

การสังเคราะห์โพรนคาร์ไบด์จากรังไหมและกรดบอริก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF BORON CARBIDE FROM SILK COCOON AND BORIC ACID



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์โพรบคาร์ไบด์จากแร่ใหม่และกรดบอริก
โดย	น.ส.กานต์ชนก ภูผาทอง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.สุจาริณี สิ้นไชย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.สุจาริณี สิ้นไชย)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล แร่งทน)

..... กรรมการ
(ดร.อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ภาวดี อังค์วัฒนะ)

กานต์ชนก ภูผาทอง : การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์จากรังไหมและกรดบอริก.
 (SYNTHESIS OF BORON CARBIDE FROM SILK COCOON AND BORIC ACID) อ.ที่
 ปริญญาหลัก : ดร.สุจาริณี สิ้นไชย

โบรอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมสูงอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ประกอบกับมีสมบัติเชิงกลและทางกายภาพที่เป็นเลิศ จึงถูกนำไปใช้งานที่ต้องการความทนทานในสภาวะพิเศษหลากหลายด้าน ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้มีความพยายามที่จะสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิต่ำ จากรังไหมและกรดบอริก เนื่องจากรังไหมมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลภายในโครงสร้างสามารถสร้างพันธะ B-O-C ระหว่างกระบวนการเตรียมสารผสมตั้งต้นร่วมกับกรดบอริก รังไหมจะถูกจุ่มแช่ในสารละลายกรดบอริก จากนั้นนำไปสังเคราะห์โดยผ่านหรือไม่ผ่านขั้นตอนแคลไซน์ ผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ได้ถูกนำมาตรวจสอบองค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากการทดลองปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆในกระบวนการ พบว่า การจุ่มแช่รังไหม 1 กรัม ในสารละลายที่เตรียมกรดบอริก 2 และ 4 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อผ่านการอบและสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยโบรอนคาร์ไบด์ โดยมีคาร์บอนปรากฏเป็นเฟสหลักอยู่ในระบบ เมื่อลดอุณหภูมิการสังเคราะห์เป็น 1350 องศาเซลเซียส ไม่พบโบรอนคาร์ไบด์ในองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ เมื่อนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ 180 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง มาใช้ร่วมในการสังเคราะห์ พบว่าไม่สามารถพัฒนาการเกิดเฟสโบรอนคาร์ไบด์ให้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในส่วนนี้ยังคงต้องการการศึกษาทดลองเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผล

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6172116823 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: Boron carbide Silk cocoon Synthesis

Kanchanok Poophathong : SYNTHESIS OF BORON CARBIDE FROM SILK COCOON AND BORIC ACID. Advisor: SUJARINEE SINCHAI, Ph.D.

Boron carbide has gained much attention from many researchers. Its superior physical and mechanical properties make boron carbide a promising material for many applications. In this study, synthesis of boron carbide powder at low temperature from silk cocoon and boric acid was attempted. It was expected that hydroxyl functional group provided in the structure of silk cocoon would support the creation of B-O-C bonds during the precursor preparation process and thus promote the formation of boron carbide in the synthesized product. After gum removal process, dried fibroins from silk cocoon were completely immersed in the boric acid aqueous solution for 4 hours at room temperature. It was found that boron carbide along with carbon major phase were detected in the powder synthesized at 1450°C for 5 hours under argon flow. At the synthesis temperature of 1350°C there was no evidence of boron carbide in the powder product. In addition, hydrothermal treatment at 180°C for 4 hours was introduced in the precursor preparation process but could not improve the boron carbide phase formation. Further study on hydrothermal process parameters was required in order to confirm the result.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับการสนับสนุนและความช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการ การดำเนินการวิจัย การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร. สุจาริณี สิ้นไชย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นแนวทางการดำเนินการ การแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆระหว่างการดำเนินงาน อีกทั้งให้กำลังใจ และสนับสนุนกำลังทรัพย์ตลอดการวิจัย อาจารย์คอยอบรมบ่มเพาะ คอยสั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้วิจัยเพื่อให้ผู้วิจัยมีคุณลักษณะนิสัยที่ดี และเป็นนักวิจัยที่ดีในภายภาคหน้า คอยชี้แนะแนวทางต่างๆ ตรวจสอบแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์ และมอบโอกาสที่ดีให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ว่าที่ร้อยตรี ธีระนันท์ พิจารโชติและศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติฯ จังหวัดศรีสะเกษ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัยและความรู้ตลอดการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณโครงการนวัตกรรมไหมไทยสมบัติพิเศษฯ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการวิจัยตลอดการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ ประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับการเสียสละเวลาในการตรวจและแก้ไขข้อบกพร่องของเล่มวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นายวิรัช ทรัพย์นครพรม เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ XRD นางสาวบงกช พุฒแก้ว เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ SEM นายอนุรักษ์ อ่อนนุ่ม เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ FTIR นายรณภูมิ ไชยตระการกิจ ที่คอยช่วยเหลือ ตลอดจนคุณป้า โรงเลี้ยงที่ 6 ณ ศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติฯ จังหวัดศรีสะเกษ เพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องและผู้เกี่ยวข้องทุกๆ คนที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายขอโน้มรำลึกในพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชายที่คอยอบรมสั่งสอน ให้ผู้วิจัยได้ฝึกฝนในการเรียนรู้และคอยสนับสนุนด้านกำลังทรัพย์ตลอดการศึกษา คอยให้กำลังใจในยามที่ท้อใจกับปัญหาจนก้าวผ่านมาได้ ทำให้สามารถดำเนินชีวิตได้อย่างเข้มแข็งและภาคภูมิใจจนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์

กานต์ชนก ภูผาทอง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โบรอนคาร์ไบด์.....	3
2.1.1 โครงสร้างของโบรอนคาร์ไบด์.....	3
2.2 การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์.....	4
2.3 การนำรังไหมมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์.....	9
2.3.1 โครงสร้างไฟโบรอิน.....	9
2.3.2 การนำรังไหมมาใช้ประโยชน์.....	11
2.3.3 การนำรังไหมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ผงเซรามิก.....	15
2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 การเตรียมสารตั้งต้น.....	18

3.1.1	การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม	18
3.1.2	การจุ่มแช่รังไหมในสารละลายกรดบอริก	19
3.1.3	การนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์	20
3.2	การสังเคราะห์ผงโบรอนคาร์ไบด์	20
3.3	การตรวจสอบคุณลักษณะ	20
3.3.1	องค์ประกอบเฟส	20
3.3.2	หมู่ฟังก์ชัน	21
3.3.3	โครงสร้างจุลภาค	21
บทที่ 4	วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	25
4.1	การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม	25
4.1.1	โครงสร้างจุลภาคของเส้นไหม	25
4.1.2	องค์ประกอบเฟสของรังไหม	25
4.2	การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์จากรังไหมที่จุ่มแช่ในสารละลายกรดบอริก	28
4.2.1	การประเมินขั้นต้นเพื่อหาช่วงส่วนผสมที่เหมาะสมในการเตรียมสารตั้งต้น	28
4.2.2	หมู่ฟังก์ชันของสารตั้งต้น	30
4.2.3	อิทธิพลของอุณหภูมิในการเตรียมสารตั้งต้น	31
4.2.4	การสังเคราะห์โดยผ่านขั้นตอนการแคลไซน์	32
4.2.5	การสังเคราะห์โดยไม่ผ่านการแคลไซน์	34
4.2.6	โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์	38
4.2.7	การนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาร่วมใช้ในการสังเคราะห์	39
บทที่ 5	สรุปผลงานวิจัย	41
	บรรณานุกรม	43
	ประวัติผู้เขียน	46

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของเส้นไหมปกติ (SF) เปรียบเทียบกับเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยนาโนทิวป์ (SF/CNT).....	14
ตารางที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของรังไหมและเส้นไหมที่สร้างจากหนอนไหม 9 สายพันธุ์.....	15
ตารางที่ 3.1 ชื่อสูตรสารละลายที่เตรียมเพื่อใช้เสริมอาหารแก่หนอนไหมในงานวิจัยนี้.....	18



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของโพรอนคาร์ไบด์	3
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบเฟสของ (a) h-BN, (b) C, (c) ผลึกภัณฑ์จากการสังเคราะห์ที่ 1900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง, (d) 4 ชั่วโมง และ (e) 5 ชั่วโมง.....	4
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (a) ตำแหน่งกลางชิ้นงาน (b) ตำแหน่งผิวชิ้นงาน	5
รูปที่ 2.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันในเจลที่เตรียมได้จากงานวิจัยของ S. Avcioglu และคณะ.....	6
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบเฟสผลึกภัณฑ์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1300 และ 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในงานวิจัยของ S. Avcioglu และคณะ.....	6
รูปที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันของ (a) กรดบอริก (b) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (c) PVBO ในงานวิจัยของ I. Yanase และคณะ	7
รูปที่ 2.7 (a) ผิวของเจล PVBO ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และ (b) ภายหลังการจัดโพรอนออกไซด์	8
รูปที่ 2.8 องค์ประกอบเฟสของเจล PVBO ที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส และสังเคราะห์ที่ 1100-1300 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยของ I. Yanase และคณะ	8
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของเส้นไหม.....	9
รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวของโครงสร้าง β -sheet แบบขนานและไม่ขนาน ในไฟโบรอิน.....	10
รูปที่ 2.11 แบบจำลองโครงสร้างของสารผสมตั้งต้นพอลิไวนิลบอเรต.....	11
รูปที่ 2.12 รังไหมที่ได้จากการเลี้ยงหนอนไหมด้วยใบหม่อนปกติ (ซ้าย) และรังไหมที่ได้จากการเลี้ยงหนอนไหมด้วยใบหม่อนเสริมอนุภาคนาโน Fe_3O_4	12
รูปที่ 2.13 สมบัติความเป็นแม่เหล็กของเส้นไหมปกติ (ซ้าย) และเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยอนุภาคนาโน Fe_3O_4 (ขวา)	12
รูปที่ 2.14 (ซ้าย) กราฟแสดงความแข็งแรง และ (ขวา) น้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เปรียบเทียบระหว่างเส้นไหมปกติ (SF) และเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วย Fe_3O_4	12

รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของ (ซ้าย) เส้นไหมปกติ และ (ขวา) เส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วย Fe_3O_4	13
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความแข็งแรงของเส้นไหมปกติ (SF) เปรียบเทียบกับเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยนาโนทิวป์ (SF/CNT).....	14
รูปที่ 2.17 (ซ้าย) ภาพตัดขวางขวางของเส้นไหมปกติ และ(ขวา) เส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์.....	14
รูปที่ 2.18 (A-B) โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ และ (C) ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS จากงานวิจัยของ F. Torknik และคณะ.....	16
รูปที่ 2.19 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล	17
รูปที่ 3.1 การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม.....	22
รูปที่ 3.2 การจุ่มแช่รังไหมในสารละลายกรดบอริก.....	23
รูปที่ 3.3 การนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์	24
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเส้นไหมที่ใช้ในงานวิจัยนี้	25
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบเฟสของรังไหมจากการเสริมอาหารด้วยสารละลายไตรเมทิลโบเรต ความเข้มข้น 3% (TMB3) และ 5% (TMB5) เปรียบเทียบกับรังไหมจากหนอนไหมที่ไม่ได้รับการเสริมอาหาร.....	26
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบเฟสของมูลหนอนไหมที่ไม่ได้รับการเสริมอาหารและที่เสริมอาหารด้วยสารละลายกรดบอริก 10%	26
รูปที่ 4.4 องค์ประกอบเฟสของรังไหมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	27
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบเฟสของรังไหม (TMB5) ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	28
รูปที่ 4.6 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้น ด้วยการจุ่มแช่รังไหม 4 กรัม ในสารละลายกรดบอริก และผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส ภาพซ้าย-จุ่มแช่ ณ อุณหภูมิห้อง และภาพขวา-จุ่มแช่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส.....	29

รูปที่ 4.7 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้น ด้วยการจุ่มแช่รังไหม 6 กรัม ในสารละลาย กรดบอริก และผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส ภาพซ้าย -จุ่มแช่ ณ อุณหภูมิห้อง และ ภาพขวา -จุ่มแช่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส..... 29

รูปที่ 4.8 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้น ด้วยการจุ่มแช่รังไหม 4 กรัม ใน สารละลายกรดบอริกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ผ่านการแคลไซน์ที่ 700 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน..... 30

รูปที่ 4.9 (ซ้าย) หมู่ฟังก์ชันของกรดบอริก รังไหมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ และสารตั้งต้นที่ เตรียมจากส่วนผสม SBA2 SBA3 และ SBA4 และ(ขวา) ส่วนขยายแสดงแถบการดูดกลืนของ สารตั้งต้นในช่วงเลขคลื่น 1000-1200 cm^{-1} 31

รูปที่ 4.10 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้นโดยการจุ่มแช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้องและ 80 องศาเซลเซียส ผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมงใน บรรยากาศก๊าซอาร์กอน 32

รูปที่ 4.11 องค์ประกอบเฟสของส่วนผสม SBA4 หลังการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 33

รูปที่ 4.12 องค์ประกอบเฟสของส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมงในบรรยากาศ ก๊าซอาร์กอน..... 34

รูปที่ 4.13 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ (ก) ที่ได้จากการแคลไซน์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (ข) หลังการสังเคราะห์ และ (ค) หลังการสังเคราะห์โดยไม่ผ่านขั้นตอน..... 35

รูปที่ 4.14 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง โดยผ่านขั้นตอนการแคลไซน์ที่ 700 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และไม่ผ่าน การแคลไซน์..... 36

รูปที่ 4.15 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA2 SBA3 และ SBA4 ที่ อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน..... 37

รูปที่ 4.16 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน 38

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน..... 39

รูปที่ 4.18 องค์ประกอบเฟสของส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านและไม่ผ่าน
สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน 40



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โบรอนคาร์ไบด์ หรือ black diamond ปรากฏรายงานการค้นพบในปีค.ศ.1889 โดย Henry Moissan จัดเป็นวัสดุที่มีความแข็งเป็นอันดับสามของโลกรองจากเพชรและคิวบิกโบรอนไนไตรด์ โบรอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเซรามิกที่นักวิจัยทั่วโลกต่างให้ความสนใจ เนื่องด้วยเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง (Knoop hardness 35 กิกะพาสคัล) น้ำหนักเบา (ความหนาแน่น 2.51 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น คงความแข็งแรง ณ อุณหภูมิสูง ทนทานต่อสภาวะกรดต่าง และมีความสามารถต้านทานต่อการขีดสีเป็นเลิศ ด้วยสมบัติดังกล่าวทำให้โบรอนคาร์ไบด์มีความเหมาะสมนำไปผลิตชิ้นส่วนประกอบยานยนต์สมรรถนะสูง เสื่อเกราะและอุปกรณ์กันกระสุน วัสดุเคลือบผิวและหัวฟันทราย เป็นต้น นอกจากนี้ โบรอนคาร์ไบด์ยังมีความสามารถในการดูดซับนิวตรอน จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุประกอบเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น carbothermic reduction, electrospinning, sol-gel, plasma sintering เป็นต้น วิธีที่ได้กล่าวมานี้จำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิสูงในการสังเคราะห์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีชั้นตอนซับซ้อน ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ ในช่วงเวลาที่ผ่านมานักวิจัยจึงได้พยายามที่จะลดอุณหภูมิ การสังเคราะห์ด้วยการปรับเปลี่ยนชนิดของสารตั้งต้นเพื่อให้สารตั้งต้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีโครงสร้างหรือพันธะที่เอื้อต่อการสังเคราะห์ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้วัสดุตั้งต้นและการเตรียมสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดพันธะ B-O-C ขึ้นในโครงสร้าง มีแนวโน้มว่าจะสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ได้

รังไหมหรือเส้นไหมเป็นโปรตีนชนิดเส้นใยซึ่งสามารถผลิตได้จากหนอนไหม ภายในโครงสร้างของเส้นไหมประกอบด้วยคาร์บอนและพันธะ OH ซึ่งสามารถเกิดเป็นพันธะ B-O-C หากมีการเติมโบรอนและผ่านกระบวนการเตรียมสารที่เหมาะสม ที่ผ่านมามีงานวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติและลักษณะพิเศษของเส้นไหม เช่น มีการเสริมอาหารที่เป็นสารแม่เหล็กแก่หนอนไหม ทำให้หนอนไหมผลิตเส้นไหมที่มีสมบัติเชิงแม่เหล็กตามที่ต้องการ จากข้อมูลดังกล่าวนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้รังไหมเป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ โดยเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหมเพื่อให้หนอนไหมผลิตรังไหม โดยในเบื้องต้น ผู้วิจัยคาดการณ์ว่ารังไหมที่ได้นี้ควรมีโบรอนอยู่ในโครงสร้างและจะสามารถนำไปสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ได้เป็นผลสำเร็จ แต่เมื่อได้ทำ

การทดลองก็พบว่า ปริมาณโบรอนในโครงสร้างรังไหมมีน้อยเกินกว่าจะสามารถสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ได้ ผู้วิจัยจึงได้ปรับเปลี่ยนแผนการทดลองมาเป็นการจุ่มแช่รังไหมในสารละลายกรดบอริก นอกจากนี้ยังได้ทดลองนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์ โดยผู้วิจัยคาดหวังว่าการให้ความร้อนพร้อมกับความดันแก่สารผสมตั้งต้นจะช่วยเร่งการแพร่ของโบรอนในสารละลายให้เข้าไปภายในโครงสร้างของรังไหมได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดพันธะ B-O-C แก่ระบบในปริมาณมากขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้วางแผนดำเนินการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม การนำรังไหมมาจุ่มแช่ในสารละลายกรดบอริก และการนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ ทั้งนี้ ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะสามารถลดอุณหภูมิในการสังเคราะห์ และ/หรือได้ผลิตภัณฑ์โบรอนคาร์ไบด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ต่อไป

