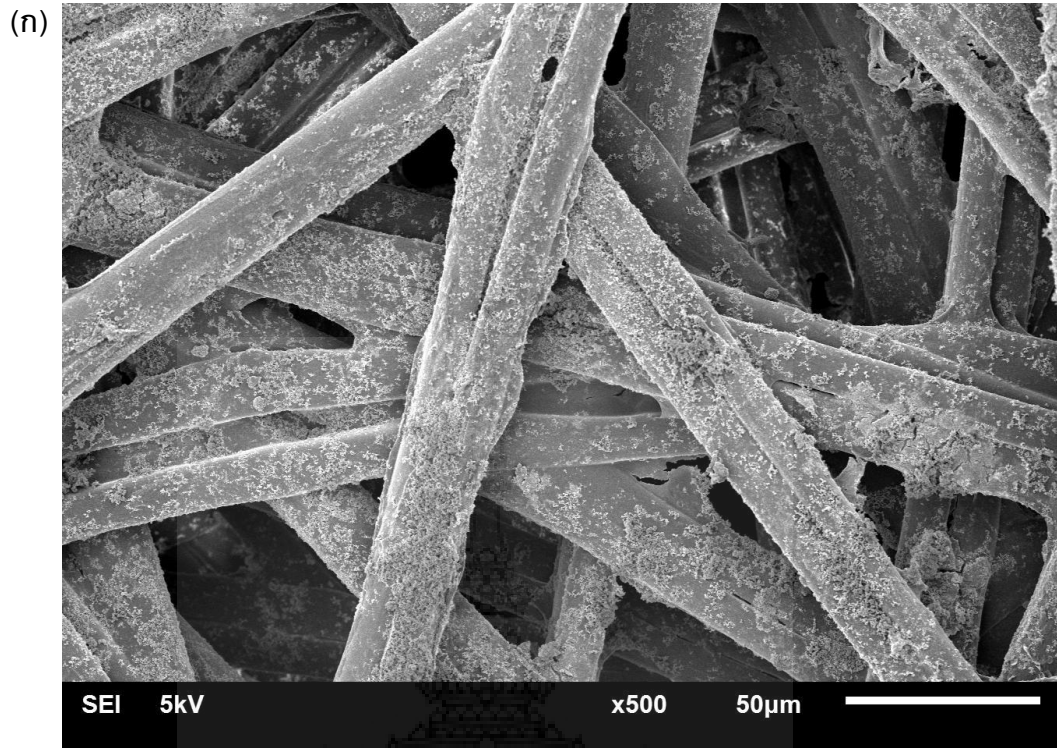
(ข)



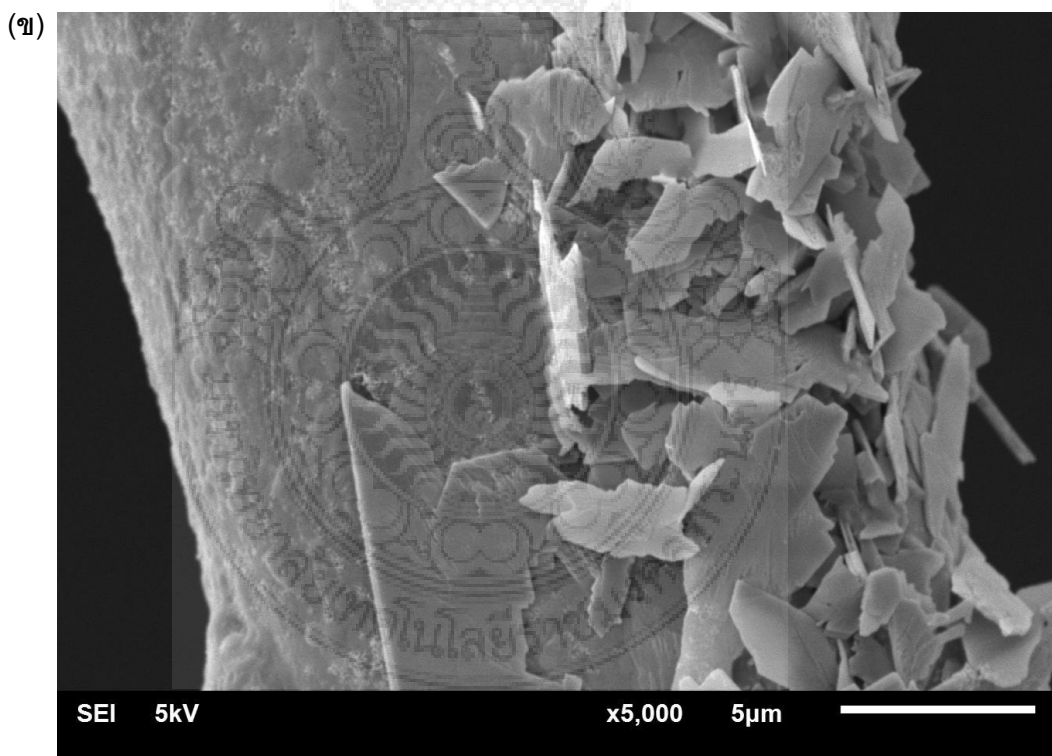
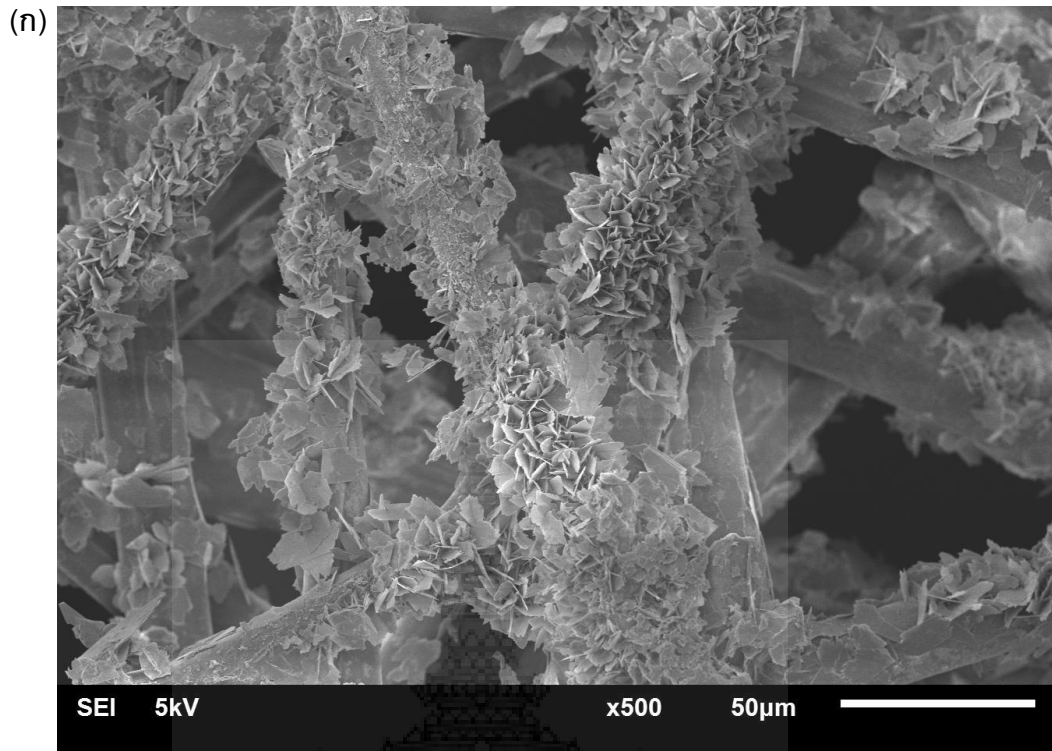
รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>17</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า



รูปที่ 4.3 พื้นฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>18</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า