หมายเหตุ : หนอนไหมเป็นสัตว์ที่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์พิจารณาการใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ เนื่องจากไม่เข้าข่ายสัตว์ที่มีการเลี้ยงหรือการนำมาใช้เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ตามชนิดและประเภทที่กำหนดในกฎกระทรวง ตามพระราชบัญญัติสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ พ.ศ. 2558

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์โดยใช้แหล่งคาร์บอนธรรมชาติ ได้แก่ รังไหมเป็นสารตั้งต้น
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการสังเคราะห์ที่มีต่อลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและสม่ำเสมอได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้รังไหมเป็นแหล่งคาร์บอน

บทที่ 2

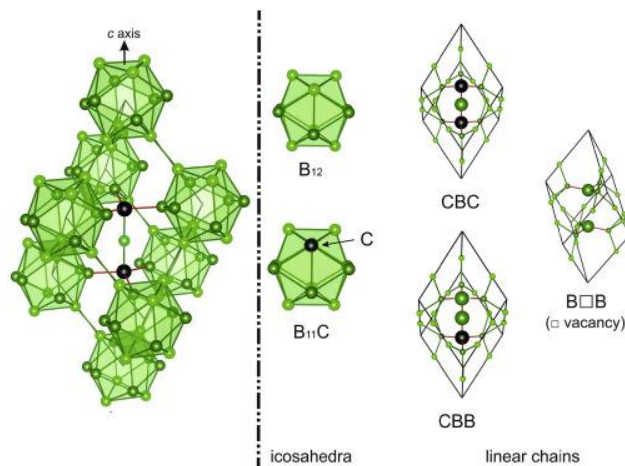
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 โบรอนคาร์ไบด์

โบรอนคาร์ไบด์หรือ Black Diamond ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ.1858 จากการตรวจสอบสารที่เป็นผลผลิตพลอยได้ (by-product) ในอุตสาหกรรมการผลิตโลหะบอไรด์^[1] ด้วยสมบัติที่โดดเด่น ทั้งในด้านความแข็งที่สูงมาก สามารถทนความร้อนสูง (จุดหลอมเหลว 2450 องศาเซลเซียส) มีน้ำหนักเบา (ความหนาแน่น 2.51 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี ทำให้โบรอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจ ถูกนำมาใช้ในงานที่ต้องการความทนทานเป็นพิเศษ ได้แก่ ชิ้นส่วนประกอบยานยนต์สมรรถนะสูง เกราะและอุปกรณ์กันกระสุน อาวุธยุทธโศปกรณ์ วัสดุตัดขีดถูกที่ใช้ในอุตสาหกรรม ฯลฯ

2.1.1 โครงสร้างของโบรอนคาร์ไบด์

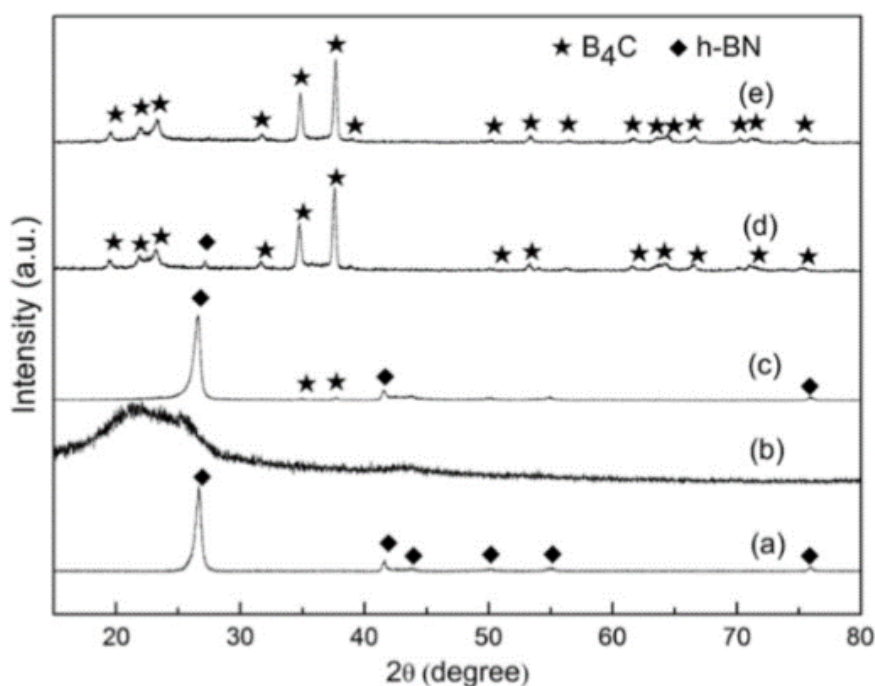
เราสามารถพิจารณาโครงสร้างผลึกโบรอนคาร์ไบด์ได้ 2 รูปแบบ คือ โครงสร้างผลึกแบบรวมโบฮีตรอลหรือเฮกซะโกนอล โดยโครงสร้างพื้นฐานจะประกอบด้วยโบรอน 12 อะตอม จัดเรียงตัวกันเป็นรูปทรง 20 หน้า ที่เรียกว่า icosahedron ในแต่ละ icosahedron เชื่อมต่อกันด้วยสายโซ่พันธะในลักษณะเส้นตรง 3 อะตอม ซึ่งจะมีรูปแบบการจัดเรียงหลายรูปแบบ เช่น คาร์บอน - คาร์บอน - คาร์บอน, คาร์บอน - โบรอน - คาร์บอน, คาร์บอน - โบรอน - โบรอน และ โบรอน - โบรอน - ช่องว่าง เป็นต้น^[2] ด้วยรูปแบบการจัดเรียงตัวที่หลากหลายนี้ ทำให้โบรอนคาร์ไบด์มีโครงสร้างย่อยหลากหลายรูปแบบ สำหรับโครงสร้างอุดมคติ (ideal structure) ของโบรอนคาร์ไบด์แต่ละ icosahedron จะเชื่อมต่อกันด้วยสายโซ่เส้นตรง 3 อะตอมที่ประกอบไปด้วย คาร์บอน - โบรอน - คาร์บอน และมีสูตรโครงสร้าง (B₁₂) CBC



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของโบรอนคาร์ไบด์^[3]

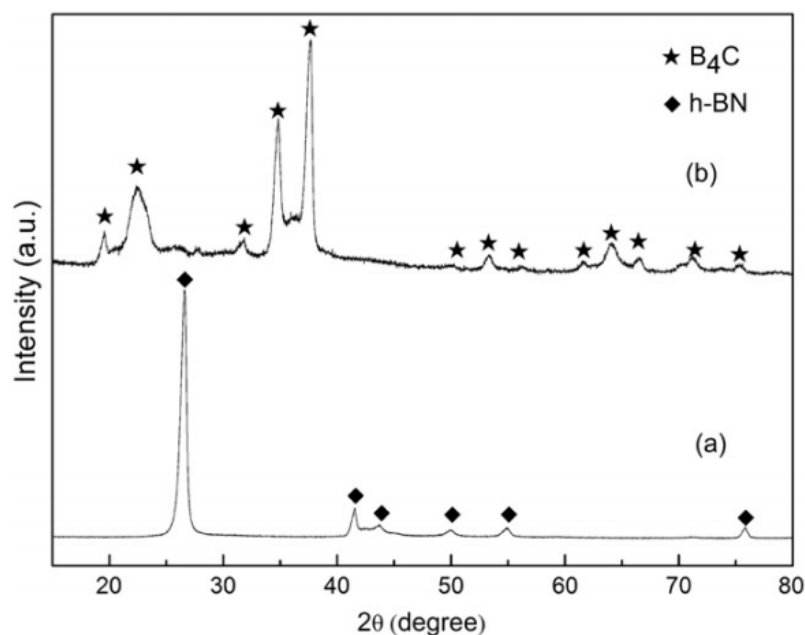
2.2 การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์

การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์สามารถทำได้หลายวิธี H. Zeng^[4] และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์จากสารตั้งต้นที่เป็นพอลิเมอร์ โดยเลือกใช้เฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (h-BN) และคาร์บอนแบล็ก (C) เป็นสารตั้งต้น กำหนดอัตราส่วนระหว่าง h-BN ต่อ C เท่ากับ 4 : 1 โดยโมลาร์ สารตั้งต้นได้ถูกบดผสม คัดขนาด จากนั้นทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1900 องศาเซลเซียส ความดัน 50 mTorr เป็นเวลา 1-5 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ต่อนาที จากการตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของผงผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์มีเพียงเฟสของเฟสโบรอนคาร์ไบด์ ไม่ปรากฏคาร์บอนหรือเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์หลงเหลืออยู่ในผงที่ได้จากการสังเคราะห์ (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบเฟสของ (a) h-BN, (b) C, (c) ผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ที่ 1900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง, (d) 4 ชั่วโมง และ (e) 5 ชั่วโมง^[4]

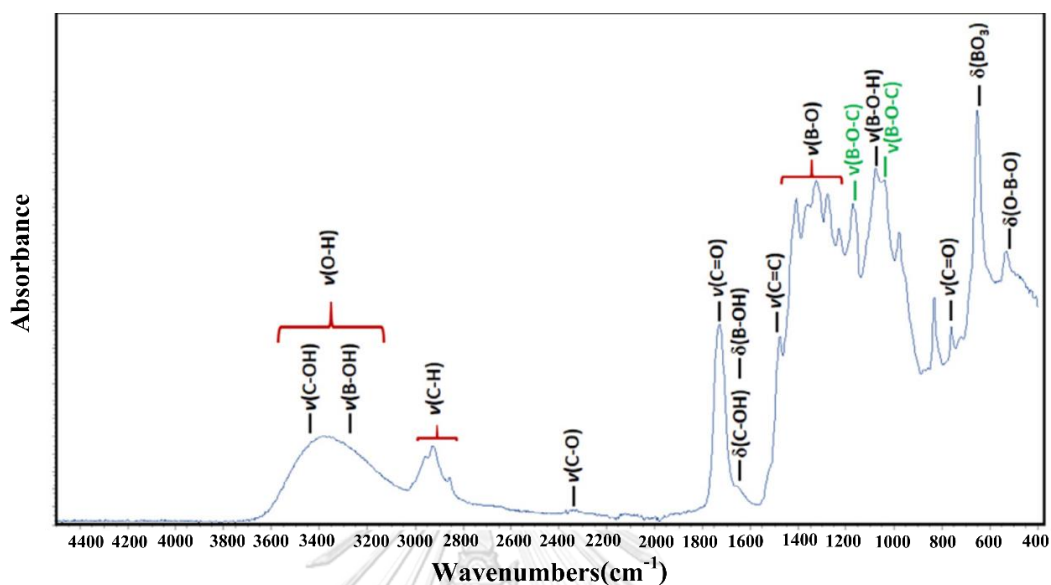
นอกจากนี้ H. Zeng และคณะ^[4] ยังได้นำสารผสมตั้งต้นมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยแรงอัด 10 MPa ก่อนทำการสังเคราะห์ในสภาวะเดิม เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์ที่บริเวณผิวและแกนกลางชิ้นงาน ดังแสดงผลในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า บริเวณผิวชิ้นงาน ปรากฏเฟสของโบรอนคาร์ไบด์เพียงเฟสเดียว ในขณะที่บริเวณแกนกลางของชิ้นงาน ยังคงปรากฏเฟสของเฮกซะโกนอลไนไตรด์ และไม่พบเฟสโบรอนคาร์ไบด์แต่อย่างใด ผลการทดลองนี้แสดงถึงกระบวนการสังเคราะห์ที่ยังไม่สมบูรณ์ทั่วทั้งชิ้นงาน



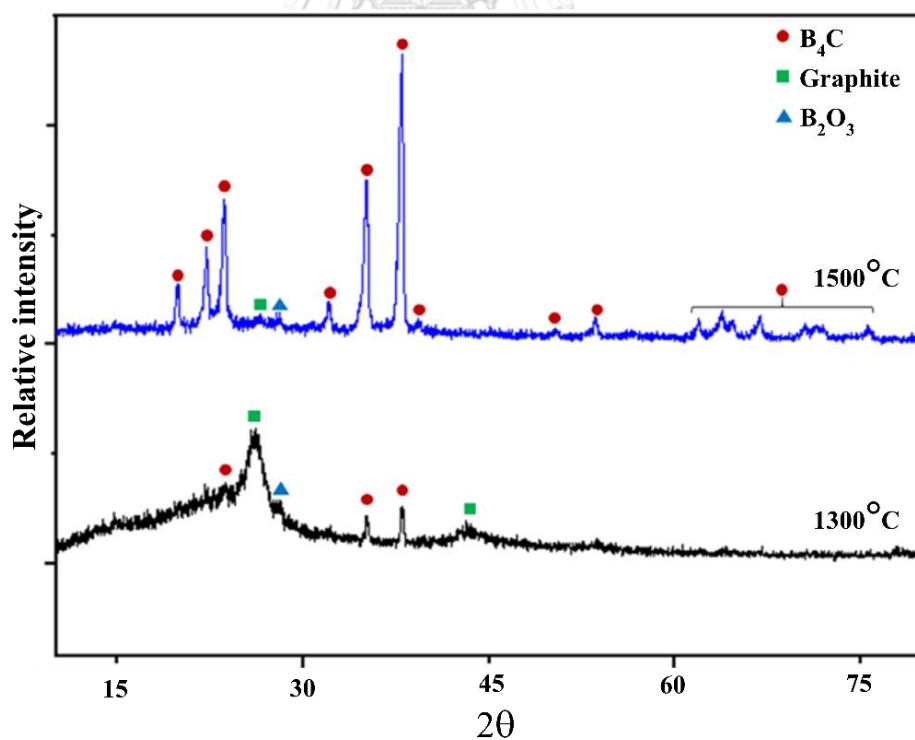
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่ผ่านการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (a) ตำแหน่งกลางชิ้นงาน (b) ตำแหน่งผิวชิ้นงาน^[4]

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นถึงสมบัติของโบรอนคาร์ไบด์ที่โดดเด่นเหนือกว่าวัสดุอื่น ทำให้นักวิจัยมากมายให้ความสนใจ ทำการศึกษาและสังเคราะห์สารชนิดนี้อย่างกว้างขวาง จากการค้นคว้างานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ในช่วงต้น พบว่ากระบวนการต้องใช้อุณหภูมิสูง (1800-2000 องศาเซลเซียส) อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาต่อมา ได้มีความพยายามนำเทคนิคต่างๆ เข้ามาใช้ในการกระบวนการ เพื่อที่จะลดอุณหภูมิการสังเคราะห์และลดต้นทุนการผลิต ตัวอย่างเช่น S. Avcioglu และคณะ^[5] ได้นำกระบวนการ sol-gel มาใช้ในการสังเคราะห์ โดยนำ สารตั้งต้น 3 ชนิด ได้แก่ กรดบอริก (0.3 โมล) กลีเซอรอล (0.3 โมล) และกรดซิตริก (0.15 โมล) มาเตรียมผสมที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ได้สารผสมตั้งต้นที่มีลักษณะเป็นเจล เมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR (รูปที่ 2.4) พบว่าเกิด พันธะ B-O-C ขึ้นในเจลที่เตรียมได้ เมื่อนำมาผ่านการแคลไซน์ที่ 675 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และสังเคราะห์ที่ 1300-1500 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง ในก๊าซอาร์กอน (อัตราไหลก๊าซ 200 มิลลิลิตรต่อนาที) จากการตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2.5) พบว่า โบรอนคาร์ไบด์ปรากฏในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่ 1300 องศาเซลเซียส และพัฒนามาเป็นเฟสหลักในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่ 1500 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ยังคงพบคาร์บอนและโบรอนออกไซด์ปริมาณน้อยหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ในการนี้ S. Avcioglu และคณะ^[5] ได้อธิบายว่า การมีพันธะ B-O-C ในโครงสร้างเจลที่เตรียมขึ้นนี้ ทำให้โบรอนและคาร์บอนในระบบทำ

ปฏิกิริยาเกิดเป็นโบรอนคาร์ไบด์ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีโบรอนคาร์ไบด์ในองค์ประกอบเฟสที่อุณหภูมิต่ำกว่าระดับ 1300 องศาเซลเซียส

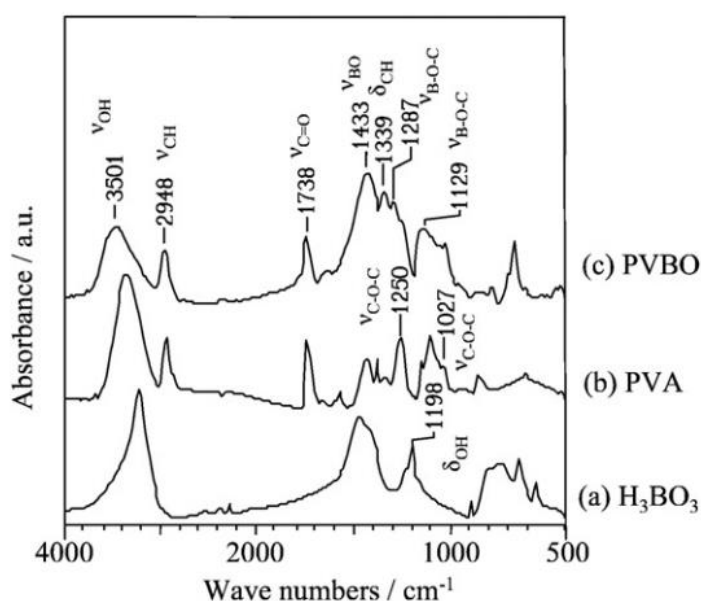


รูปที่ 2.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันในเจลที่เตรียมได้จากงานวิจัยของ S. Avcioglu และคณะ^[5]