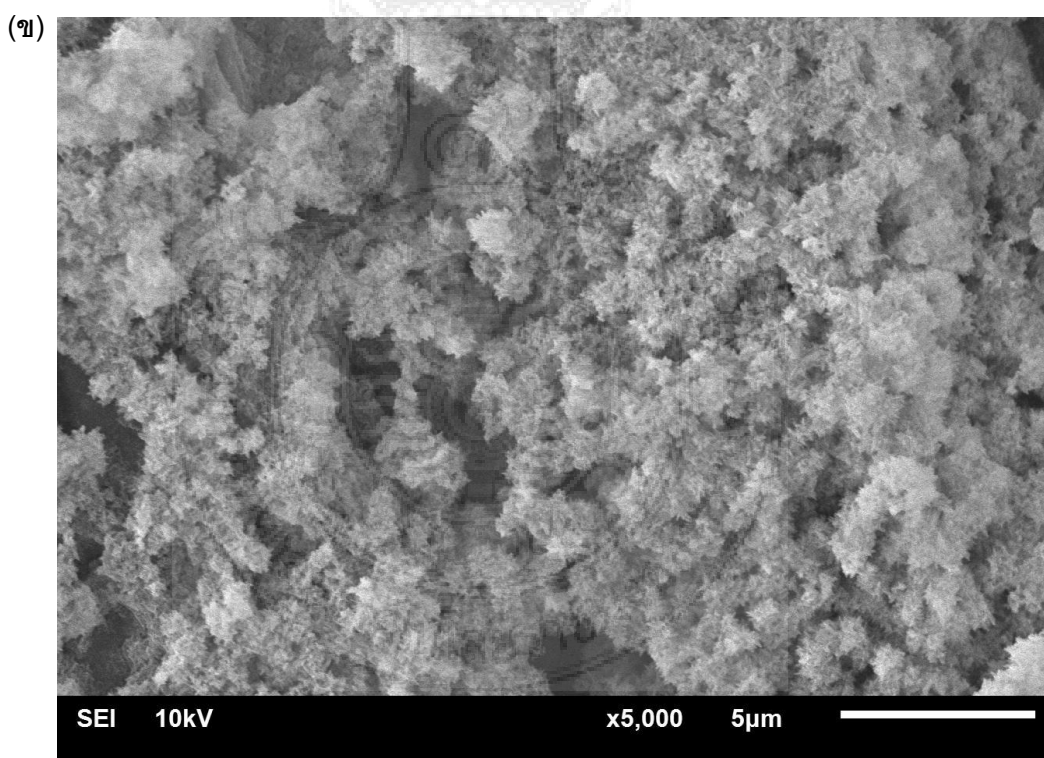
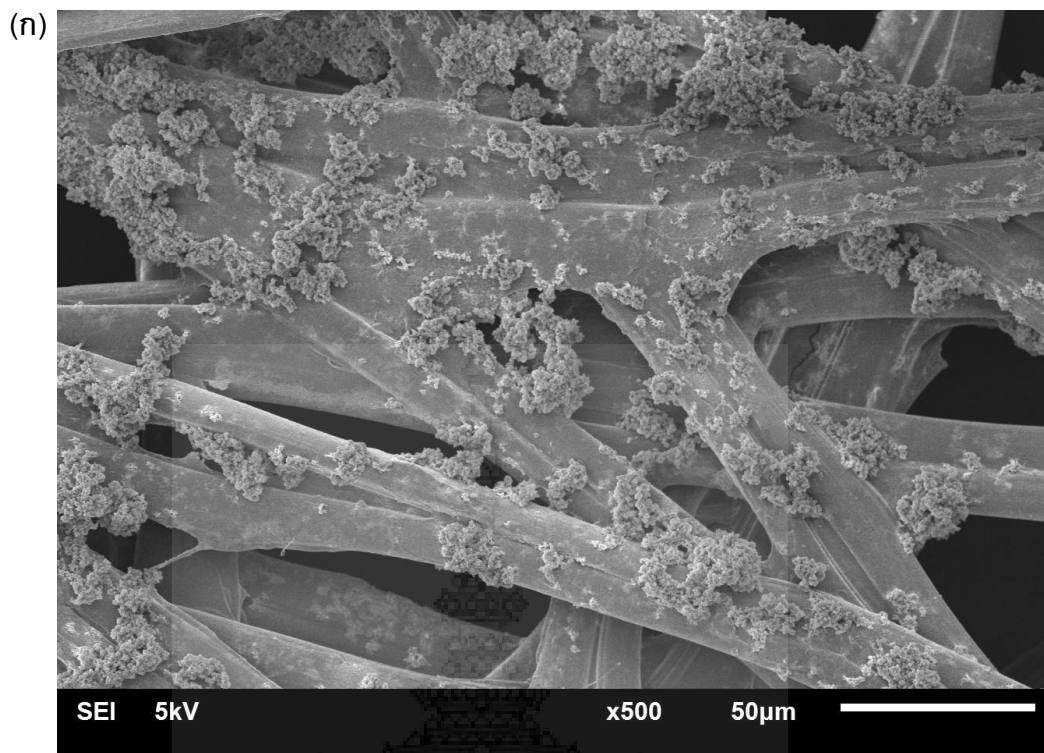


รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>19</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า

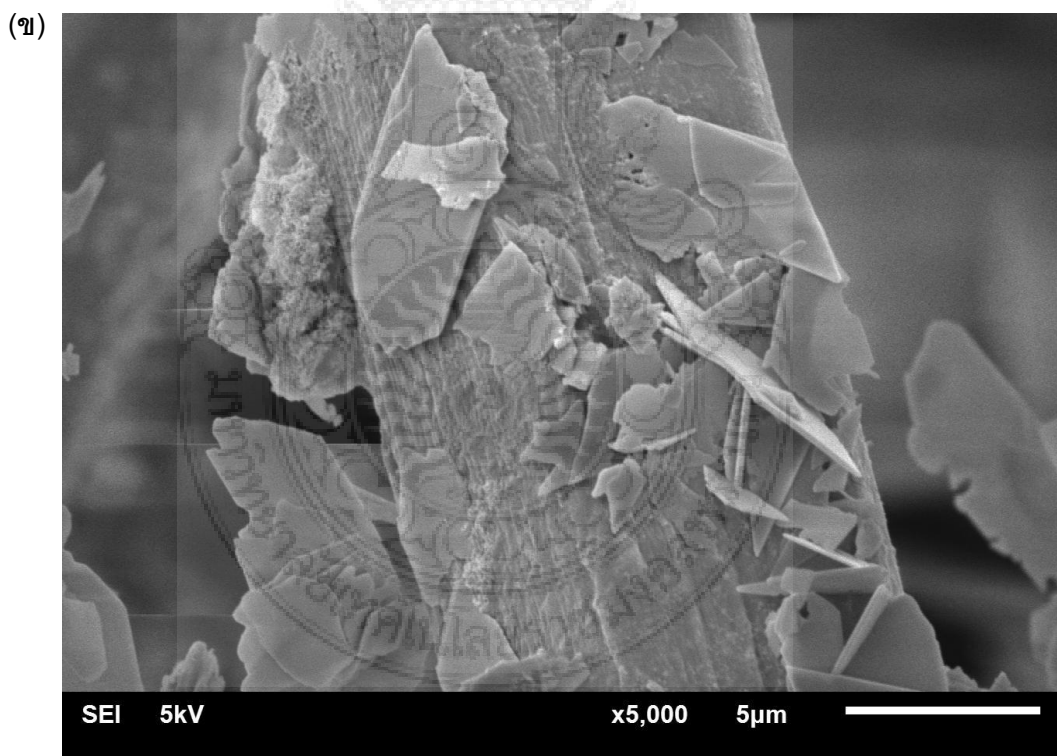
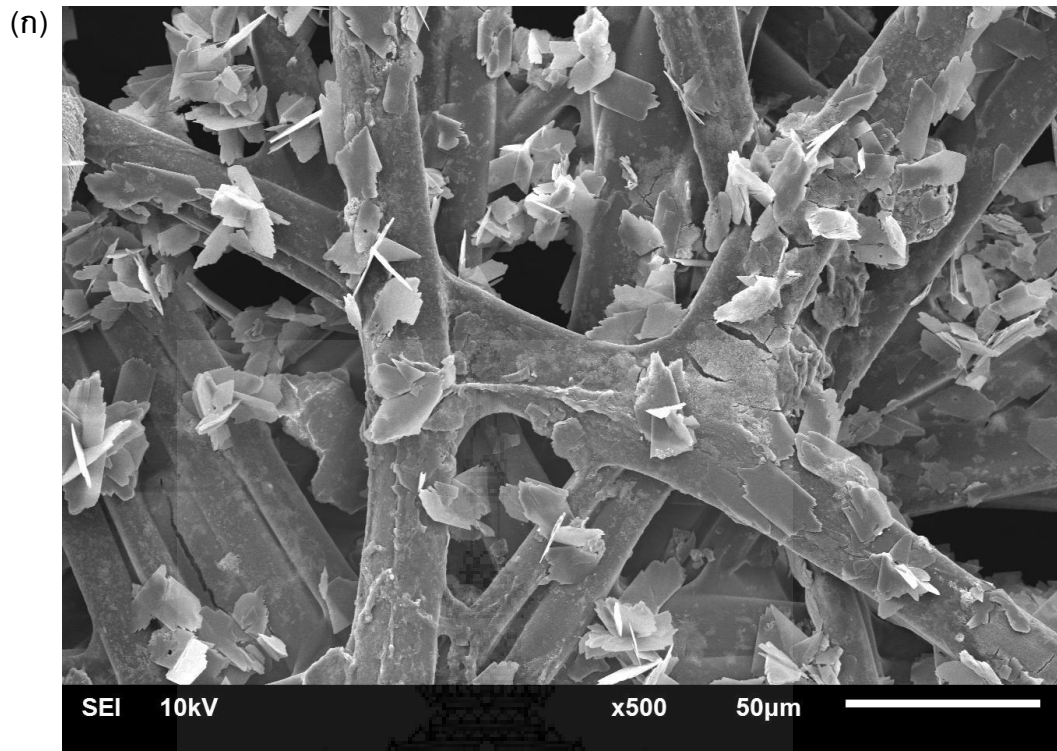


รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>27</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า

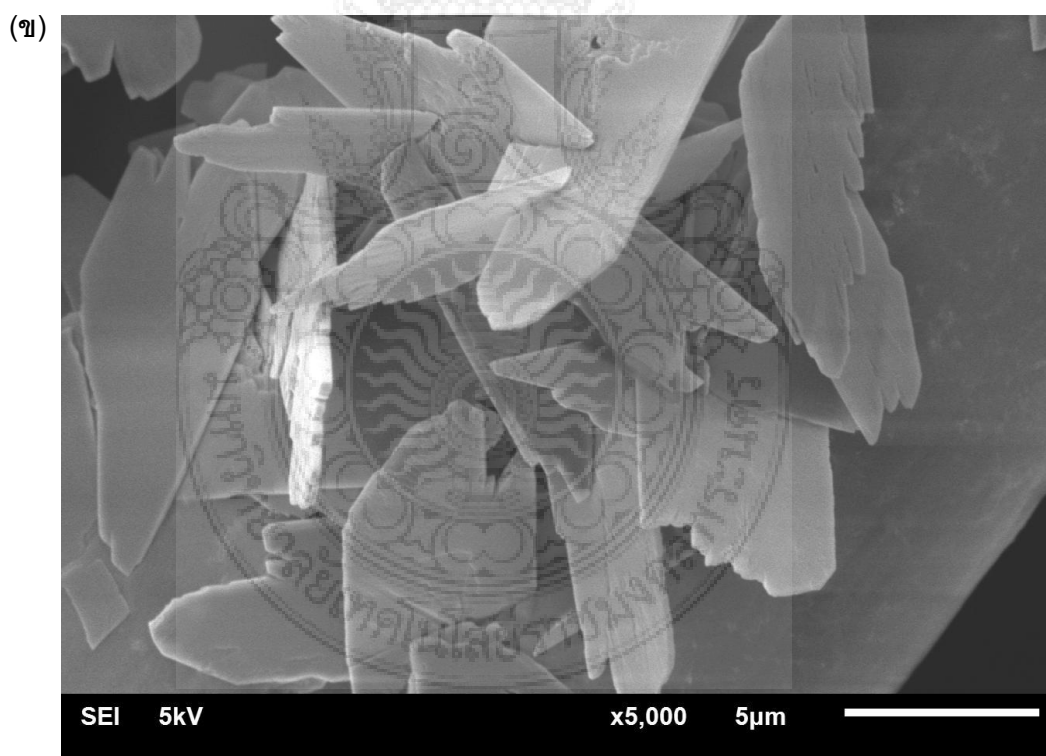
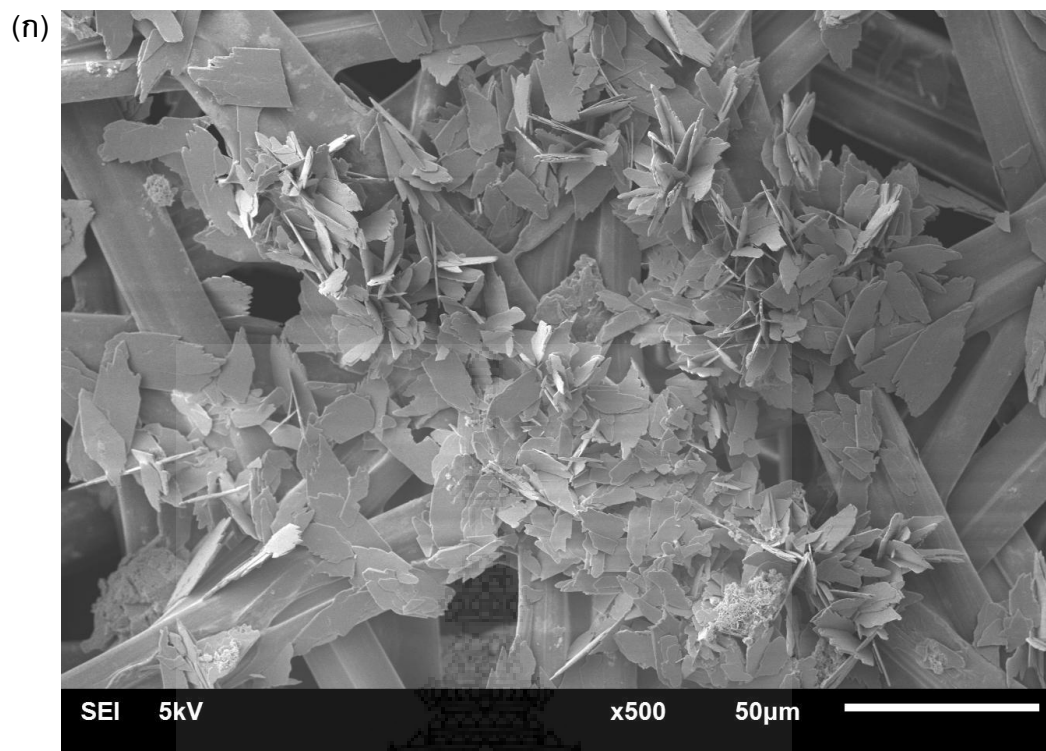




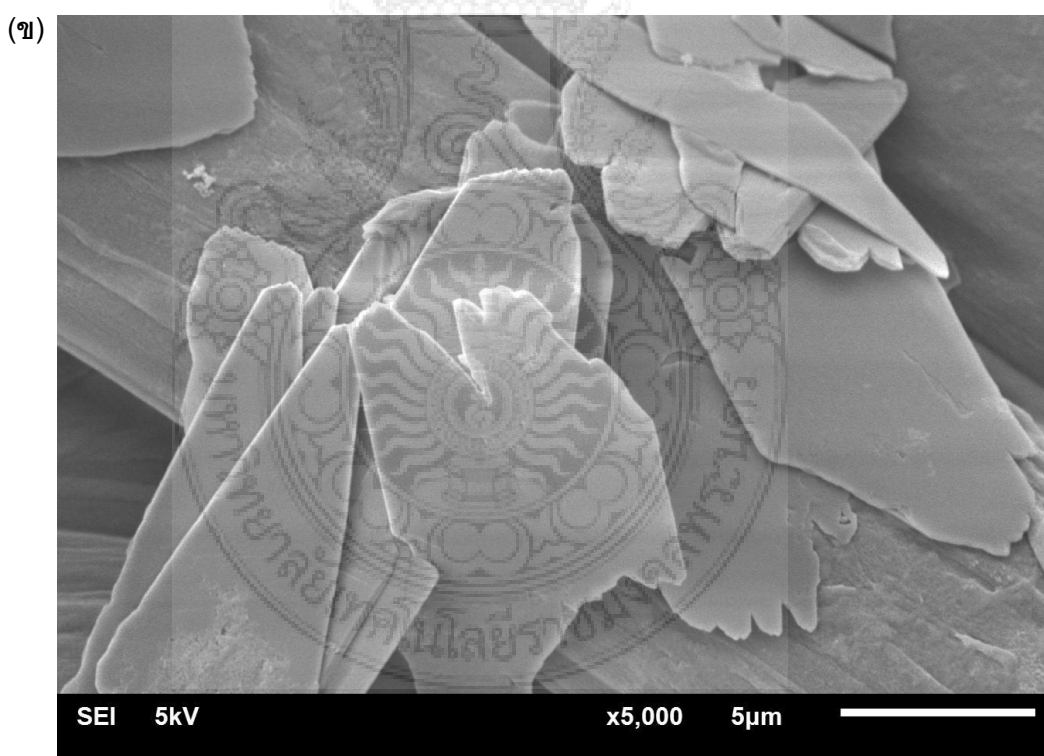
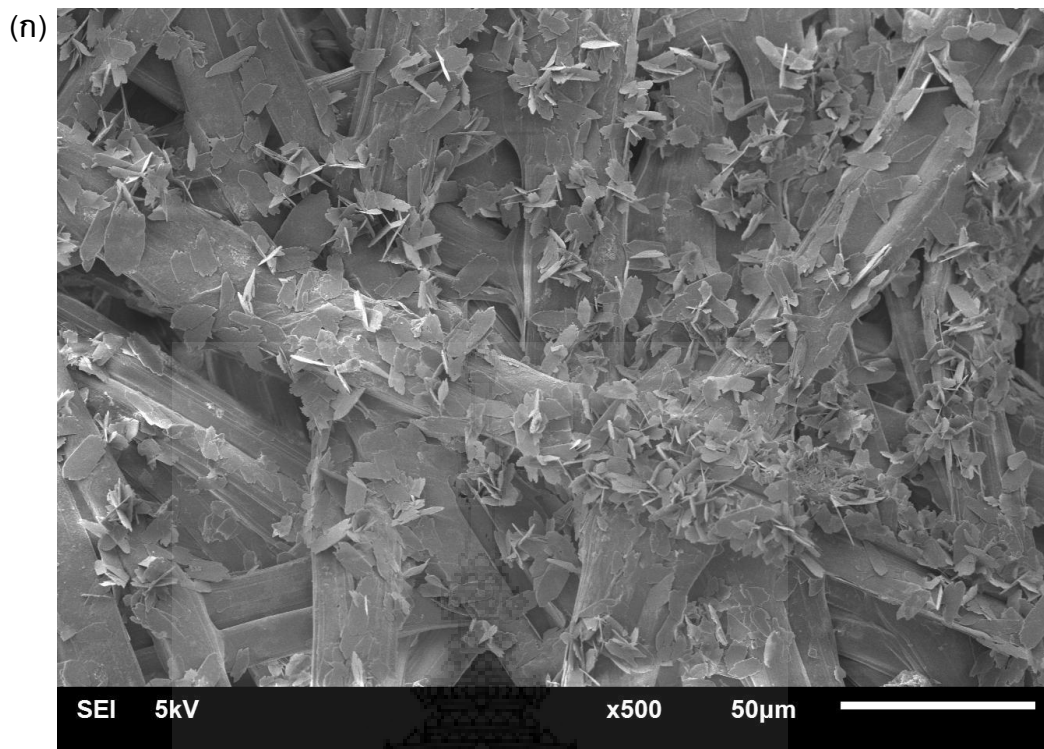
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>28</sub>  
ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า



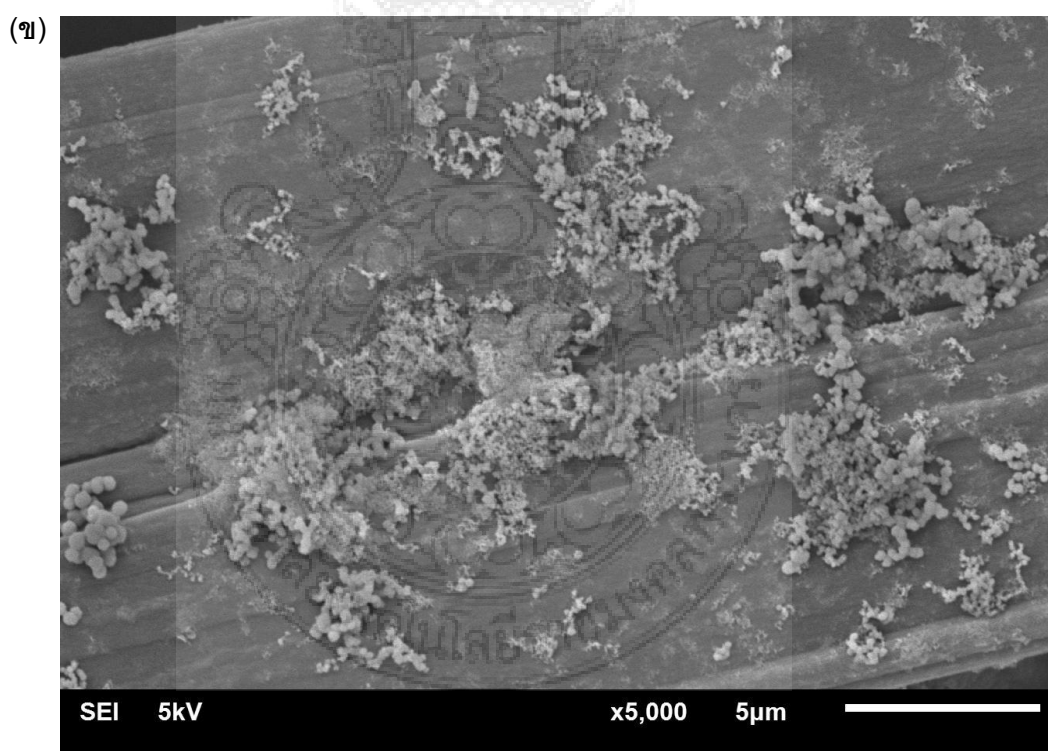
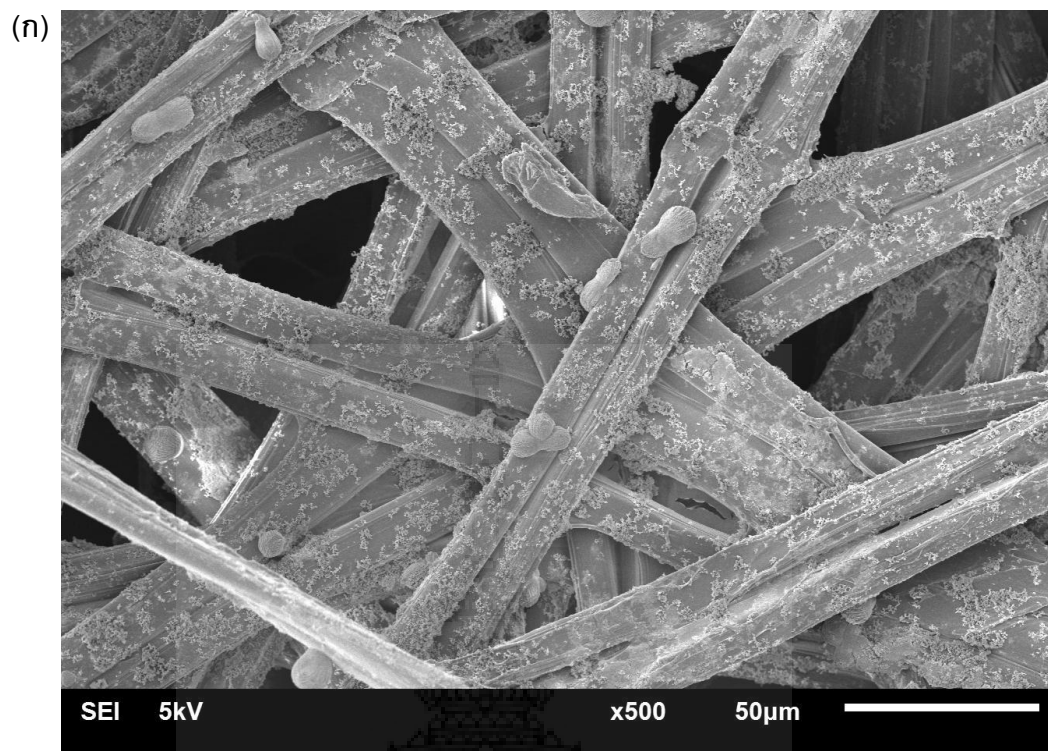
รูปที่ 4.7 พื้นฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>29</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>37</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า



รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>38</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า



รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอินตัวอย่าง CP<sub>39</sub> ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า และ (ข) 5,000 เท่า

ตารางที่ 4.1 สรุปรูปร่างสัณฐานวิทยาของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน

ชิ้นงาน	รูปร่าง
CP <sub>17</sub>	แผ่น
CP <sub>18</sub>	แผ่น
CP <sub>19</sub>	ทรงกลม เม็ดไขปลา
CP <sub>27</sub>	แผ่น
CP <sub>28</sub>	เข็ม ดอกไม้
CP <sub>29</sub>	แผ่น
CP <sub>37</sub>	แผ่น
CP <sub>38</sub>	แผ่น
CP <sub>39</sub>	ทรงกลม เม็ดไขปลา

กลไกการเกิดผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน เริ่มต้นจากการที่นำเส้นใยไหมไฟโบรอินไปแช่ใน เนื่องจากเส้นใยไหมไฟโบรอินเป็นเส้นใยโปรตีนที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) และคาร์บอนิล (carbonyl group) จึงทำหน้าที่เป็นตัวล่อ (seed) ที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดการก่อตัว (crystallization) ของผลึกอะพาไทต์บนพื้นผิวของเส้นใย โดยมีหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เป็นสะพานเชื่อมทางเคมี (chemical bridge) ดังนั้นจึงก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของแคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ที่แตกตัวจากสารละลายแคลเซียมไนเตรทบนพื้นผิวของเส้นใยไหมไฟโบรอิน และเมื่อเติมสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายแคลเซียมที่แช่เส้นใยไหมไฟโบรอินอยู่ ฟอสเฟตไอออน ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ที่แตกตัวจากสารละลายที่เติมลงไป ก็จะเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) กับ  $\text{Ca}^{2+}$  จับตัวกันจนเกิดเป็นนิวเคลียส (Nuclei) ที่มีพลังงานอิสระ (free energy) ในการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวเป็นของแข็ง (phase transformation) ซึ่งส่งผลมาจากผลต่างของพลังงานจากพื้นที่ผิว (surface contribution) และพลังงานจากปริมาตร (volume contribution) การเกิดนิวเคลียสแบบนี้เรียกว่า การเกิดนิวเคลียสแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous nucleation) เมื่อนิวเคลียสของอะพาไทต์มีพลังงานอิสระมากกว่าระดับพลังงานของกำแพงการเกิดนิวเคลียส (nucleation barrier) ก็จะเป็นผลึกอะพาไทต์ หรืออีกนัยหนึ่ง นิวเคลียสของอะพาไทต์จะต้องมีขนาดใหญ่กว่า critical size จึงจะเป็นผลึกอะพาไทต์ได้ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อสารละลายแคลเซียมและสารละลายฟอสเฟตนั้นเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated solution) สำหรับงานวิจัยนี้สภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) ของสารละลายจะควบคุมได้

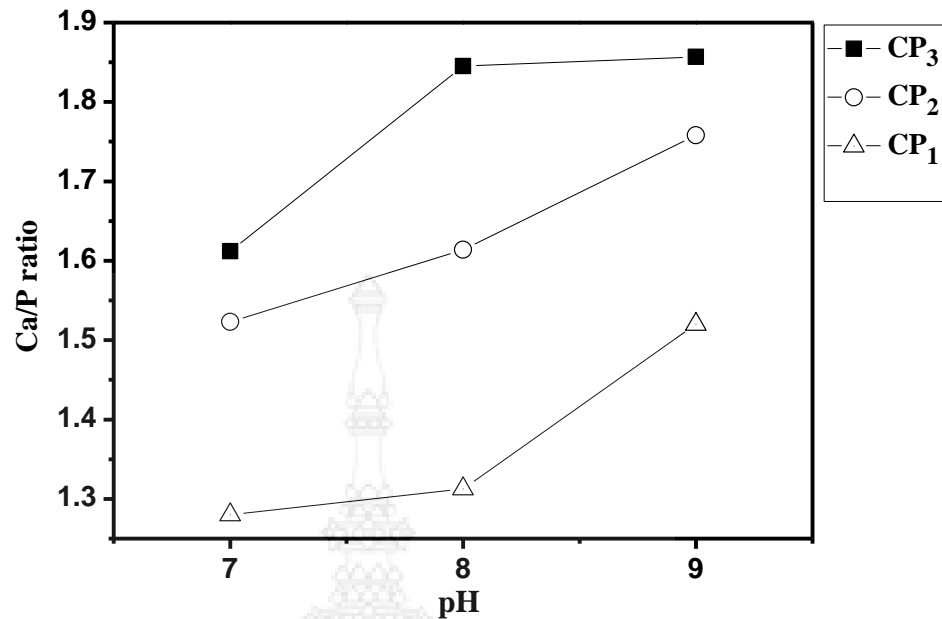
จากการปรับค่า ความเข้มข้นของสารละลาย และระดับความเป็นกรด-ด่าง โดยก่อให้เกิดผลึกอะพาไทต์ที่มีรูปร่างสัณฐานวิทยาต่างๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2-4.10 และตารางที่ 4.1 ทั้งนี้การที่ผลึกอะพาไทต์ที่มีรูปร่างทั้งแบบแผ่น ทรงกลม หรือแบบดอกไม้ เกิดจากการโตของผลึกในทิศทางต่างๆกัน ซึ่งจะต้องมีการศึกษาต่อไปในอนาคตเพื่อที่จะสามารถควบคุมรูปร่างของผลึกอะพาไทต์ได้ สำหรับงานวิจัยนี้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน คือชิ้นงานที่ CP<sub>9</sub> เนื่องจากมีขนาดผลึกที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดเล็กประมาณ 50 นาโนเมตร

#### 4.3 ผลการตรวจสอบอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน

อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P) ที่ได้จากข้อมูล EDX แสดงดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

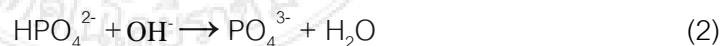
ตารางที่ 4.2 อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน

ชิ้นงาน	สัดส่วน Ca/P ของผลึกอะพาไทต์		
	pH=7	pH=8	pH=9
CP <sub>1</sub>	1.280	1.313	1.520
CP <sub>2</sub>	1.523	1.614	1.758
CP <sub>3</sub>	1.612	1.845	1.857



รูปที่ 4.11 กราฟอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไหมไฟโบรอิน

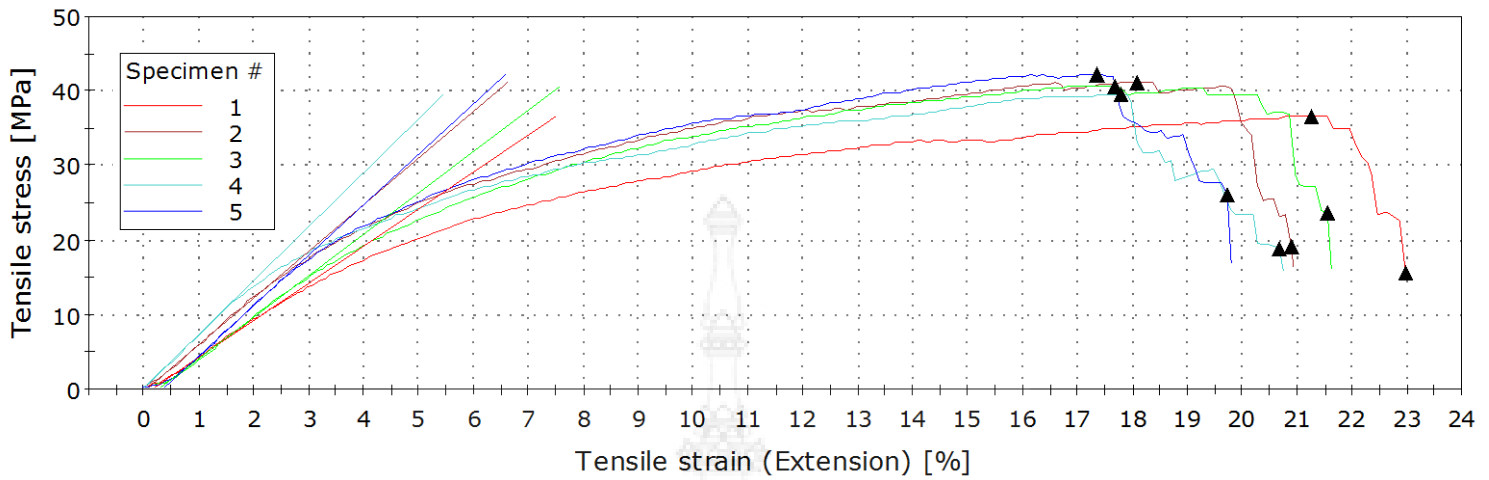
โครงสร้างเฟสของอะพาไทต์ที่มีสัดส่วน Ca/P อยู่ระหว่าง 1.5-1.67 เรียกว่าเฟส calcium deficient hydroxyapatite (Ca-dHAp) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และระดับ pH มีผลต่อ สัดส่วนของ Ca/P ซึ่งส่งผลต่อเฟสของสารประกอบอะพาไทต์ โดยเมื่อทำการปรับความเข้มข้นของสารละลาย Ca และ P จากระดับ CP<sub>1</sub> ไปสู่ CP<sub>2</sub> และ CP<sub>3</sub> ตามลำดับ พบว่า สัดส่วน Ca/P ของผลึกอะพาไทต์มีค่าสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการความเข้มข้นของไอออน Ca<sup>2+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และ OH<sup>-</sup> มากขึ้นจึงส่งผลสู่การก่อตัวของผลึก Ca-dHAp ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน Ca/P ของผลึกอะพาไทต์เมื่อมีการเพิ่มระดับ pH ที่สูงขึ้น พบว่าเกิดความเข้มข้นของไอออน OH<sup>-</sup> ที่ถูกเพิ่มขึ้นจากการปรับระดับ pH ส่งผลให้ลดจำนวนไอออน HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ที่จะเข้าไปก่อตัวในการเกิดผลึก Ca-dHAp ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสคือ



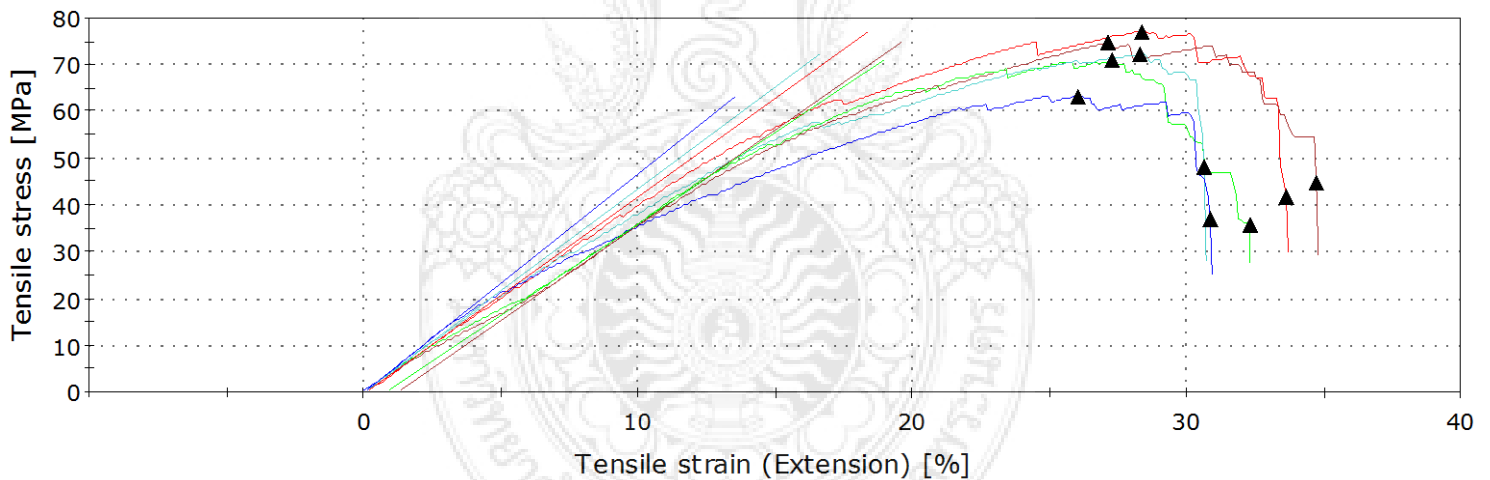
ดังนั้นความเข้มข้นของไอออน Ca<sup>2+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และ OH<sup>-</sup> ก็จะถูกก่อตัวในการสร้างผลึก Ca-dHAp มากขึ้น จึงทำให้สัดส่วน Ca/P สูงขึ้นนั่นเอง



#### 4.4 ผลการตรวจสอบความแข็งแรงของเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอเป็นผ้าฝืน ในรูปแบบลายขัดและลายทแยง



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด  
ของผ้าฝืนเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยง



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด  
ของผ้าฝืนเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายขัด

ตารางที่ 4.3 สรุปค่ามอดุลัสของยังก์และค่าความทนของแรงดึงของผ้าฝ้ายเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยงและลายขัด

ชิ้นงาน	มอดุลัสของยังก์ [MPa]	ความทนต่อแรงดึง [MPa]
ลายทแยง	616	40
ลายขัด	425	72

จากผลการวัดค่ามอดุลัสของยังก์ของผ้าฝ้ายเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยงและลายขัดพบว่ามีค่าประมาณ 616 MPa และ 425 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าการถักทอเส้นใยไหมแบบลายขัดมีค่ามอดุลัสของยังก์น้อยกว่าการถักทอแบบลายทแยง เป็นผลเนื่องมาจากการที่เส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายขัดเป็นลายที่มีโครงสร้างการจัดเรียงเส้นใยแน่นกว่าการจัดเรียงเส้นใยแบบลายทแยง และมีการขัดกัน (Interlacing) ของเส้นใยไหมที่มากกว่า จึงทำให้การยึดตัวมีน้อยกว่า ส่งผลให้ค่ามอดุลัสของยังก์น้อยกว่านั่นเอง ในขณะที่ค่าความทนต่อแรงดึงของผ้าฝ้ายเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายทแยงและลายขัดพบว่ามีค่าประมาณ 40 MPa และ 72 MPa ตามลำดับ จะพบว่าผ้าฝ้ายเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายขัดมีค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าแบบลายทแยงเกือบ 2 เท่า อันเนื่องมาจากการขัดกันที่หนาแน่นนั่นเอง ทำให้สามารถต้านทานต่อการแตกหัก และการโตของรอยแตก (crack propagation) ได้มากกว่า ส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึง มากที่มากกว่า ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบเส้นใยไหมไฟโบรอินที่ถักทอแบบลายขัดมีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนกระดูก และโครงสร้างเลี้ยงเซลล์กระดูกในอนาคต

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการเพิ่มสมบัติเชิงกลของอะพาไทต์ให้สามารถนำมาพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนกระดูกเพื่อใช้ในบริเวณที่ต้องรองรับแรงกระทำสูง ๆ ได้ โดยทำการปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยไฟเบอร์อิน ซึ่งเป็น การนำเอาข้อดีของเส้นใยใหม่ไฟเบอร์อินที่มีสมบัติเชิงกลสูง และ HAp ที่สามารถเข้ากันได้ดีมากกับเนื้อเยื่อร่างกาย มาพัฒนาเป็นวัสดุเชิงผสมเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาวัสดุทดแทนกระดูกต่อไป

เริ่มแรกจะเป็นการเตรียมสารตั้งต้นของแคลเซียมจากเปลือกไข่ เนื่องจากเปลือกไข่มีองค์ประกอบของแคลเซียมที่สูง และเป็นวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่หาได้ง่ายและมีปริมาณมาก และที่สำคัญงานวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ว่า HAp ที่ใช้เปลือกไข่เป็นสารตั้งต้นของแคลเซียม มีสมบัติทางชีวภาพที่ดีกว่า สรุปได้ว่าต้องทำการแคลไซน์ผงเปลือกไข่ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการการเปลี่ยนแปลงเฟสของผงเปลือกไข่เป็นแคลเซียมออกไซด์ จากนั้นก็เตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายแคลเซียมไนเตรต ก่อนนำเส้นใยใหม่ไฟเบอร์อินไปแช่ รินสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และปรับ pH ของละลายละลายแคลเซียมและฟอสฟอรัสด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดกระบวนการการปลูกผลึกอะพาไทต์บนเส้นใยใหม่ไฟเบอร์อิน ผลการทดลองพบว่า ผลึกที่เกิดขึ้นมีรูปร่างสี่เหลี่ยมทั้งแบบแผ่น แบบทรงกลมไข่ปลา และแบบดอกไม้ และจากการตรวจสอบอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของผลึกอะพาไทต์ภายใต้เงื่อนไขการปรับความเข้มข้นของสารละลายและระดับ pH ของสารละลาย ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและระดับ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น จากข้อมูลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขของการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานที่ CP<sub>10</sub> มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากขนาดผลึกที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดเล็กประมาณ 50 นาโนเมตร และในส่วนสุดท้ายของการทดสอบความทนต่อแรงดึงพบว่า ใยใหม่ไฟเบอร์อินที่ถักทอแบบลายขัดจะมีค่าความทนต่อแรงดึงมากกว่าการถักทอแบบลายทแยงเกือบ 2 เท่า อันเนื่องมาจากโครงสร้างมีการขัดกันของเส้นใยที่หนาแน่นกว่านั่นเอง ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบเส้นใยใหม่ไฟเบอร์อินที่ถักทอแบบลายขัดมีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนกระดูก และโครงสร้างเลี้ยงเซลล์กระดูกในอนาคต