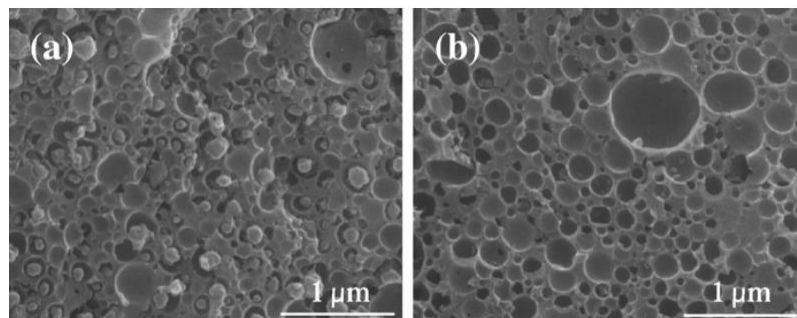
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบเฟสผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1300 และ 1500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในงานวิจัยของ S. Avcioglu และคณะ^[5]

I. Yanase และคณะ^[6] ได้เตรียมสารตั้งต้น ได้แก่ พอลิไวนิลบอเรต (PVBO) ซึ่งมีลักษณะเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดบอริก เมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน พบพันธะ B-O-C เกิดขึ้นใน PVBO ที่เตรียมได้ (รูปที่ 2.6) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดบอริกระหว่างการเตรียมสารตั้งต้น หลังจากนั้นนำ PVBO ผ่านการอบ บด แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 450-700 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1100 - 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในก๊าซอาร์กอน (อัตราการไหลก๊าซ 200 มิลลิลิตรต่อนาที) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



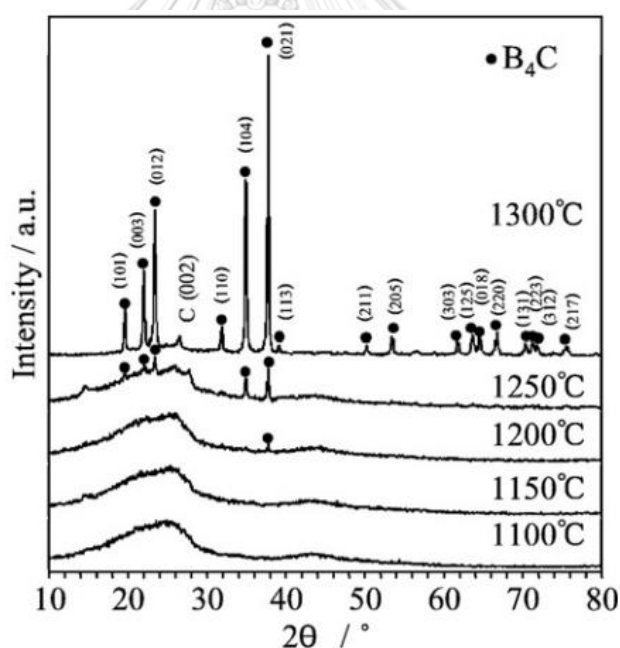
รูปที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันของ (a) กรดบอริก (b) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ (c) PVBO ในงานวิจัยของ I. Yanase และคณะ^[6]

รูปที่ 2.7 (a) แสดงโครงสร้างจุลภาคของเจล PVBO ที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ หลังผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากการตรวจสอบพบว่าอนุภาคขนาดซับไมครอนที่กระจายในรูพรุนคือ โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ซึ่งเมื่อนำสารจากการแคลไซน์นี้ไปชะล้างด้วยน้ำร้อน โบรอนออกไซด์จะดูดซับน้ำเปลี่ยนเป็นกรดบอริกและถูกขจัดออกไปจากโครงสร้าง ตามรูปที่ 2.7 (b)



รูปที่ 2.7 (a) ผิวของเจล PVBO ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และ (b) ภายหลังการขจัดโบรอนออกไซด์^[6]

จากการตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 1100 จนถึง 1300 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2.8) พบว่า เฟสโบรอนคาร์ไบด์เกิดขึ้นอย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้ ได้กล่าวถึงพันธะ B-O-C ในเจล PVBO ว่ามีส่วนทำให้การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ

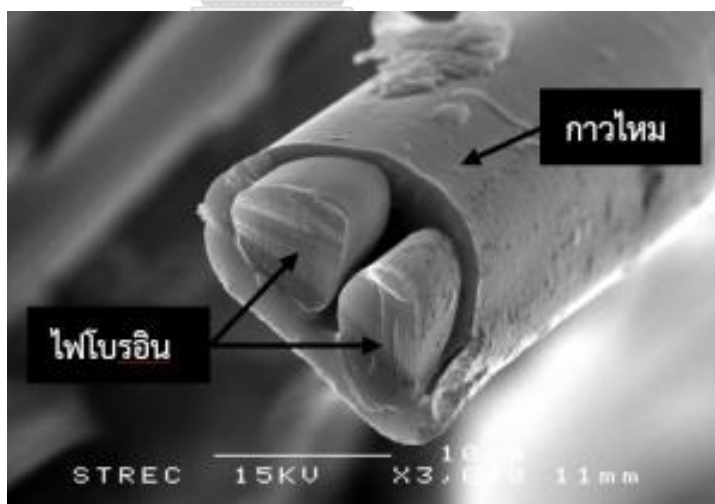


รูปที่ 2.8 องค์ประกอบเฟสของเจล PVBO ที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส และสังเคราะห์ที่ 1100-1300 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยของ I. Yanase และคณะ^[6]

ในปัจจุบัน บทความวิชาการที่รายงานการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่จะดำเนินการศึกษาอยู่ในช่วง 1300-1500 องศาเซลเซียส โดยมีการนำวัสดุดิบที่หลากหลายมาใช้ในการสังเคราะห์ ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวเหนียว^[7] น้ำตาลซูโคส^[8] ว่านหางจระเข้^[9] และฝ้าย^[10] เป็นต้น

2.3 การนำรังไหมมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์โพรตีนคาร์ไบด์

รังไหมหรือเส้นไหมเป็นเส้นใยโปรตีนจากธรรมชาติที่ได้จากการเลี้ยงหนอนไหม โดยผลิตได้จากแมลงในอันดับ (Order) *Lepidopteran* วงศ์ (Family) *Bombycidae* ไหมบ้าน (Mulberry silk) และ วงศ์ (Family) *Saturniidae* ไหมป่า (Non-mulberry หรือ Wild silk) วงจรชีวิตของไหมสามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะ คือ ระยะไข่ ระยะตัวหนอน ระยะดักแด้ และระยะผีเสื้อ เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของรังไหม พบว่ารังไหมประกอบไปด้วยเส้นไหมที่มีความแข็งแรงสูงและยืดหยุ่นดี (ความแข็งแรง 4.8 จิกะปาสคาล) โครงสร้างของเส้นไหมแต่ละเส้นประกอบด้วยเส้นใยขนาดเล็ก 2 เส้น รวมเรียกว่า brave แต่ละเส้นเรียกว่า brin เส้นใยสองเส้นนี้วางตัวขนานกันแต่ไม่ชิดติดกัน ตัวเส้นใยคือโปรตีนชนิด ไฟโบรอิน (fibroin) ซึ่งมีโครงสร้างแบบผลึกและมีสมบัติไม่ละลายน้ำ ส่วนที่ปกคลุมเส้นใยทั้งสองเป็นโปรตีนอีกชนิดที่เรียกว่า เซรีซิน (sericin) หรือกาวไหม โปรตีนชนิดนี้มีโครงสร้างอสัณฐาน^[11] และสามารถละลายในน้ำร้อน รูปที่ 2.9 เป็นโครงสร้างจุลภาคแสดงภาคตัดขวางของเส้นไหม โดยทั่วไป เส้นไหมจะมีขนาดอยู่ในช่วง 10-25 ไมครอน ขนาดของเส้นไหมมีความแตกต่างกันตามชนิดของหนอนไหมและตามตำแหน่งในรังไหม เส้นไหมที่อยู่บริเวณชั้นนอกจะมีความละเอียดกว่าบริเวณตอนกลาง ในขณะที่เส้นไหมชั้นด้านในจะมีความเล็กละเอียดที่สุด



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของเส้นไหม^[12]

2.3.1 โครงสร้างไฟโบรอิน

ไฟโบรอินคือ เส้นใยโปรตีนที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วน ได้แก่

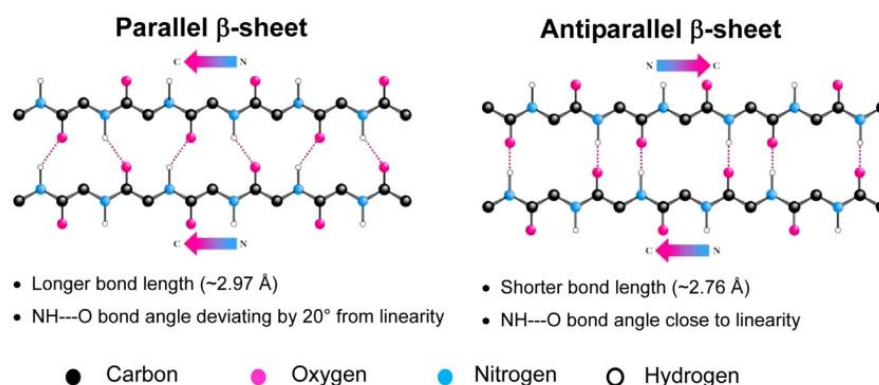
1. สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (heavy chain) ประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด ได้แก่ ไกลซีน อะลานีนและเซอรัลีน

2. สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (light chain) ประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิด ลิวซีน ไอโซลิวซีน และวาเลีน

3. โกลโคโปรตีน P25 ประกอบด้วย พอลิเปปไทด์และโอลิโกแซ็กคาไรด์

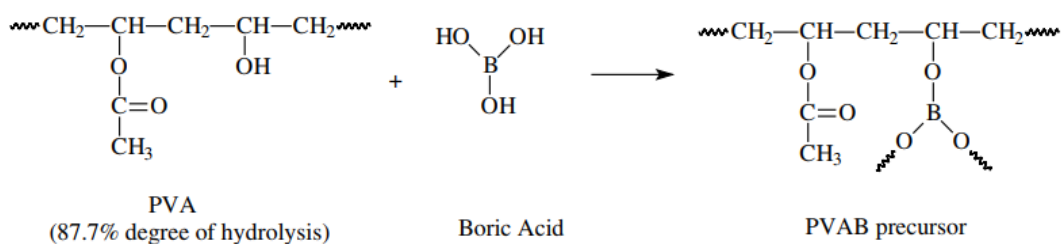
สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบพลิก ส่วนสายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีโครงสร้างประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่แสดงประจุ สายโซ่โปรตีนทั้งสองส่วนนี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ โดยโกลโคโปรตีน P25 จะทำหน้าที่เชื่อมสายโซ่ทั้งสองเข้าด้วยกัน อัตราส่วนระหว่างสายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูง สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำและโกลโคโปรตีน P25 มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 6 : 6 : 1 โดยโมล^[13]

เราสามารถจำแนกโครงสร้างของเส้นไหมได้ 3 โครงสร้างได้แก่ 1) โครงสร้าง β -sheet 2) โครงสร้าง α -helix โดย 2 โครงสร้างนี้จะอยู่ในส่วนที่แสดงความเป็นผลึกของเส้นไหมและ 3) random coil จะอยู่ในส่วนที่แสดงความเป็นอสัณฐาน ในส่วนของโครงสร้าง β -sheet จะมีสายโซ่เชื่อมโยงกันระหว่างหมู่อะมิโนและหมู่คาร์บอกซิลด้วยพันธะไฮโดรเจนดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การจัดเรียงตัวของโครงสร้าง β -sheet แบบขนานและไม่ขนาน ในไฟโบรอิน^[13]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงอาศัยพันธะดังกล่าวในการเชื่อมโยงโบรอนเข้าไปยังสายโซ่ของไฟโบรอินโดยจุ่มแซ่รังไหมในสารละลายกรดบอริก เพื่อเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโบรอนและคาร์บอนในโครงสร้างของไฟโบรอิน ดังเช่น P.M. Barros และคณะ^[14] ได้ทดลองและเสนอแบบจำลองการเกิดพันธะ B-O-C ของสารตั้งต้นผสมระหว่าง พอลิไวนิลอะลาไมนและกรดบอริก ดังรูปที่ 2.11 เมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันในสารผสมตั้งต้นได้รับยืนยันการเกิดพันธะ B-O-C ที่เลขคลื่น 1030 cm^{-1}



รูปที่ 2.11 แบบจำลองโครงสร้างของสารผสมตั้งต้นพอลิไวนิลบอเรต^[14]

2.3.2 การนำรังไหมมาใช้ประโยชน์

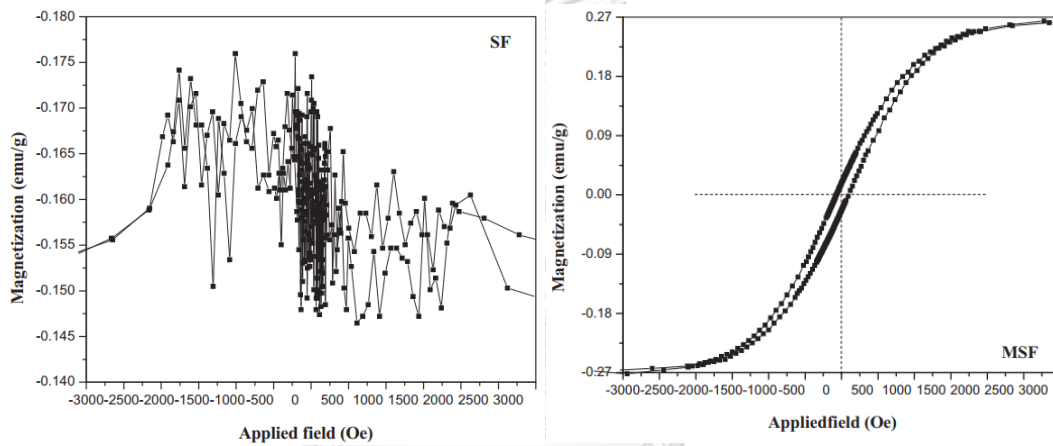
เป็นที่ทราบกันโดยแพร่หลายว่า เส้นไหมจากรังไหมนิยมถูกนำทอเป็นผ้าไหมสำหรับสวมใส่ เริ่มจากการนำรังไหมมาต้มในน้ำร้อนเพื่อให้กาวไหมละลายออกไปจากโครงสร้าง จากนั้นนำมาต้มในน้ำซี้้ไถ่เพื่อกำจัดไขมันที่ยังหลงเหลืออยู่ ได้เป็นเส้นไหมที่มีสีขาวนวลก่อนนำเข้าสู่กระบวนการย้อมสี และถักทอ นอกจากนี้ ยังมีการนำรังไหมมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเวชสำอาง เนื่องจากมีส่วนประกอบเป็นกรดอะมิโนหลากหลายชนิดและมีสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ ผิวพรรณ ตัวอย่างที่พบเห็นกันในสื่อโฆษณา คือการนำรังไหมมาใช้ขัดผิว

ในทางการแพทย์ ทิพวรรณ ศิริเทียนธง^[15] ได้สกัดเซรีซินจากรังไหมและนำมาเป็นส่วนผสมในผ้าพันแผล ทดลองใช้ปิดบาดแผลในสัตว์ทดลอง ผลปรากฏเป็นที่น่าพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับสัตว์ทดลองที่ปิดแผลด้วยผ้าพันแผลชุดควบคุม (ไม่มีเซรีซินเป็นส่วนประกอบ) บาดแผลของสัตว์ทดลองที่ปิดแผลด้วยผ้าพันแผล บาดแผลเล็กลงเมื่อใช้เวลาในการปิดแผลเท่ากัน เนื่องจากรังไหมมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสัตว์ อีกทั้งยังมีคอลลาเจนเป็นส่วนประกอบจึงช่วยสมานแผลและสร้างผิวใหม่ได้ดี

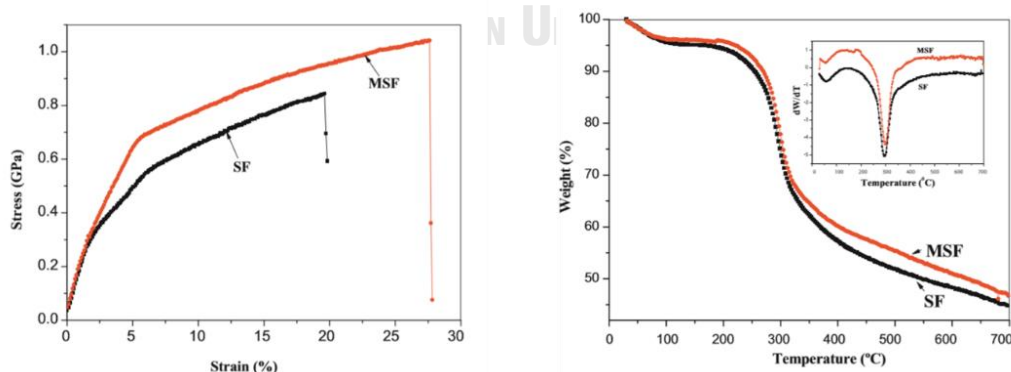
นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อเพิ่มสมบัติพิเศษให้กับเส้นไหม เช่น เส้นไหมที่สามารถจัดกลิ่นอับ เส้นไหมที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก เส้นไหมที่มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง เป็นต้น J.T. Wang และคณะ^[16] ได้รายงานการพัฒนาสมบัติทางแม่เหล็กในเส้นไหม โดยใช้วิธีการฉีดพ่นอนุภาคนาโน Fe_3O_4 ลงบนใบไหมอ่อน จากนั้นนำมาเสริมอาหารแก่หนอนไหมจนครบวงจรชีวิต เส้นไหมที่ผลิตได้จากหนอนไหมในการทดลองได้ถูกนำมาตรวจสอบสมบัติและคุณลักษณะ พบว่าเส้นไหมมีสีที่เปลี่ยนไปและสมบัติความเป็นแม่เหล็กเปลี่ยนไปจากเดิม (รูปที่ 2.12 และ 2.13) นอกจากนี้ยังทนต่อความร้อนและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (รูปที่ 2.14) เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของเส้นไหม จะเห็นว่า จากเดิมที่เส้นไหมมีผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อหนอนไหม ได้รับการเสริมอาหารด้วย Fe_3O_4 ผิวของเส้นไหมจะมีลักษณะเหมือนมือนูภาคมาเกาะที่ผิว (รูปที่ 2.15)



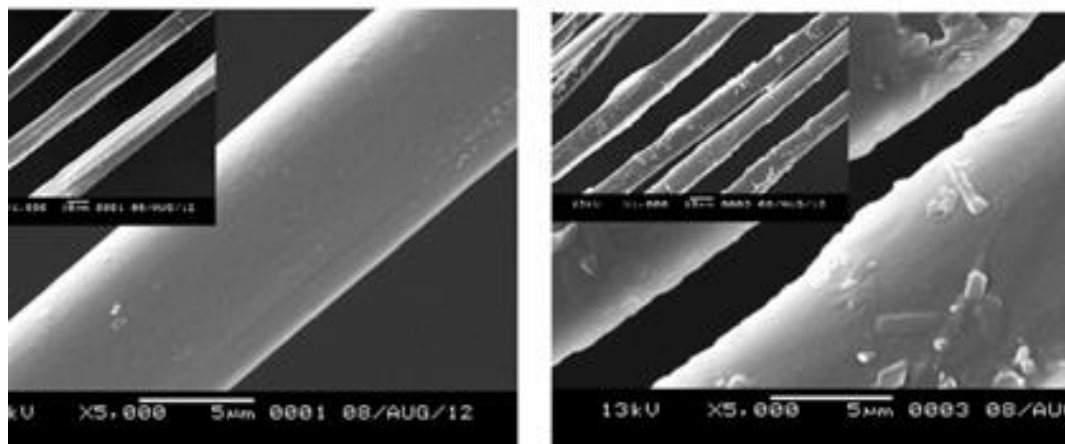
รูปที่ 2.12 รังไหมที่ได้จากการเลี้ยงหนอนไหมด้วยใบหม่อนปกติ (ซ้าย) และรังไหมที่ได้จากการเลี้ยงหนอนไหมด้วยใบหม่อนเสริมอนุภาคนาโน Fe_3O_4 [16]



รูปที่ 2.13 สมบัติความเป็นแม่เหล็กของเส้นไหมปกติ (ซ้าย) และเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยอนุภาคนาโน Fe_3O_4 (ขวา) [16]

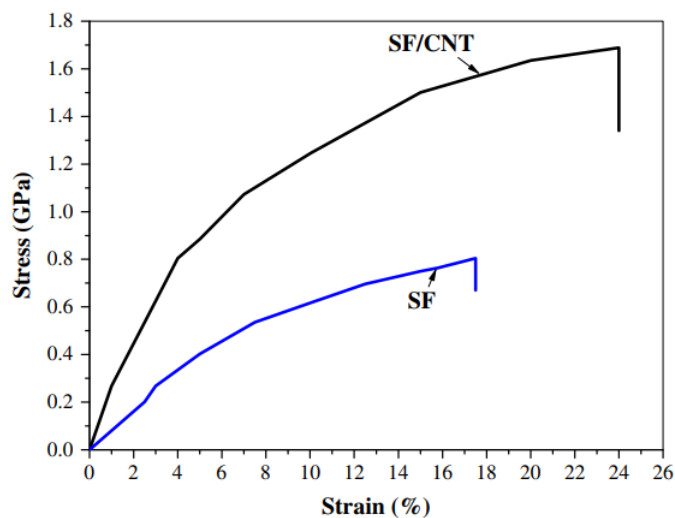


รูปที่ 2.14 (ซ้าย) กราฟแสดงความแข็งแรง และ (ขวา) น้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบระหว่างเส้นไหมปกติ (SF) และเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วย Fe_3O_4 [16]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของ (ซ้าย) เส้นไหมปกติ และ (ขวา) เส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วย Fe_3O_4 [16]

ในเวลาต่อมา J.T. Wang และคณะ^[17] ได้ต่อยอดงานวิจัยในการพัฒนาความแข็งแรงให้กับเส้นไหม ด้วยการนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาเสริมอาหารแก่หนอนไหม เริ่มจากผสมคาร์บอนนาโนทิวป์ 0.5 กรัม lignosulfonate (LGS) 5 กรัม และบัพเฟอร์ 200 มิลลิลิตร เข้าด้วยกันในอ่างอัลตราโซนิก จากนั้นผ่านกระบวนการหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกของเหลวออก นำตะกอนมาอบและนำไปผสมกับใบหม่อนเพื่อเสริมอาหารให้แก่หนอนไหม จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของรังไหมที่ผลิตได้ พบว่า มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงกว่ารังไหมจากหนอนไหมที่ไม่ได้รับการเสริมอาหาร (รูปที่ 2.16) และเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 2.17) พบว่า จากเดิมที่เส้นไหมมีภาคตัดขวางรูปทรงสามเหลี่ยม เมื่อได้รับการเสริมอาหารด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ ภาคตัดขวางของเส้นไหมเปลี่ยนแปลงเป็นรูปร่างวงรี นอกจากนี้ ยังพบว่าเส้นไหมจากหนอนไหมที่ถูกเสริมอาหารด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์มีสมบัติทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกด้วย (ตารางที่ 2.1)



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความแข็งแรงของเส้นไหมปกติ (SF) เปรียบเทียบกับเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยนาโนทิวป์ (SF/CNT)^[17]




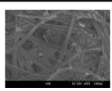
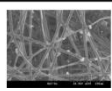
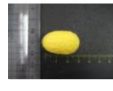
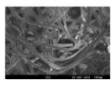
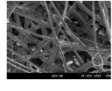

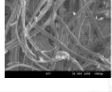
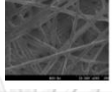
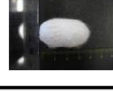
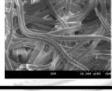
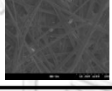
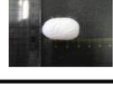
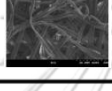
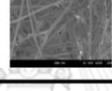
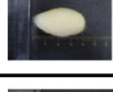
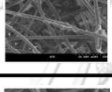
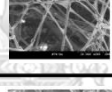
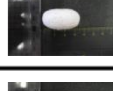
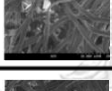
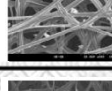

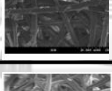
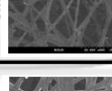


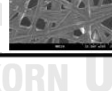
รูปที่ 2.17 (ซ้าย) ภาพตัดขวางของเส้นไหมปกติ และ(ขวา) เส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์^[17]

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของเส้นไหมปกติ (SF) เปรียบเทียบกับเส้นไหมจากหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วยนาโนทิวป์ (SF/CNT)

ตัวอย่าง	ค่ามอดูลัส (GPa)	ความเค้น (GPa)	ความเครียด (%)	ความต้านทานทางไฟฟ้า (Ω)
SF	0.14±0.05	0.80±0.3	17.5±0.3	211±10
SF/CNT	0.38±0.05	1.69±0.3	24.0±0.3	171±10

เป็นที่ทราบกันดีว่าลักษณะทางกายภาพของวัสดุมีอิทธิพลส่งผลต่อสมบัติของวัสดุนั้น ในการนี้ D.E. Chung และคณะ^[18] มีความสนใจศึกษาความแตกต่างทางกายภาพของรังไหมและเส้นไหมจากหนอนไหมสายพันธุ์ต่างๆ และได้สรุปในตารางที่ 2.2 จะเห็นว่า รังไหมและเส้นไหมส่วนใหญ่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันไม่มากนัก

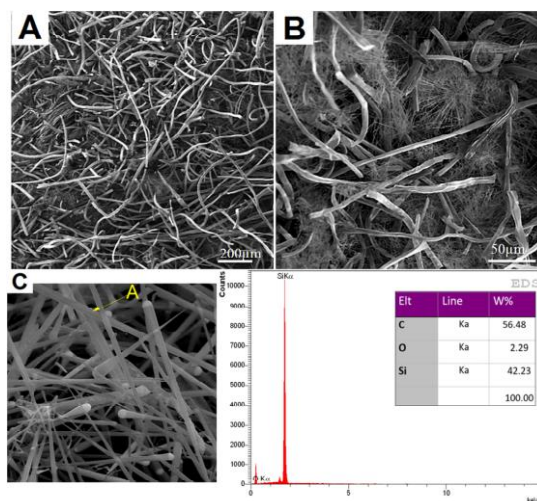
ตารางที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของรังไหมและเส้นไหมที่สร้างจากหนอนไหม 9 สายพันธุ์

สายพันธุ์	ลักษณะภายนอก	โครงสร้างจุลภาค (200x)		เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm) (n=30)		รูปทรงแท่ง (%) (n=3)
		บริเวณผิว	ภายใน	บริเวณผิว	ภายใน	
Backokjam				30.0 \pm 3.0	14.0 \pm 2.8	67.5
Ceungwangju				25.2 \pm 3.2	20.5 \pm 1.5	68.2 \pm 1.1
Hansang II				24.4 \pm 2.8	19.7 \pm 3.7	62.1 \pm 2.1
Hongbak				27.1 \pm 2.9	22.0 \pm 2.6	62.9 \pm 3.2
Imbakgalwon				26.2 \pm 2.6	8.1 \pm 1.8	67.8 \pm 1.1
N74				14.7 \pm 3.3	11.3 \pm 2.5	85.1 \pm 0.5
SK				29.8 \pm 3.0	21.7 \pm 3.9	67.3 \pm 3.7
Wonjam 125				29.2 \pm 2.1	11.7 \pm 3.0	61.1 \pm 7.9
WonWon126				29.6 \pm 2.4	25.8 \pm 2.4	67.5 \pm 12.4

2.3.3 การนำรังไหมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ผงเซรามิก

F. Torknik และคณะ^[19] ได้ทำการทดลองสังเคราะห์ซิลิกอนคาร์ไบด์จากรังไหม เริ่มจากการล้างไหมออกจากรังไหมด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต จากนั้นนำรังไหมจุ่มแช่ในสารละลายซึ่งประกอบด้วย tetraethylorthosilicate (TEOS) : ethano (EtOH) : H₂O : acetic acid (AcOH) ในอัตราส่วน 1 : 4 : 4 : 0.025 โดยโมลาร์ และกำหนดอัตราส่วนของรังไหมต่อสารละลายเท่ากับ 2 : 1 โดยน้ำหนัก จากการตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์หลังการสังเคราะห์ที่ 1350 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน พบเพียงซิลิกาและแกรไฟต์ในผลิตภัณฑ์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการสังเคราะห์เป็น 1450 องศาเซลเซียส พบฟิสิกซิลิกอนคาร์ไบด์ปรากฏในองค์ประกอบเฟสเมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาค (รูปที่ 2.18) อนุภาคของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์มีขนาดประมาณ

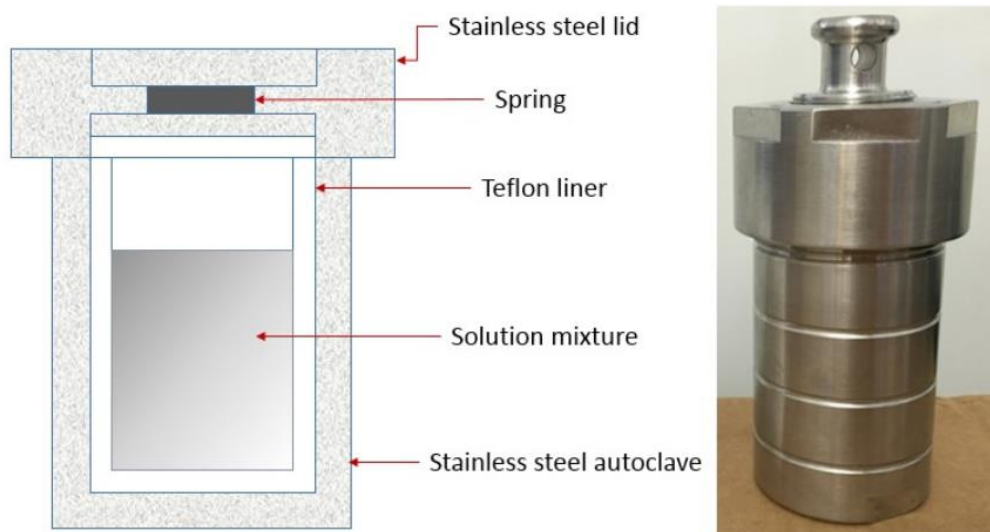
20 นาโนเมตร และมีรูปร่างเป็นแบบ flower-like needles เมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS พบ ซิลิกอน คาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งยืนยันถึงเฟสซิลิกอนคาร์ไบด์ในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.18 (A-B) โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ และ (C) ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS จากงานวิจัยของ F. Torknik และคณะ^[19]

2.4 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกหรือผงเซรามิกออกไซด์ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูงโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลจะอยู่ในช่วงตั้งแต่จุดเดือดของน้ำไปจนถึงอุณหภูมิวิกฤต (100-374 องศาเซลเซียส) และมีการกำหนดใช้ค่าความดันที่หลากหลาย ทั้งนี้ สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์สารขึ้นอยู่กับการรักษาเฟสของสารละลายเพื่อเอื้อให้เกิดการแพร่ของสปีชีส์ในระบบที่ตื้นหรือเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟส โดยอุณหภูมิและความดันที่ให้แก่ระบบจะช่วยลดพลังงานอิสระส่งผลให้เกิดเป็นเฟสที่ต้องการ ซึ่งในสภาวะที่ความดันปกติไม่สามารถทำได้ โดยทั่วไป การสังเคราะห์สารด้วยวิธีนี้จะทำใน autoclave หรือ Teflon lined- autoclave reactor แสดงดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วยกระบอกและฝาปิดที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) หรือวัสดุที่แข็งแรงทนทานต่ออุณหภูมิสูงและความดันสูง เพื่อป้องกันการรั่วไหลของไอสารเคมีที่อยู่ภายในกระบอก ภายในกระบอกเหล็กกล้าไร้สนิมจะบรรจุภาชนะรูปทรงกระบอกอยู่อีกชั้น ภาชนะนี้สัมผัสโดยตรงกับสารที่จะทำการสังเคราะห์จึงต้องมีความทนทานต่อกรด-ด่าง มักทำจากวัสดุ Teflon



รูปที่ 2.19 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล^[20]

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์สารอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น W. Xu และคณะ^[21] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมพอสิต ZrC-SiC โดยนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการเตรียมสารผสมตั้งต้น เพื่อให้สารผสมตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยเซอร์โคเนียม ซิลิกอนและกลูโคส มีความเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ จากการตรวจสอบเฟสของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เริ่มพบเฟสของคอมพอสิตที่ต้องการที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และเกิดโดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ถือได้ว่าเป็นการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในระดับนาโน (100 นาโนเมตร) ซึ่งส่งผลดีต่อการนำไปขึ้นรูปและเผาผนึกเพื่อผลิตวัสดุความหนาแน่นสูงที่อุณหภูมิต่ำ

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำรังไหมมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์โดยจะทำการจุ่มแช่รังไหมในสารละลายที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ ปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ รวมถึงการนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาร่วมใช้ในการสังเคราะห์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้ที่มีต่อคุณลักษณะของผงที่สังเคราะห์ได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะสังเคราะห์ผงโบรอนคาร์ไบด์จากรังไหม แผนการดำเนินงานขั้นต้น ได้แก่การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม โดยผู้วิจัยคาดหวังว่ารังไหมที่ผลิตได้จากหนอนไหมจะมีองค์ประกอบของโบรอนและคาร์บอน เหมาะสมต่อการเป็นวัสดุตั้งต้นในการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตาม ระหว่างการดำเนินงานวิจัยได้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการเตรียมสารตั้งต้น จากการเสริมอาหารแก่หนอนไหมมาเป็นการนำรังไหมจุ่มแช่ในสารละลายที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ยังมีความพยายามนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงในรายละเอียดได้ดังนี้

3.1 การเตรียมสารตั้งต้น

3.1.1 การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม

1. เตรียมสารละลายที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 3% 5% และ 10% โดยน้ำหนักจากบอแรกซ์ กรดบอริก และไตรเมททิลบอเรต โดยการนำบอแรกซ์หรือกรดบอริก 4.5 7.5 และ 15 กรัม และไตรเมททิลบอเรต 4.5 7.5 และ 15 มิลลิลิตร มาผสมในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 150 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.1 ชื่อสูตรสารละลายที่เตรียมเพื่อใช้เสริมอาหารแก่หนอนไหมในงานวิจัยนี้