## รายการอ้างอิง

1. M. Vallet-Regi and JM. Gonzalez-Calbet, "Calcium phosphates as substitution of bone tissue," *Prog. Sol. State. Chem*, vol. 32, pp. 1-31, 2004.
2. L. Hench, "Bioceramic: from concept to clinic," *J. Amer. Ceram. Soc*, vol. 74, pp. 1487-1510, 1991.
3. M. Vallet-Regi, "Revisiting ceramics for medical applications," *Dalt. Trans.*, pp. 5211-5220, 2006.
4. Information on <http://www2.bot.or.th/statistica/ReportPage.aspx?reportID=55&language=th>.
5. H.Y. Cheung, K.T. Lau, X.M. Tao and D. Hui, "A potential material for tissue engineering: Silkworm silk/PLA biocomposite," *Compos Part B*, vol. 39, pp. 1026-1033, 2008.
6. Y. Wang, U.-J. Kim, D.J. Blasioli, H. Kim and D.L. Kaplan, "In vitro cartilage tissue engineering with 3D porous aqueous-derived silk scaffolds and mesenchymal stem cells," *Biomaterials*, vol. 26, pp. 7082-7094, 2005.
7. J.K. Hyeon, J.K. Ung, S.K. Hyun, L. Chunmei, G.L. Gary and L. David, "Bone tissue engineering with premineralized silk scaffolds," *Kaplan Bone*, vol. 42, pp. 1226-1234, 2008.
8. Information on <http://www.g30up.com/forums/viewtopic.php?f=6&t=2405>.
9. L. Niu, R. Zou, Q. Liu, Q. Li, X. Chen and Z. Chen, "A Novel Nanocomposite Particle of Hydroxyapatite and Silk Fibroin: Biomimetic Synthesis and Its Biocompatibility," *J NANOMETER*, vol. 10, pp. 1155-1161, 2010.
10. C. Fan, J. Li, G. Xu, H. He, X. Ye, Y. Chen, X. Sheng, J. Fu and D. He, "Facile fabrication of nano-hydroxyapatite/silk fibroin composite via a simplified coprecipitation route," *J Mater Sci*, vol. 45, pp. 5814-5819, 2010.
11. X. He, X. Huang, Q. Lu, S. Bai and H. Zhu, "Nanoscale Control of Silks for Regular Hydroxyapatite Formation", *PROG MATER SCI: MATER INT*, Vol. 22, pp. 115-119, 2012.
12. Y. Zhang, C. Wu, T. Friis and Y. Xiao, "The osteogenic properties of CaP/silk composite scaffolds", *Biomaterials*, Vol. 31, pp. 2848-2856, 2010.

13. L. Meinel, S. Hofmann, V. Karageorgiou, K.-H. Cart, J. McCool, G. Gronowicz, L. Zichner, R. Langer, V.-N. Gordana, and D.L. Kaplan, "The inflammatory responses to silk films in vitro and in vivo", *Biomaterials*, Vol. 26, pp. 147-155, 2005.
14. S.V. Dorozhkin, "Bioceramics of Calcium Orthophosphates", *Biomaterials*, Vol. 31, pp. 1465-1485, 2010.
15. T.S. Hin, "Engineering Materials for Biomedical Applications, Biomaterials Engineering and Processing Series", World Scientific Publishing, vol. 1, Singapore. 2004.
16. S.A. Guelcher and J.O. Hollinger, "An introduction to biomaterials", Taylor & Francis, New York, pp 3-14, 2006.
17. เอกสารวิชาการหมอนไหม, การปลูกหมอนเลี้ยงไหม, กรมส่งเสริมการเกษตร (Online), 1995, Available: <http://www.ku.ac.th/e-magazine/march45/agri/mai.html>, (15 may 2010).
18. S. Sofia, M.B. McCarthy, G. Gronowicz, and D.L. Kaplan, "Functionalized Silk-Based Biomaterials for Bone", *Journal of Biomedical Materials*, 54, pp. 139-148. 2001.
19. M.M. Woolfson, "An Introduction to X-Ray Crystallography, Cambridge University Press, London, pp. 67-89, 1970.
20. R.A. Yong, "The Rietveld Method", Oxford University Press, Oxford, pp. 13-28, 1993.
21. Y. Liu, K. de Groot, and E.B. Hunziker, "BMP-2 Liberated from Biomimetic Implant Coatings Induces and Sustains Direct Ossification in an Ectopic Rat Model," *Bone*, Vol. 36, pp. 745 – 757, 2005.
22. S. Chaiyakun, "Growth and Characterization of Nanostructure Anatase Phase TiO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by DC Reactive Unbalanced Magnetron Sputtering", Ph.D., Physics Department, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2009.
23. E.M. Rivera, M. Araiza, W. Brostow, V.M. Castano, J.R.D. Estrada, R. Hernandez, and J.R. Rodriguez, "Synthesis of Hydroxyapatite from Eggshells", *Materials Letters*, Vol. 41, pp. 128-134, 1999.
24. Chang S.K., I.C. Um, Y.H. Park. Acceleration effect of sericin on shear-induced  $\beta$ -transition of silk fibroin", *Journal of Polymer*. Vol. 50 pp. 4618-4625, 2009.

ภาคผนวก ก



การคำนวณอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P) ที่ได้จากข้อมูล EDX

$$CP_{17}: Ca/P = 16.36/14.64 = 1.280$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	8.90	16.36
O K	36.42	50.22
P K	20.55	14.64
Ca K	34.13	18.79
Totals	100.00	

$$CP_{18}: Ca/P = 9.58/13.11 = 1.313$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	5.30	9.58
O K	44.26	60.10
P K	18.69	13.11
Ca K	31.76	17.21
Totals	100.00	

$$CP_{19}: Ca/P = 17.176/11.30 = 1.520$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	4.74	10.77
O K	19.26	32.88
P K	22.88	11.30
Ca K	53.12	17.176
Totals	100.00	

$$CP_{27}: Ca/P = 17.21/11.30 = 1.523$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	8.13	14.40
O K	42.97	57.10
P K	16.46	11.30
Ca K	32.44	17.21
Totals	100.00	

$$CP_{28}: Ca/P = 17.21/11.30 = 1.523$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	5.62	10.20
O K	43.82	59.69
P K	16.37	11.52
Ca K	34.19	18.59
Totals	100.00	

$$CP_{29}: Ca/P = 35.20/20.02 = 1.758$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	4.82	8.46
O K	48.89	64.41
P K	18.10	20.02
Ca K	28.19	35.20
Totals	100.00	



$$CP_{37}: Ca/P = 13.91/8.63 = 1.612$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	16.46	17.46
O K	10.15	60
P K	14.46	8.63
Ca K	58.93	13.91
Totals	100.00	

$$CP_{38}: Ca/P = 15.22/8.25 = 1.845$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	3.20	5.74
O K	48.16	64.92
P K	20.05	8.25
Ca K	28.59	15.22
Totals	100.00	

$$CP_{39}: Ca/P = 15.12/8.14 = 1.857$$

Element	Weight%	Atomic%
C K	17.65	28.96
O K	38.80	47.79
P K	12.79	8.14
Ca K	30.76	15.12
Totals	100.00	

ภาคผนวก ข

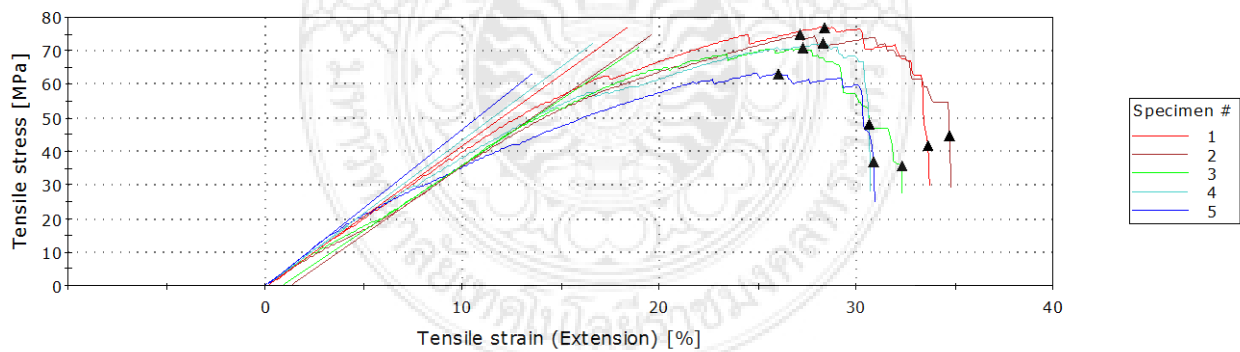


## ข้อมูลการทดสอบหาสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมไฟเบอร์อินที่ถักทอแบบลายขัด

ASTM D 638–10 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Conditioning procedure	
Preparation method	
Sample size	10
System of units	All
Extensometer Class	Class B-2 แบบลายขัด
Primary source	Extension
Dumbell Type	Type I
Control mode 1	Extension
Rate 1	30.00000 mm/min
Temperature (C)	23.0
Humidity (%)	50.0
Method revision date	11/2008

ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 5)



	Width [mm]	Thickness [mm]	Modulus Young's [MPa]	Modulus (Secant 1 %) [MPa]	Stress at Yield [MPa]	Strain at Yield [mm/mm]	Stress at Yield (Offset 2 %) [MPa]
1	10.00	0.35	422.74	354.32	77.16	0.28	60.78
2	10.00	0.35	407.99	376.27	74.75	0.27	59.26
3	10.00	0.35	392.05	386.03	70.94	0.27	62.53
4	10.00	0.35	434.77	395.08	72.16	0.28	49.60
5	10.00	0.35	466.78	440.84	63.28	0.26	32.54
Mean	10.00	0.35	424.87	390.51	71.66	0.27	52.94
S.D.	0.000	0.000	28.376	31.964	5.262	0.010	12.456
Coefficient of variation	0.000 00	0.00000	6.67890	8.18525	7.34378	3.47416	23.52783
Maximum	10.00	0.35	466.78	440.84	77.16	0.28	62.53
Median	10.00	0.35	422.74	386.03	72.16	0.27	59.26
Minimum	10.00	0.35	392.05	354.32	63.28	0.26	32.54

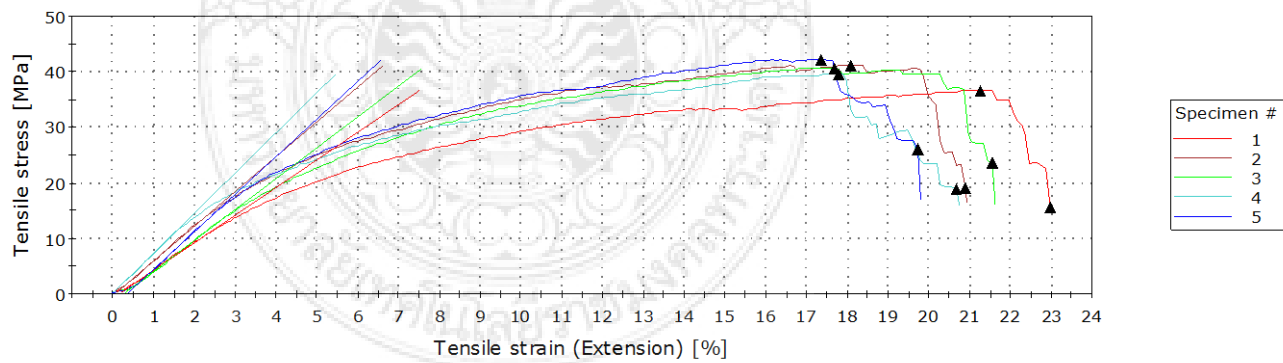
	Strain at Yield (Offset 2 %) [mm/mm]	Max Load [N]	Stress at Max Load [N/mm <sup>2</sup> ]	Strain at Break [mm/mm]	Tensile stress at Break (Standard) [MPa]
1	0.17	270.05	77.16	0.34	41.83449
2	0.18	261.63	74.75	0.35	44.59990
3	0.19	248.29	70.94	0.32	35.72960
4	0.13	252.57	72.16	0.31	48.12329
5	0.09	221.48	63.28	0.31	36.99074
Mean	0.15	250.80	71.66	0.32	41.45560
S.D.	0.040	18.418	5.262	0.018	5.177
Coefficient of variation	26.16655	7.34378	7.34378	5.45000	12.48835
Maximum	0.19	270.05	77.16	0.35	48.12329
Median	0.17	252.57	72.16	0.32	41.83449
Minimum	0.09	221.48	63.28	0.31	35.72960

## ข้อมูลการทดสอบหาสมบัติเชิงกลของเส้นใยไหมไฟเบอร์อินที่ถักทอแบบลายทแยง

ASTM D 638–10 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

Conditioning procedure	
Preparation method	
Sample size	10
System of units	All
Extensometer Class	Class B-2 แบบลายทแยง
Primary source	Extension
Dumbell Type	Type I
Control mode 1	Extension
Rate 1	30.00000 mm/min
Temperature (C)	23.0
Humidity (%)	50.0
Method revision date	11/2008

ASTM D 638-08: Stress-Strain Curve (Specimen 1 to 5)



	Width [mm]	Thickness [mm]	Modulus Young's [MPa]	Modulus (Secant 1 %) [MPa]	Stress at Yield [MPa]	Strain at Yield [mm/mm]	Stress at Yield (Offset 2 %) [MPa]
1	10.00	0.35	496.51	427.71	36.63	0.21	24.95
2	10.00	0.35	628.62	592.00	41.24	0.18	28.83
3	10.00	0.35	556.52	384.09	40.70	0.18	29.42
4	10.00	0.35	725.15	726.58	39.58	0.18	25.62
5	10.00	0.35	672.64	428.57	42.19	0.17	29.70
Mean	10.00	0.35	615.89	511.79	40.07	0.18	27.70
S.D.	0.000	0.000	90.963	143.934	2.142	0.016	2.242
Coefficient of variation	0.0000 0	0.00000	14.76937	28.12362	5.34515	8.70127	8.09399
Maximum	10.00	0.35	725.15	726.58	42.19	0.21	29.70
Median	10.00	0.35	628.62	428.57	40.70	0.18	28.83
Minimum	10.00	0.35	496.51	384.09	36.63	0.17	24.95

	Strain at Yield (Offset 2 %) [mm/mm]	Max Load [N]	Stress at Max Load [N/mm <sup>2</sup> ]	Strain at Break [mm/mm]	Tensile stress at Break (Standard) [MPa]
1	0.07	128.19	36.63	0.23	15.47403
2	0.07	144.35	41.24	0.21	19.09476
3	0.08	142.45	40.70	0.22	23.78543
4	0.06	138.54	39.58	0.21	18.93068
5	0.07	147.65	42.19	0.20	26.09266
Mean	0.07	140.24	40.07	0.21	20.67551
S.D.	0.008	7.496	2.142	0.012	4.231
Coefficient of variation	11.26824	5.34515	5.34515	5.67085	20.46530
Maximum	0.08	147.65	42.19	0.23	26.09266
Median	0.07	142.45	40.70	0.21	19.09476
Minimum	0.06	128.19	36.63	0.20	15.47403



ภาคผนวก ค





ภาพกิจกรรมการถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเส้นใยไหมและแนวทางในการสร้าง  
ผลิตภัณฑ์ของชุมชน



## ประวัตินักวิจัย

### หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ – นามสกุล

(ภาษาไทย) ดร. ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

(ภาษาอังกฤษ) Dr. Piyapong Pankaew

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน

3-1020-02911-13-8

3. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โทรศัพท์ 087 893 4457

E-mail: piyapong.physics@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

วท.บ. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปร.ด. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Bioceramics, Biopolymers, Nanomaterials, Composite materials,

Material fabrication, Material characterization and Production

planning and control

## ผู้ร่วมวิจัย

### 1. ชื่อ – นามสกุล

(ภาษาไทย) ดร. กัลทิมา เชาว์ชาอัญชัยกุล

(ภาษาอังกฤษ) Dr. KantimaChaochanchaikul

### 2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน

3-1022-01723-16-1

### 3. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### 4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โทรศัพท์ 081 659 2889

E-mail: kantima.cha@hotmail.com

### 5. ประวัติการศึกษา

วท.บ. (วัสดุศาสตร์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วศ.ม. (เทคโนโลยีวัสดุ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปร.ด. (เทคโนโลยีวัสดุ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

### 6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Polymer Composites

Wood/Natural Fiber Plastic Composites

Polymer Processing

## ผู้ร่วมวิจัย

### 1. ชื่อ – นามสกุล

(ภาษาไทย) วรนุช ดีละมัน

(ภาษาอังกฤษ) Woranuch Deelaman

### 2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน

1-9099-00041-65-8

### 3. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิทยาการสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### 4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
โทรศัพท์ 084 067 7254  
E-mail: woranuch\_nuch\_1@hotmail.com

### 5. ประวัติการศึกษา

วท.บ.(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยทักษิณ  
วท.ม.(การจัดการสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Environmental management  
Sediment  
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)