แหล่งโบรอน ความเข้มข้น (%โดยน้ำหนัก)	บอแรกซ์	กรดบอริก	ไตรเมททิลบอเรต
3%	B3	BA3	TMB3
5%	B5	BA5	TMB5
10%	B10	BA10	TMB10

2. ตัดใบหม่อนให้มีขนาด 1 x 1 ตารางเซนติเมตร และนำสารละลายที่เตรียมได้ ปริมาณ 5 7.5 และ 10 มิลลิลิตร ฉีดพ่นลงบนใบหม่อน 5 10 และ 20 กรัม เพื่อเสริมอาหารให้แก่หนอนไหม วัย 1 2-3 และ 4-5 ตามลำดับ

3. ทำการเลี้ยงหนอนใหม่ตั้งแต่ระยะเป็นไข่จนกระทั่งหนอนใหม่เข้าสู่ระยะที่ 5 พร้อมทั้งจะเป็นดักด้ว โดยให้ใบหม่อนที่เตรียมจากขั้นตอนข้างต้นเป็นอาหารแก่หนอนใหม่ (สถานที่เลี้ยงหนอนใหม่ : โรงเลี้ยงที่ 4 ศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติฯ จังหวัดศรีสะเกษ)

4. แยกหนอนใหม่ที่สุดพร้อมเข้าสู่ภาวะดักด้ว นำมาเข้าจ่อ ทิ้งไว้เป็นเวลา 5-7 วัน จึงใช้มีดโกนตัดรังใหม่เพื่อแยกดักด้วออกจากรังใหม่

5. ชั่งน้ำหนักรังใหม่ 1 กรัม ตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร นำมาต้มในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.02 โมล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อล้างกาวยาไหมออกจากรังใหม่

6. หลังจากการต้ม ล้างรังใหม่ด้วยน้ำปราศจากไอออน กรองแยกน้ำออกแล้วนำรังใหม่ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

7. บรรจุรังใหม่ในครุชีเบิลอะลูมินา เฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดและคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 74 ไมครอน

3.1.2 การจุ่มแช่รังใหม่ในสารละลายกรดบอริก

1. ชั่งน้ำหนักรังใหม่ 1 กรัม ตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร นำมาต้มในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.02 โมล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อล้างกาวยาไหมออกจากรังใหม่

2. ล้างรังใหม่ด้วยน้ำปราศจากไอออน กรองแยกน้ำออกแล้วนำรังใหม่ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. เตรียมสารละลายกรดบอริก ใช้กรดบอริก 2-4 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร

4. นำรังใหม่ที่เตรียมได้จากข้อสอง จุ่มแช่ในสารละลายกรดบอริกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้องและ 80 องศาเซลเซียส

5. หลังจากขั้นตอนการจุ่มแช่ นำรังใหม่ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6. บรรจุรังใหม่ในครุชีเบิลอะลูมินา เฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดและคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 74 ไมครอน

3.1.3 การนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักผงใหม่ 1 กรัม ตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร นำมาต้มในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.02 โมล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อล้างภาชนะออกจากผงใหม่
2. ล้างผงใหม่ด้วยน้ำปราศจากไอออน กรองแยกน้ำออกแล้วนำผงใหม่ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เตรียมสารละลายกรดบอริก ใช้กรดบอริก 2-4 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร
4. บรรจุผงใหม่ลงในกระบอกเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผนังด้านในบุด้วยวัสดุ Teflon เติมสารละลายกรดบอริกที่เตรียมได้จากข้อสามลงในกระบอก ปิดฝาจนแน่น จากนั้นนำเข้าตู้อบอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5. นำสารที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลในข้อสี่ มาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2 การสังเคราะห์ผงโบรอนคาร์ไบด์

1. นำสารตั้งต้นบรรจุในครุซีเปิดกราไฟต์ ทำการสังเคราะห์สารใน tube furnace ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 1350-1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง กำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 2 ลิตรต่อนาที
2. นำสารที่ได้จากการสังเคราะห์มาบดและคัดขนาด โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 74 ไมครอน

3.3 การตรวจสอบคุณลักษณะ

3.3.1 องค์ประกอบเฟส

องค์ประกอบเฟสของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ สามารถตรวจสอบโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD: Bruker, D8 Advance, Germany) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง Cu-K α อนุ ความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงรังสีเอ็กซ์ การเตรียมตัวอย่างทำโดยบดผงตัวอย่างด้วยมือในโกร่งอะเกต จากนั้นบรรจุผงที่บดในแผ่นเตรียมตัวอย่างและนำไปวางตรงตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ผลในช่วงมุม 2 theta เท่ากับ 5 องศา ถึง 80 องศา อัตราเร็วเชิงมุม 0.010 องศาต่อนาที ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ โดยการใช้โปรแกรม TOPAS software และหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกและความเป็นอสัณฐานโดยใช้โปรแกรม Rietveld refinement method using TOPAS version 2.1 software

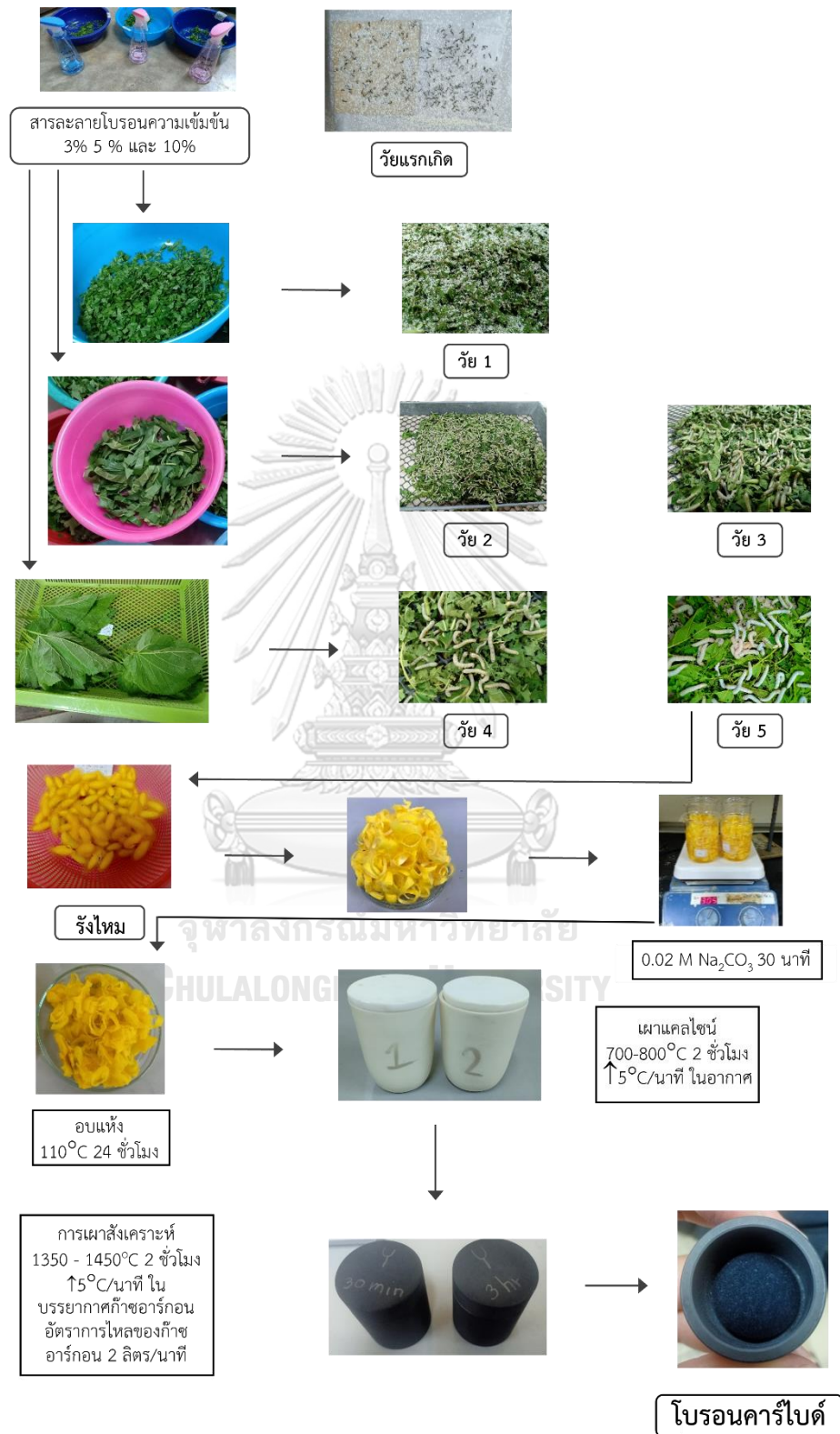
3.3.2 หมู่ฟังก์ชัน

การตรวจสอบพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันของสาร สามารถทำได้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส-ฟอรั่มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์โหมด ATR (FTIR: Nicolet, model Impact 400, USA) โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่จะทดสอบไปวางในเครื่องตรงตำแหน่งผลึกเพชรและวิเคราะห์ผลการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 4000 cm^{-1} ด้วยโปรแกรม Thermo Scientific TM OMNICTM Series Software

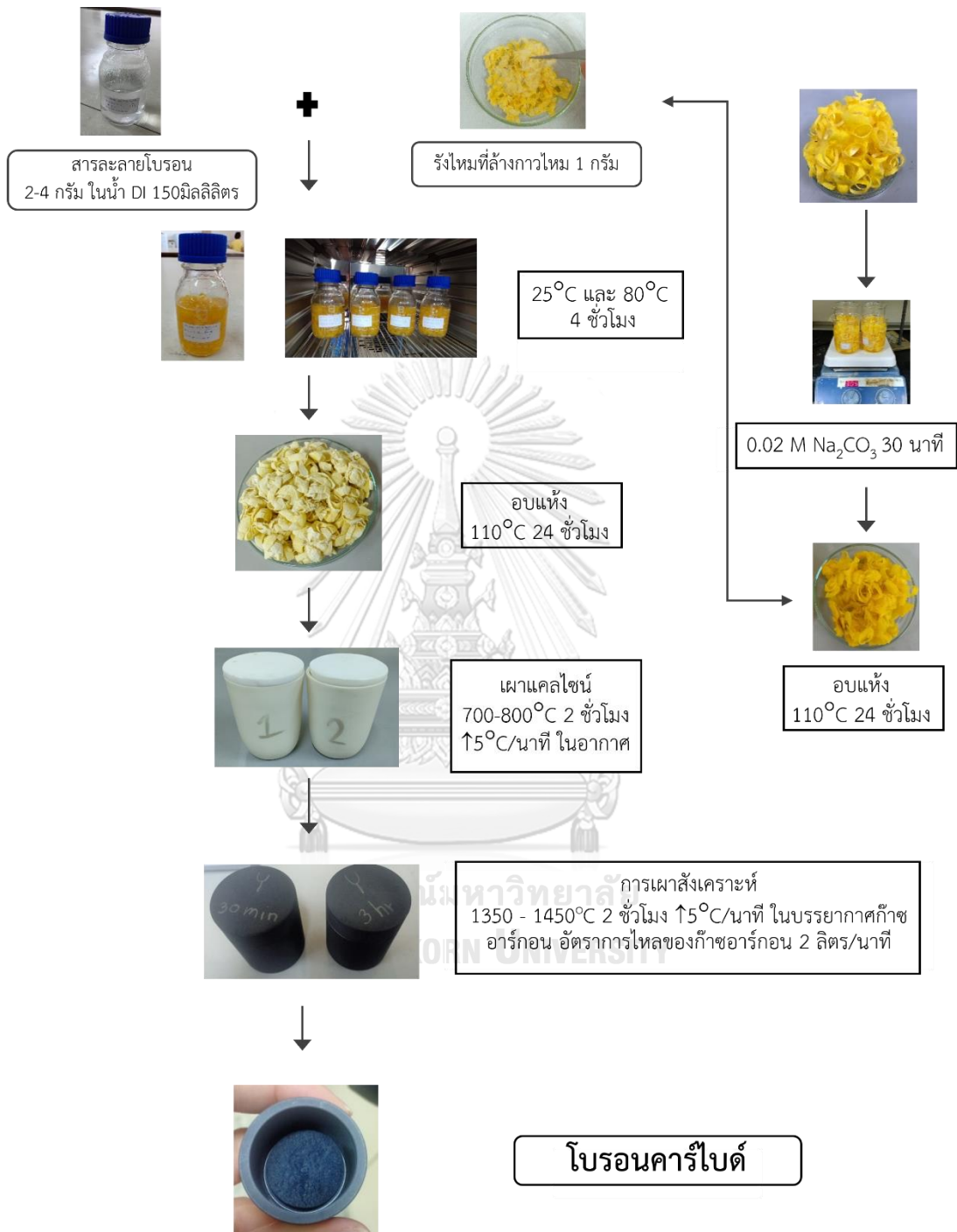
3.3.3 โครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: JOEL, JSM-6480LV, Japan) ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทำโดยการโรยผงตัวอย่างที่จะตรวจสอบลงบนแผ่นทองเหลืองที่ปิดทับผิวหน้าด้วยแผ่นคาร์บอน นำไปผ่านกระบวนการเคลือบทอง (gold sputtering) โดยใช้กระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 200 วินาที เพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ จากนั้นทำการสแกนตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างที่กำลังขยายต่างๆ กำหนดความต่างศักย์เท่ากับ 15 กิโลโวลต์

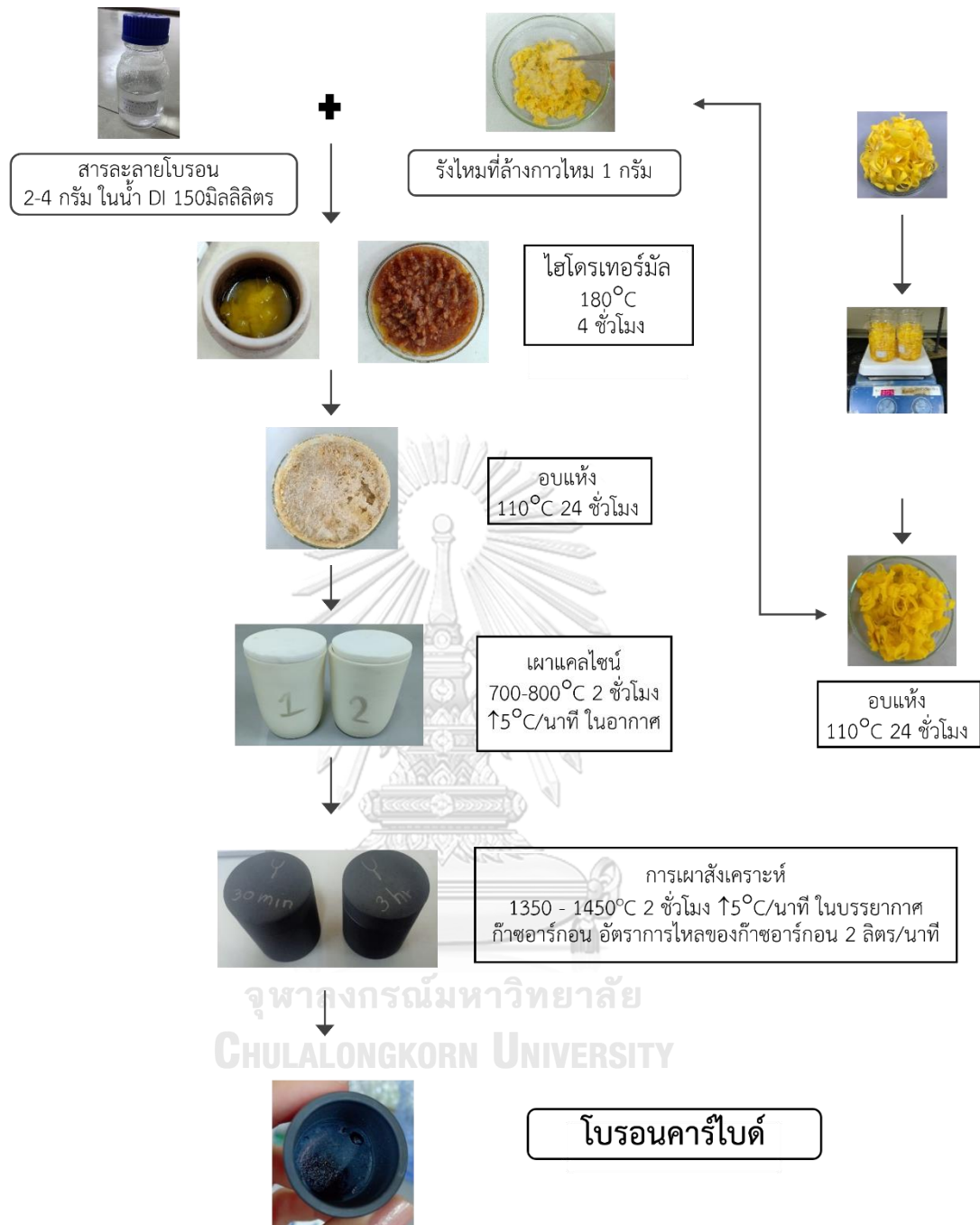
แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม



รูปที่ 3.2 การจุ่มแซ่ริงไหมในสารละลายกรดบอริก



รูปที่ 3.3 การนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์

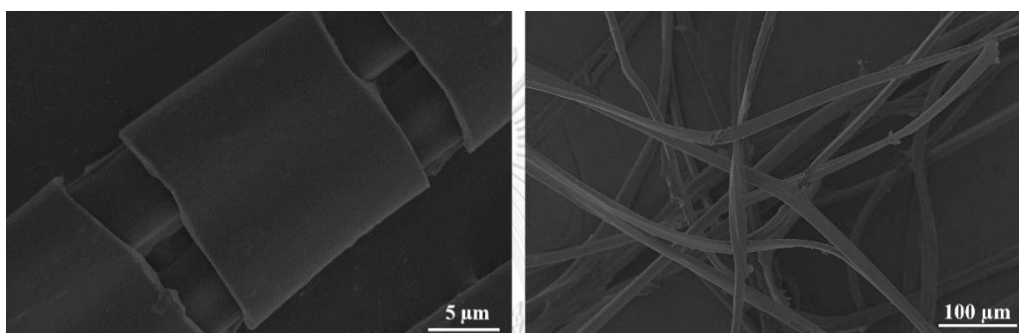
บทที่ 4

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

4.1 การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบแก่หนอนไหม

4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของเส้นไหม

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเส้นไหมที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้ จะเห็นว่า เส้นไหมแต่ละเส้นประกอบด้วยไฟโบรอิน 2 เส้นซึ่งถูกเคลือบด้วยกาวไหมหรือเซรีซิน ทุกเส้นไหมมีขนาดใกล้เคียงกัน คือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-20 ไมครอน

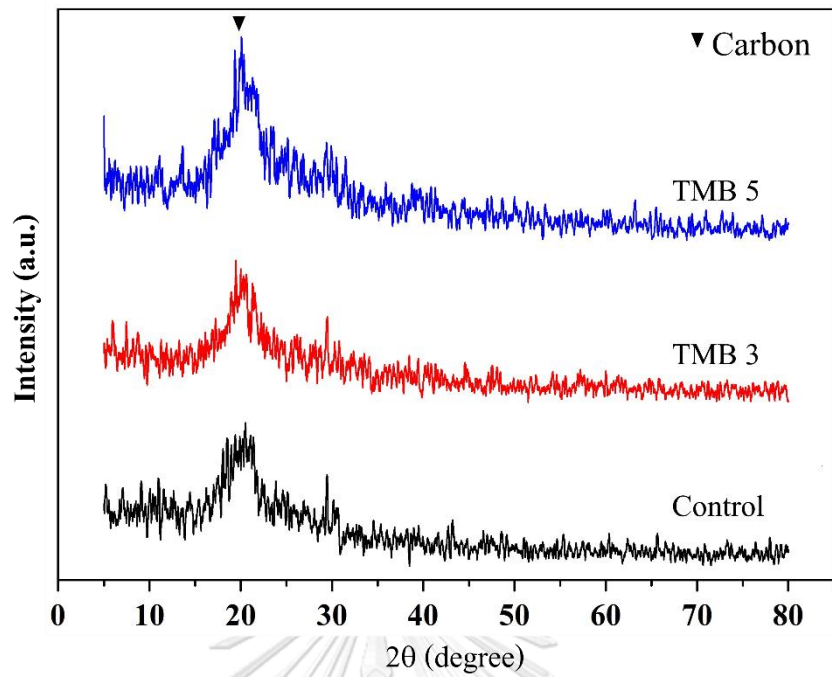


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของเส้นไหมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

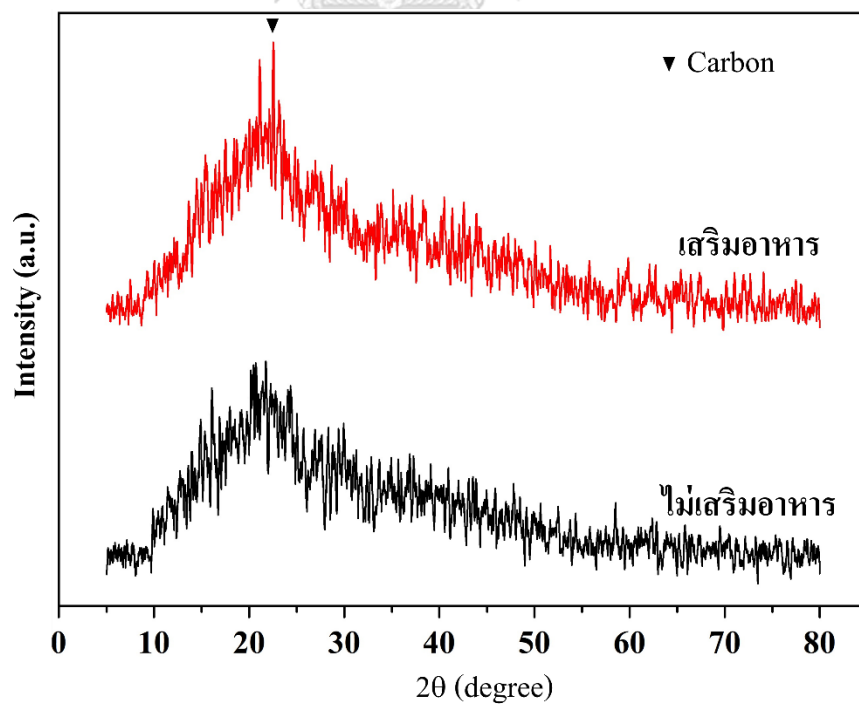
4.1.2 องค์ประกอบเฟสของรังไหม

ในการเลี้ยงหนอนไหมโดยเสริมอาหารแก่หนอนไหม ด้วยสารละลายบอริก โบแรกซ์หรือ ไตรเมทิลบอเรต ความเข้มข้น 3% 5% และ 10% พบว่า มีเพียงหนอนไหมที่เสริมอาหารด้วย สารละลายไตรเมทิลบอเรต ความเข้มข้น 3% และ 5% ที่สามารถรอดชีวิตมาจนถึงระยะที่ 5 หนอนไหมจากทั้งสองสภาวะนี้และสภาวะควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมอาหารได้สร้างรังไหมในเวลา

ต่อมา องค์ประกอบเฟสของรังไหมที่หนอนไหมผลิตขึ้นและมูลของหนอนไหม แสดงในรูปที่ 4.2 และ

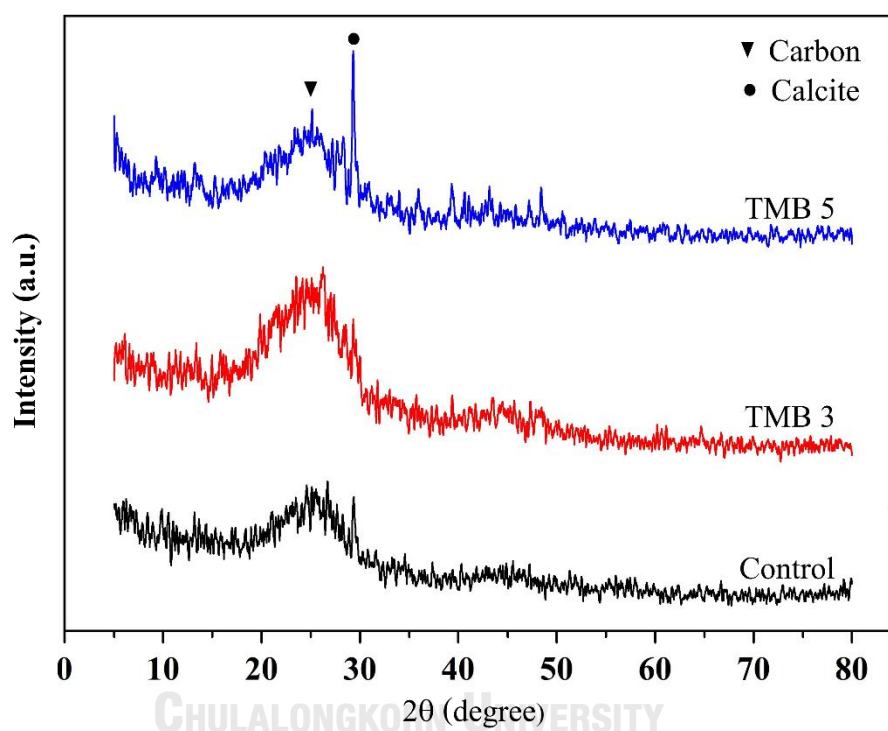


รูปที่ 4.2 องค์ประกอบเฟสของรังไหมจากการเสริมอาหารด้วยสารละลายไตรเมทิลบอเรต ความเข้มข้น 3% (TMB3) และ 5% (TMB5) เปรียบเทียบกับรังไหมจากหนอนไหมที่ไม่ได้รับการเสริมอาหาร



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบเฟสของมูลหนอนไหมที่ไม่ได้รับการเสริมอาหารและที่เสริมอาหารด้วยสารละลายกรดบอริก 10%

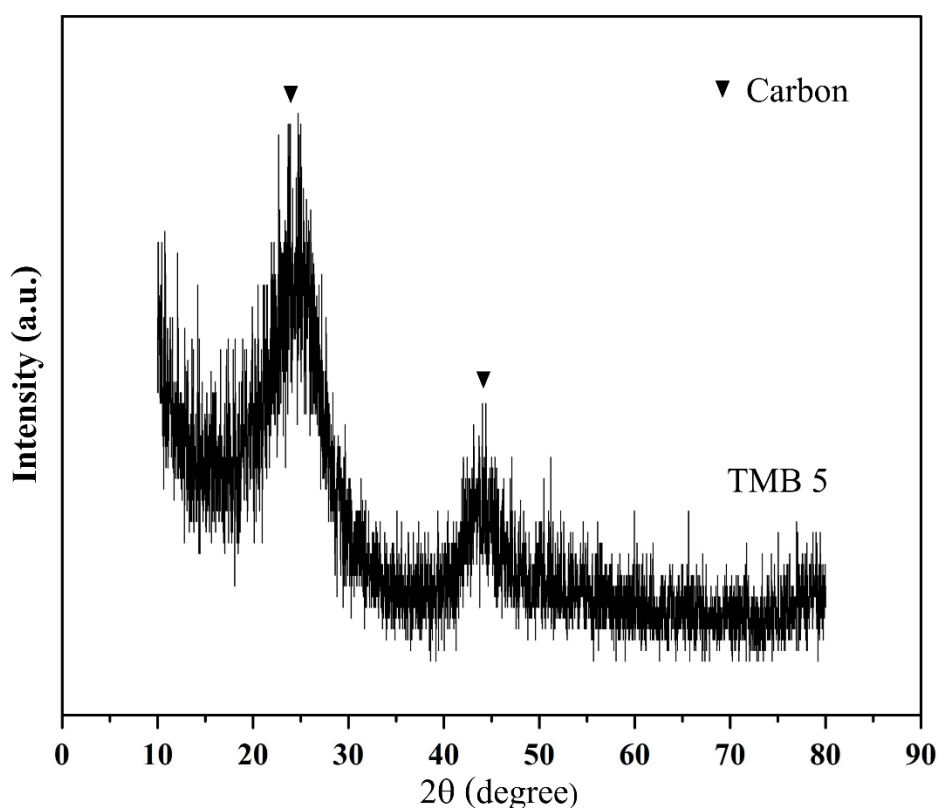
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า องค์ประกอบเฟสของรังไหมจาก 3 สภาวะ มีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก คือเส้นกราฟแสดงความเป็นออสัณฐาน มียอดเนินอยู่ในช่วง 2θ เท่ากับ 19-21 องศา และไม่ปรากฏพีคของโบรอนหรือสารประกอบโบรอนในองค์ประกอบเฟส เมื่อพิจารณาองค์ประกอบเฟสของมูลหนอนไหม (รูปที่ 4.3) เส้นกราฟมีลักษณะใกล้เคียงกับผลองค์ประกอบเฟสรังไหม คือโครงสร้างหลักเป็นออสัณฐานและปรากฏเพียงพีคของคาร์บอน (C : JCPDS 20-0258) ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าโบรอนที่เสริมในอาหารแก่หนอนไหมมีปริมาณน้อยเกินไป หรืออาจมีการสะสมของโบรอนในร่างกายหนอนไหม



รูปที่ 4.4 องค์ประกอบเฟสของรังไหมที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อนำรังไหมมาผ่านกระบวนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อจัดสารอินทรีย์ที่ไม่ต้องการ พบว่ารังไหมที่เตรียมได้จากทั้ง 3 สภาวะ มีลักษณะคล้ายกัน คือองค์ประกอบหลักเป็นออสัณฐาน มียอดเนินอยู่บริเวณ 2θ เท่ากับ 25-26 องศา โดยในรังไหมที่เสริมอาหารด้วยสารละลายไตรเมทิลบอเรต 5% พบพีคแคลไซต์ (calcite : CaCO_3 : JCPDS 72-1937) ชัดเจนที่ 2θ เท่ากับ 29 องศา แคลไซต์ที่ปรากฏในองค์ประกอบเฟสนี้มาจากยาโรยหนอนไหมที่จำเป็นต้องใช้เพื่อป้องกันการเกิดโรคในหนอนไหม

จากผลที่รายงานข้างต้น การเสริมอาหารที่มีองค์ประกอบโบรอนให้แก่หนอนใหม่นั้นทำได้ลำบาก เนื่องจากหนอนใหม่ไม่สามารถมีชีวิตเพื่อสร้างรังใหม่ในกรณีที่ใช้โบรอนปริมาณสูงมาเสริมอาหาร และรังใหม่ที่ผลิตจากหนอนใหม่ที่รอดชีวิตเมื่อนำไปตรวจสอบก็ไม่พบโบรอนหรือสารประกอบโบรอนในองค์ประกอบเฟส นอกจากนี้ เมื่อนำรังใหม่ที่ผ่านการแคลไซน์ไปสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (รูปที่ 4.5) เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบเฟสผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ ก็ไม่พบพิกแสดงผลึกที่ชัดเจนรวมถึงโบรอนคาร์ไบด์ในระบบ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจ ปรับเปลี่ยนวิธีการนำโบรอนเข้าสู่โครงสร้างเส้นไหมจากการเสริมอาหารแก่หนอนใหม่ เป็นการจุ่มแช่รังไหมในสารละลายโบรอน



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบเฟสของรังไหม (TMB5) ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

4.2 การสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์จากรังไหมที่จุ่มแช่ในสารละลายกรดบอริก

4.2.1 การประเมินขั้นต้นเพื่อหาช่วงส่วนผสมที่เหมาะสมในการเตรียมสารตั้งต้น

ในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทดลองเตรียมสารตั้งต้นด้วยวิธีจุ่มแช่รังไหมในสารละลายกรดบอริก โดยใช้กรดบอริกปริมาณ 32 กรัม ต่อรังไหมน้ำหนัก 4 และ 6 กรัม ทำการจุ่มแช่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน พบว่าสารที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีลักษณะคล้ายเนื้อแก้วสีเข้มหลอมติดครุชชีเปิล แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



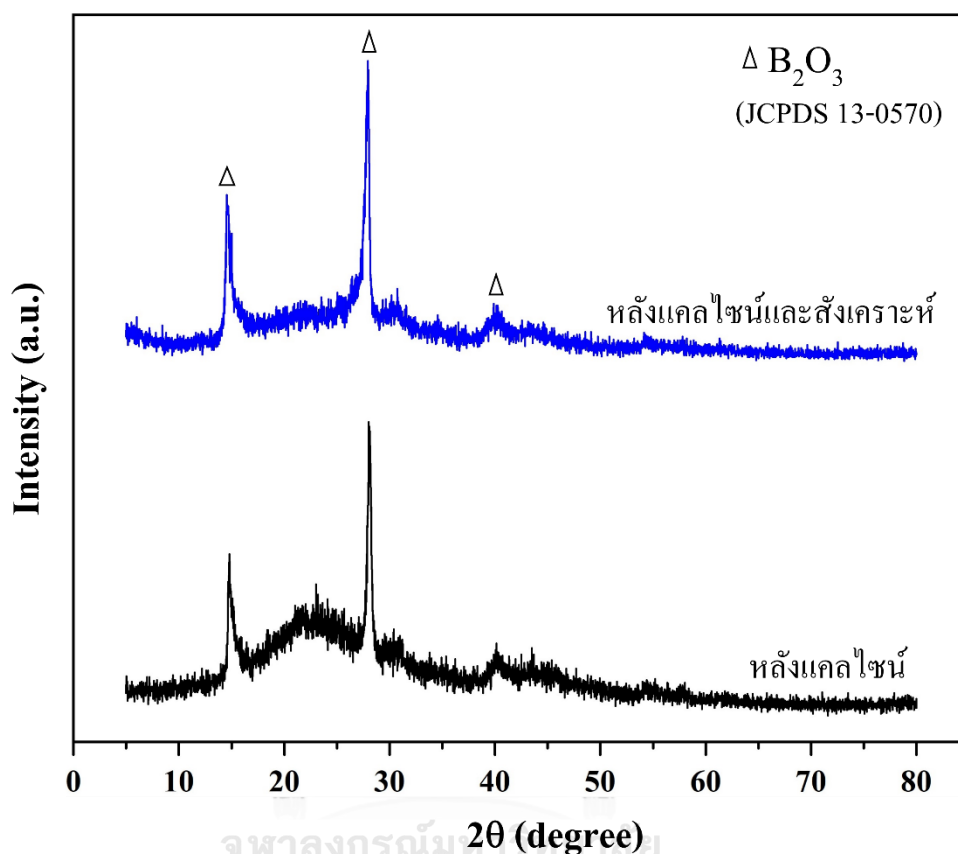
รูปที่ 4.6 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้น ด้วยการจุ่มแช่รังไหม 4 กรัม ในสารละลายกรดบอริก และผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส ภาพซ้าย-จุ่มแช่ ณ อุณหภูมิห้อง และภาพขวา-จุ่มแช่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้น ด้วยการจุ่มแช่รังไหม 6 กรัม ในสารละลายกรดบอริก และผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส ภาพซ้าย -จุ่มแช่ ณ อุณหภูมิห้อง และภาพขวา -จุ่มแช่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์หลังแคลไซน์และหลังการสังเคราะห์ พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน คือประกอบด้วยฟิสิกของผลึกโบรอนออกไซด์ (B_2O_3 : JCPDS 13-0570) ร่วมกับโครงสร้างอสัณฐาน ไม่ปรากฏโบรอนคาร์ไบด์ในองค์ประกอบเฟส โดยผลิตภัณฑ์หลังการสังเคราะห์จะปรากฏเนินที่แสดงเฟสอสัณฐานดีกว่าในผลิตภัณฑ์หลังแคลไซน์ การที่ผลิตภัณฑ์มีลักษณะคล้ายแก้วหลอมนั้น ผู้วิจัยสันนิษฐานว่า เกิดจากการที่มีโบรอนส่วนผสมมากเกินไป การเกิด

เป็นเนื้อแก้วน่าจะมิกไกเช่นเดียวกับการนำบอริกออกไซด์มาหลอมเป็นฟritเพื่อเตรียมเป็นวัตถุดิบในการทำน้ำเคลือบสำหรับเคลือบชิ้นงานเซรามิก ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ปรับส่วนผสมในสารตั้งต้น โดยกำหนดปริมาณรังไหมเท่ากับ 1 กรัม และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณกรดบอริกเป็น 2 3 และ 4 กรัม เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณกรดบอริกในส่วนผสมที่มีต่อการเกิดเฟสของผลิตภัณฑ์

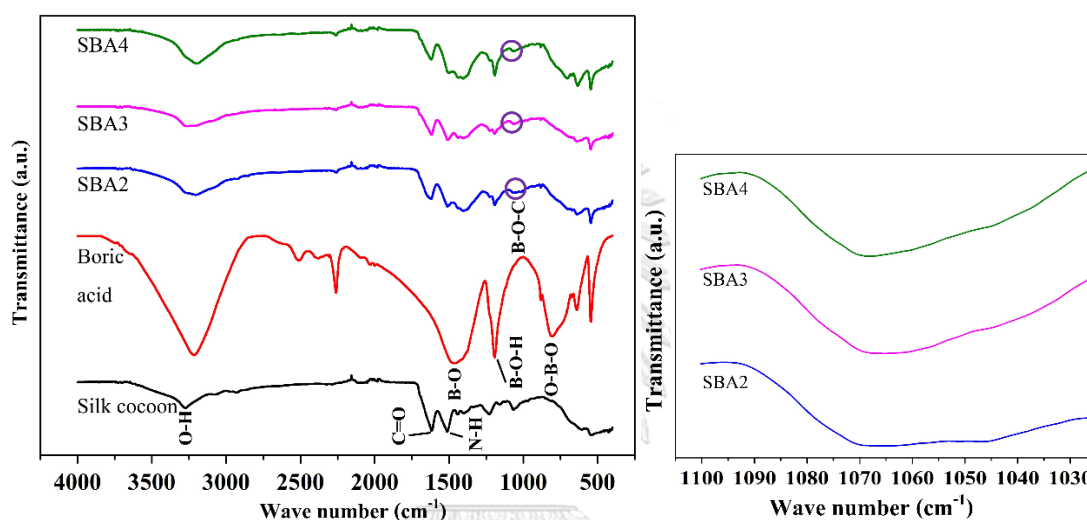


รูปที่ 4.8 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้น ด้วยการจุ่มแช่รังไหม 4 กรัม ในสารละลายกรดบอริกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ผ่านการแคลไซน์ที่ 700 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

4.2.2 หมู่ฟังก์ชันของสารตั้งต้น

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารตั้งต้น ที่ได้จากการจุ่มแช่รังไหม 1 กรัม ลงในสารละลายกรดบอริก 2 3 และ 4 กรัม (ในน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งกำหนดชื่อส่วนผสมว่า SBA2 SBA3 และ SBA4 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับกรดบอริกและรังไหมที่ไม่ผ่านการจุ่มแช่ แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าสารตั้งต้นทั้งสามส่วนผสม ปรากฏการสั่นแบบ stretching ของพันธะ O-H, N-H และ C=O ที่เลขคลื่น 3200 cm^{-1} 1618 cm^{-1} และ 1509 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งแสดงอัตลักษณ์ของพันธะในรังไหม^[22] และยังพบแถบการสั่นแบบ stretching ของพันธะ O-H และ B-O ที่เลขคลื่นช่วง $3000\text{-}3500$ และ $1300\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ และแถบ

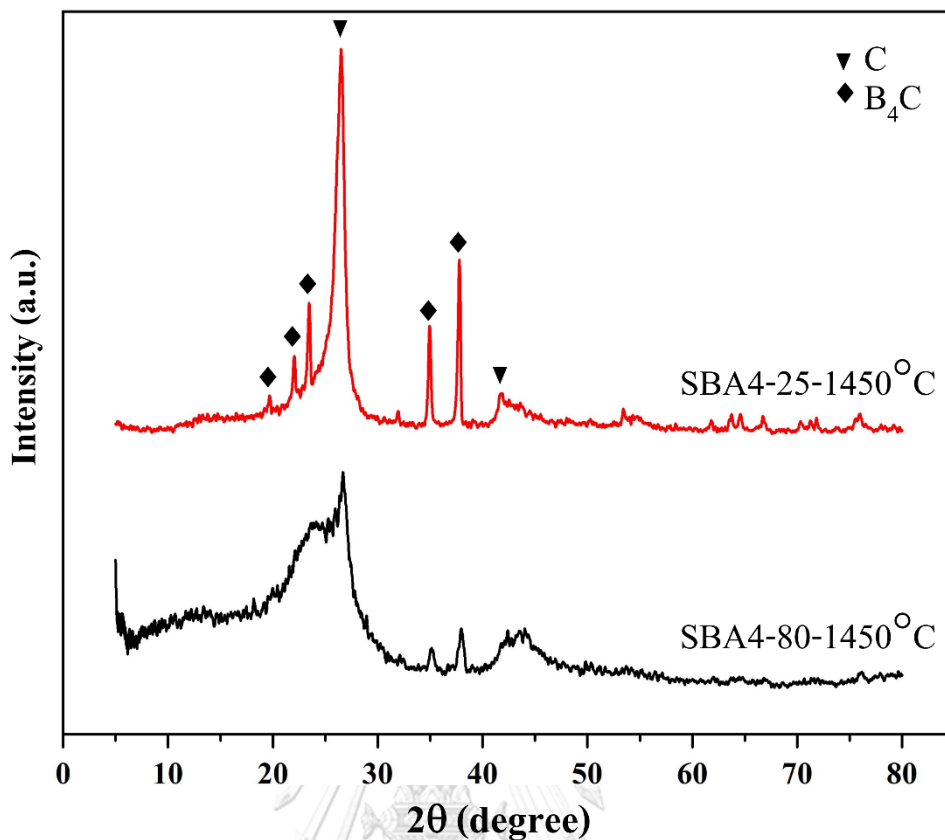
การสั่นแบบ bending ของพันธะ B-O-H และ O-B-O ที่เลขคลื่น 1200 และ 546 cm^{-1} เช่นเดียวกับที่พบในกรดบอริก นอกจากนี้ พบว่าแถบการดูดกลืนของสารตั้งต้นทั้งสามส่วนผสม ปรากฏแถบการสั่นแบบ stretching ของพันธะ B-O-C เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1000-1200 cm^{-1} และเมื่อเปรียบเทียบกับแถบการดูดกลืนของกรดบอริก^[23] แถบพันธะ O-H และ B-O-H ในสารตั้งต้น ทั้งสามมีขนาดเล็กกว่า แสดงให้เห็นถึงพันธะเคมีในโครงสร้างใหม่ที่เปลี่ยนไปจากกระบวนการ เตรียมสารตั้งต้นด้วยวิธีจุ่มแช่รังไหมในสารละลายกรดบอริก ทั้งนี้ ขนาดและรูปร่างของแถบการ ดูดกลืนที่แสดงพันธะ B-O-C ของสารตั้งต้นทั้งสามส่วนผสมมีความใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.9 ด้านขวา)



รูปที่ 4.9 (ซ้าย) หมู่ฟังก์ชันของกรดบอริก รังไหมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ และสารตั้งต้นที่ เตรียมจากส่วนผสม SBA2 SBA3 และ SBA4 และ(ขวา) ส่วนขยายแสดงแถบการดูดกลืนของ สารตั้งต้นที่ช่วงเลขคลื่น 1000-1200 cm^{-1}

4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในการเตรียมสารตั้งต้น

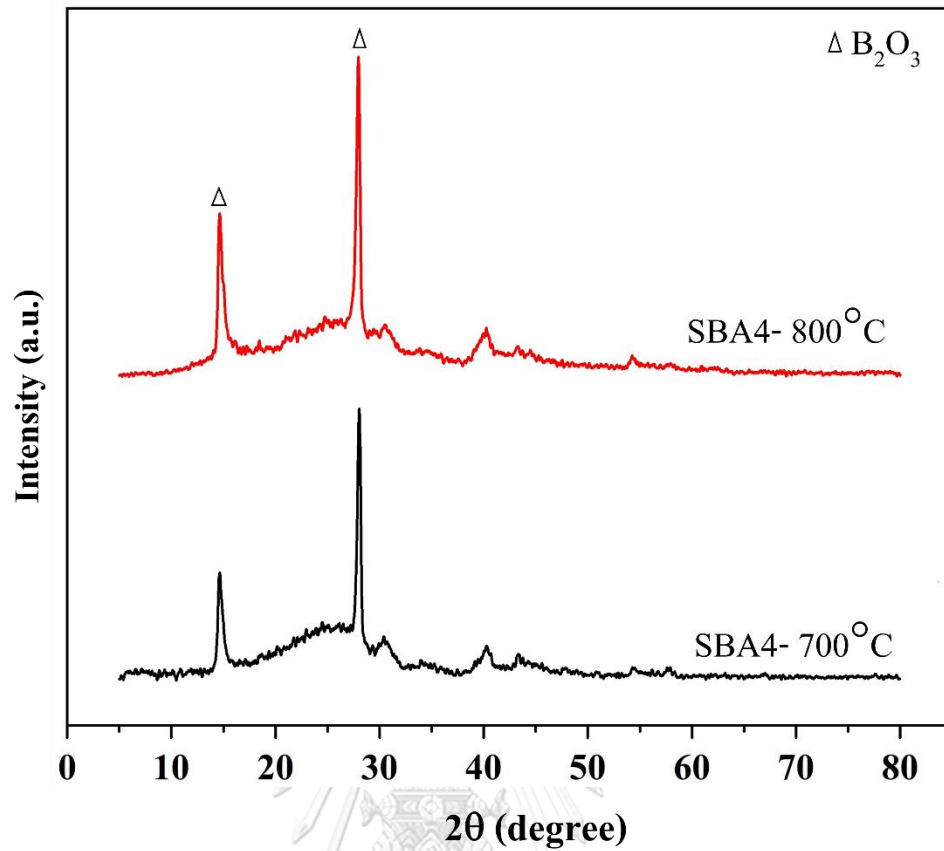
ในการทดลองเตรียมสารตั้งต้น SBA4 ด้วยการจุ่มแช่รังไหมในสารละลายกรดบอริก เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เปรียบเทียบการจุ่มแช่ ณ อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส องค์ประกอบเฟส ที่ได้จากผลิตภัณฑ์หลังการสังเคราะห์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมด้วยการจุ่ม แช่ ณ อุณหภูมิห้อง ปรากฏพีคของโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C : JCPDS 35-0798) ชัดเจน ในขณะที่ ผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบเฟสโบรอนคาร์ไบด์เพียงเล็กน้อย และยังคงมีส่วนที่เป็นอสัณฐานในองค์ประกอบเฟส ผลการทดลองในส่วนนี้นับว่าผิดไปจากความ คาดหมาย เนื่องจากการจุ่มแช่โดยมีความร้อนช่วยน่าจะทำให้สารละลายแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้าง รังไหมได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการทดลองนี้ร่วมกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 ที่ ผ่านมา ผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจใช้กระบวนการจุ่มแช่ ณ อุณหภูมิห้อง เพื่อดำเนินการทดลองในขั้นต่อไป



รูปที่ 4.10 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมสารตั้งต้นโดยการจุ่มแช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้องและ 80 องศาเซลเซียส ผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมงในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

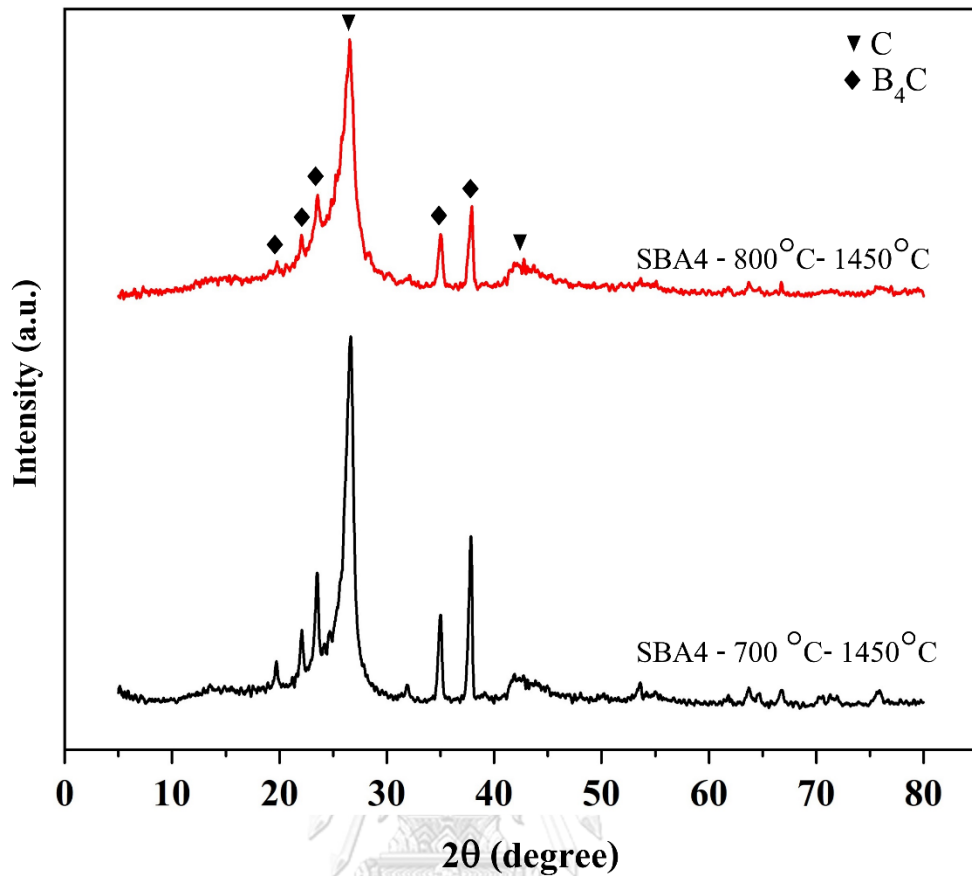
4.2.4 การสังเคราะห์โดยผ่านขั้นตอนการแคลไซน์

สารตั้งต้น SBA4 ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการจุ่มแช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ถูกนำมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง องค์ประกอบเฟสหลังแคลไซน์แสดงในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่า เส้นกราฟที่ได้จากการแคลไซน์ทั้งสองอุณหภูมินั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก คือ ประกอบด้วยโบรอนออกไซด์และเฟสอสัณฐานของคาร์บอน โดยส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นอสัณฐานเท่ากับ 61.41% และ 65.23% ตามลำดับ ซึ่งอาจถือได้ว่าไม่ต่างกันมาก



รูปที่ 4.11 องค์ประกอบเฟสของส่วนผสม SBA4 หลังการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อนำส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านการแคลไซน์ทั้งสองอุณหภูมิ มาสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในเตาชนิดท่อซึ่งควบคุมการไหลของก๊าซอาร์กอน (2 ลิตรต่อนาที) เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ (รูปที่ 4.12) จะเห็นว่า ทั้งสองสภาวะปรากฏเฟสโบรอนคาร์ไบด์ขึ้นในผลิตภัณฑ์ โดยยังคงมีคาร์บอนเป็นเฟสหลัก



รูปที่ 4.12 องค์ประกอบเฟสของส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมงในบรรยากาศ ก๊าซอาร์กอน

จากผลที่รายงานข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อพฤติกรรมเกิดการเกิดเฟสของส่วนผสม SBA4 ทั้งจากการเผาแคลไซน์และจาก การสังเคราะห์ โดยองค์ประกอบเฟสผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ของทั้งสองสภาวะยังคงปรากฏคาร์บอนในปริมาณสูง

4.2.5 การสังเคราะห์โดยไม่ผ่านการแคลไซน์

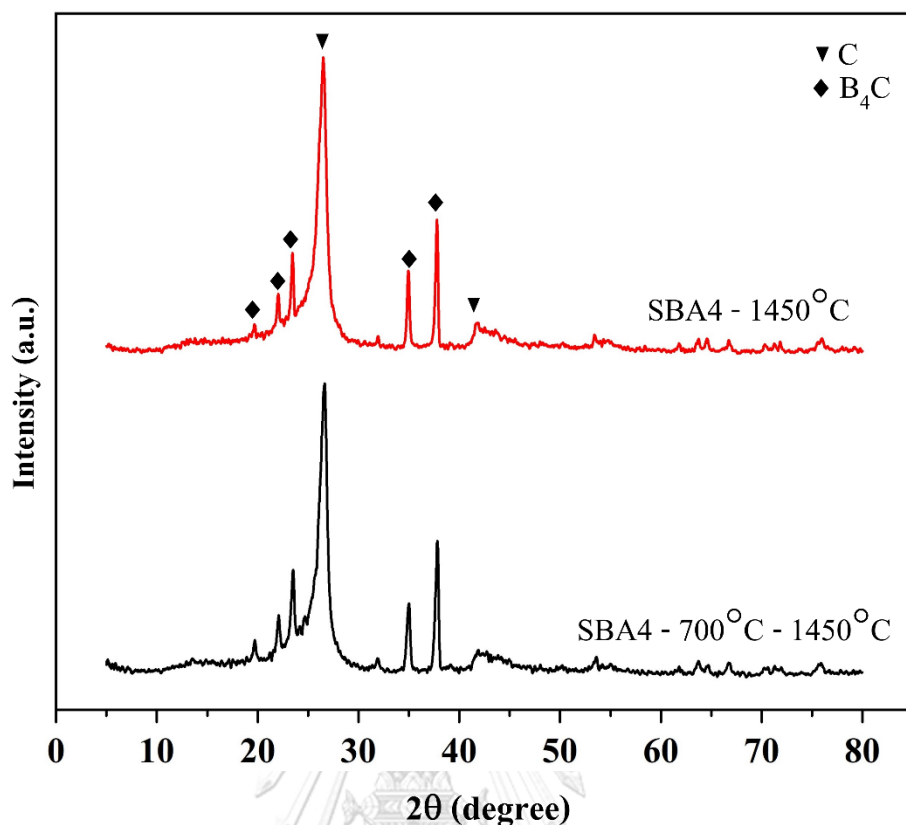
จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.4 ซึ่งแสดงผลว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสารตั้งต้น SBA4 มาผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส ก่อนทำการสังเคราะห์ แม็บบรอนคาร์ไบด์จะปรากฏในองค์ประกอบเฟส แต่ก็ยังคงมีคาร์บอนเป็นเฟสหลักในผลิตภัณฑ์ อีกทั้งเพื่อเป็นการลดขั้นตอนในการสังเคราะห์ ผู้วิจัยจึงได้ทดลองทำการสังเคราะห์โดยไม่ผ่านขั้นตอนการแคลไซน์ รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแคลไซน์และการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ

สังเคราะห์ที่ผ่านขั้นตอนเผาแคลไซน์จะมีลักษณะเป็นก้อนหรือชิ้นเดียวกัน สีดำเทา เนื่องจากผ่านการบดและคัดขนาดหลังขั้นตอนการแคลไซน์ เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ เรายังคงเห็นแผ่นสีเหลี่ยมของรังไหมเกาะกันเป็นก้อนอยู่ในครุชิวีล



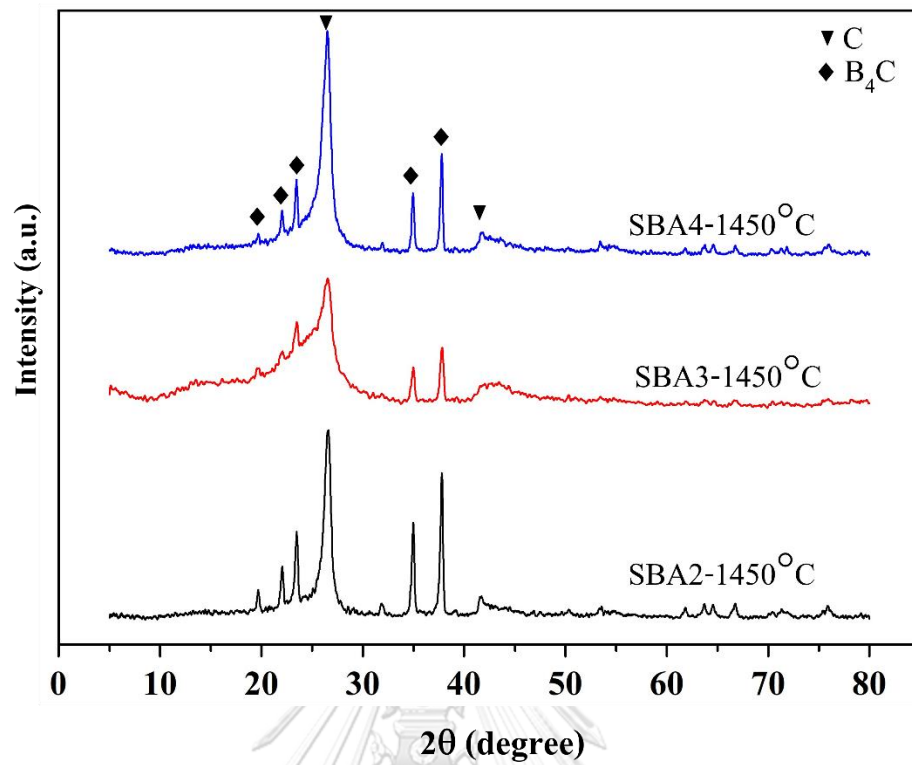
รูปที่ 4.13 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ (ก) ที่ได้จากการแคลไซน์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง (ข) หลังการสังเคราะห์ และ (ค) หลังการสังเคราะห์โดยไม่ผ่านขั้นตอนแคลไซน์

รูปที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์ จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 โดยไม่ผ่านขั้นตอนแคลไซน์ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากส่วนผสมเดียวกันที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 700 องศาเซลเซียส พบว่า การเกิดเฟสของผลิตภัณฑ์ทั้งสองสภาวะมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ทั้งสองสภาวะปรากฏเฟสโบรอนคาร์ไบด์และคาร์บอนปริมาณมากในผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองบ่งชี้ว่า ในการวิจัยนี้ ขั้นตอนการแคลไซน์ไม่ได้แสดงอิทธิพลที่เด่นชัดต่อการเกิดเฟสของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์



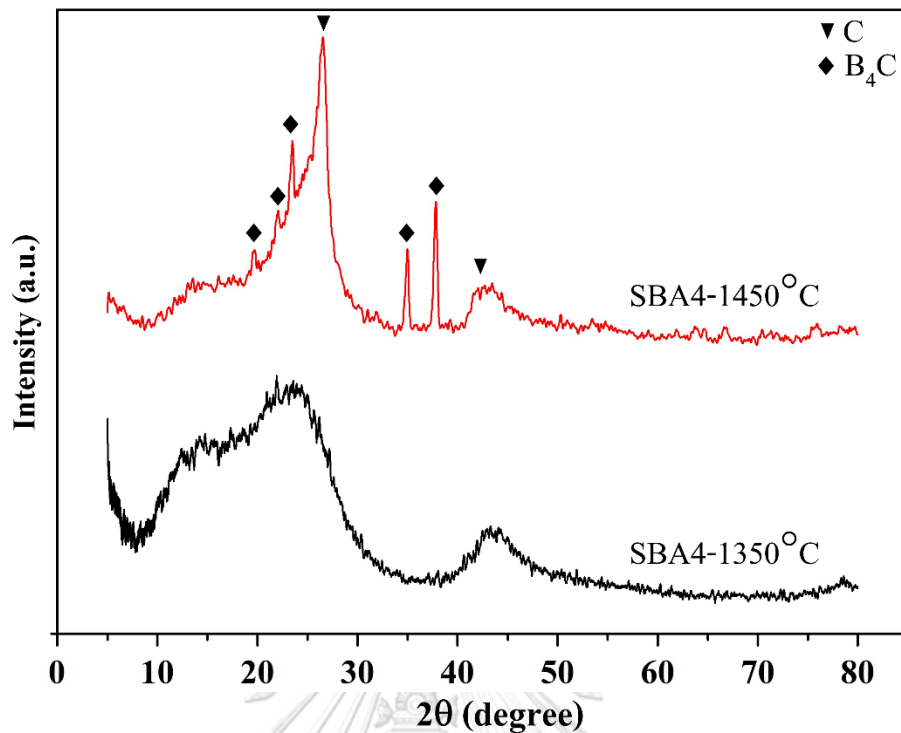
รูปที่ 4.14 องค์กรประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง โดยผ่านขั้นตอนการแคลไซน์ที่ 700 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และไม่ผ่านการแคลไซน์

เมื่อนำส่วนผสม SBA2 SBA3 และ SBA4 มาสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านการแคลไซน์ องค์กรประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 4.15 จะเห็นว่า ผลิตภัณฑ์จากส่วนผสม SBA2 และ SBA4 มีองค์กรประกอบเฟสคล้ายคลึงกันคือ ปรากรูโบรอนคาร์ไบด์ในระบบและยังคงมีคาร์บอนเป็นเฟสหลัก ในขณะที่ ผลิตภัณฑ์จากส่วนผสม SBA3 มีลักษณะองค์กรประกอบเฟสต่างออกไป แม้จะประกอบด้วยเฟสโบรอนคาร์ไบด์และคาร์บอนเหมือนในสองส่วนผสมข้างต้น แต่ความคมและความเข้มพีคต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด ในการนี้ ผู้วิจัยได้พยายามทดลองซ้ำก็ยังคงได้ผลองค์กรประกอบเฟสในลักษณะเช่นเดิม โดยสาเหตุของแนวโน้มผลการทดลองเช่นนี้ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA2 SBA3 และ SBA4 ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

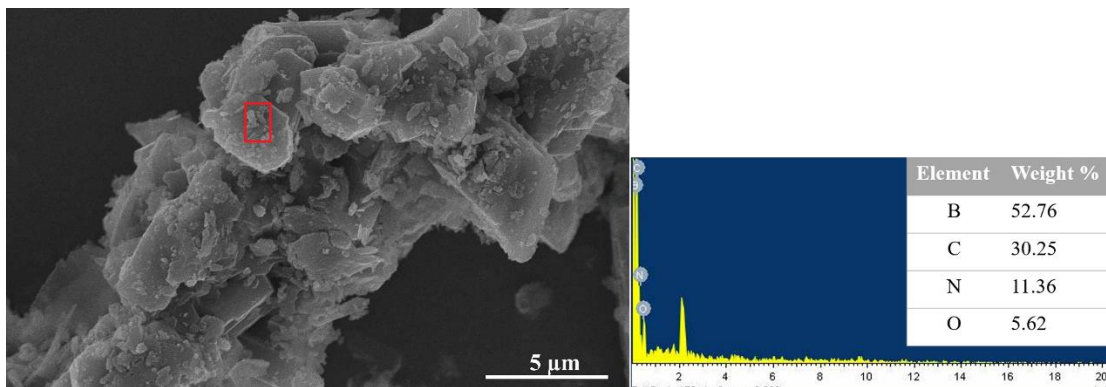
นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองนำส่วนผสม SBA4 มาทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.16) จะเห็นว่า ผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ที่ 1350 องศาเซลเซียส ยังไม่ปรากฏพิกัดแสดงเฟสโบรอนคาร์ไบด์ พบเพียงเนินที่แสดงเฟสอสังฐาน



รูปที่ 4.16 องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

4.2.6 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์

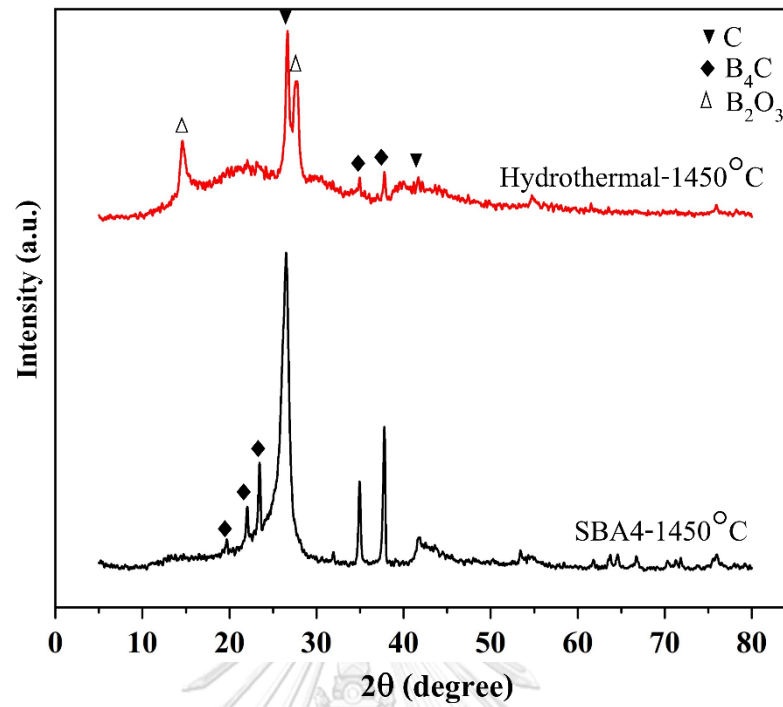
รูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง และสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส ในก๊าซอาร์กอน พบว่า โครงสร้างปรากฏเป็นเค้าโครงเส้นไหม ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มอนุภาครูปร่างหลายเหลี่ยมขนาดหลากหลาย ตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 ไมครอน อาจกล่าวได้ว่า เส้นไหมประพืดัวเป็นแบบหรือ template ของผลิตภัณฑ์ เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุ ณ ตำแหน่งของอนุภาค พบว่าประกอบด้วยคาร์บอนในปริมาณที่มากกว่าสัดส่วนของสารประกอบ B_4C ซึ่งสอดคล้องกับผลองค์ประกอบเฟส จากการตรวจสอบพบไนโตรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบของรังไหม แสดงให้เห็นว่ายังมีเศษส่วนของรังไหมที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ในระบบ



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

4.2.7 การนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์

ในการสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์จากริงใหม่ ผู้วิจัยได้พยายามนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเข้ามาช่วย โดยคาดหวังว่า ความร้อนและความดันที่ให้ในระบบระหว่างการเตรียมสารตั้งต้นจะทำให้สารละลายมีความเป็นเนื้อเดียวกัน มีการไหลตัวที่ดีขึ้นและสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างริงใหม่ได้มากกว่าเดิม ส่งผลให้เกิดพันธะ B-O-C ปริมาณมากขึ้นภายในโครงสร้างริงใหม่ อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบเฟสของผลิตภัณฑ์จากการเตรียมส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ณ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (รูปที่ 4.18) ยังคงปรากฏเฟสสัณฐานและโบรอนออกไซด์ในระบบ และพีคโบรอนคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นมีความเข้มต่ำ สาเหตุที่ผู้วิจัยพอจะสันนิษฐานได้คือ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในสภาวะไฮโดรเทอร์มัล โครงสร้างของริงใหม่อาจถูกทำลายและลึ้มตัว ส่งผลให้สารละลายแทรกเข้าไปเกิดพันธะ B-O-C ในโครงสร้างริงใหม่ได้ลำบาก



รูปที่ 4.18 องค์ประกอบเฟสของส่วนผสม SBA4 ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ผ่านและไม่ผ่าน
สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสังเคราะห์โบรอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิต่ำจากแหล่งคาร์บอนธรรมชาติ ได้แก่ ริงไม้ม โดยใช้กรดบอริกเป็นแหล่งโบรอน โดยได้ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ ได้แก่ สัดส่วนของริงไม้ต่อปริมาณกรดบอริก อุณหภูมิในกระบวนการเผาแคลไซน์ อุณหภูมิระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาและปรับปรุงวิธีการเตรียมสารตั้งต้น โดยได้เตรียมสารตั้งต้นทั้งหมด 3 วิธี คือ การเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบให้แก่หนอนไหม การจุ่มแช่ริงไม้มในสารละลายกรด-บอริกที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และการนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการเตรียมสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์ โดยผู้วิจัยคาดหวังว่า กระบวนการเตรียมสารตั้งต้นเหล่านี้จะช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโบรอนของกรดบอริกกับคาร์บอนในโครงสร้างของริงไม้ม เกิดเป็นพันธะ B-O-C ซึ่งเอื้อต่อการเกิดเฟสโบรอนคาร์ไบด์ในขั้นตอนการสังเคราะห์ ผลจากการทดลองในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า ตัวแปรในกระบวนการสังเคราะห์ล้วนมีอิทธิพล ส่งผลต่อการเกิดเฟสของโบรอนคาร์ไบด์ในผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ สามารถสรุปผลเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

1. ในการเสริมอาหารที่มีโบรอนเป็นองค์ประกอบให้แก่หนอนไหม พบว่า หนอนไหมไม่สามารถมีชีวิตจนสร้างริงไม้มเมื่อเสริมอาหารด้วยโบรอนความเข้มข้นสูง ในกรณีที่เสริมอาหารด้วยโบรอนความเข้มข้นต่ำ หนอนไหมมีชีวิตจนสร้างริงไม้มได้ แต่ไม่ปรากฏโบรอนหรือสารประกอบโบรอนในองค์ประกอบเฟสของริงไม้ม และไม่พบเฟสโบรอนคาร์ไบด์ในผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์ริงไม้มนี้ที่ 1450 องศาเซลเซียส ในก๊าซอาร์กอน เนื่องจากโบรอนที่เสริมอาหารมีปริมาณน้อยเกินไป โดยโบรอนส่วนใหญ่อาจสะสมในตัวหนอนไหม

2. ในงานวิจัยนี้ ผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์สารตั้งต้นที่มีโบรอนมากเกินไปจะมีลักษณะแก้วหลอมและพบโบรอนออกไซด์องค์ประกอบเฟส และเมื่อใช้สารตั้งต้นที่มีคาร์บอนมากเกินไป จะพบคาร์บอนปริมาณสูงหลงเหลือในผลิตภัณฑ์

3. จากการเตรียมสารตั้งต้นโดยการจุ่มแช่ริงไม้ม 1 กรัม ในสารละลายกรดบอริกความเข้มข้น 1.3 2.0 และ 2.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (SBA2 SBA3 และ SBA4) ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง ในก๊าซอาร์กอน พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากทั้งสามส่วนผสมปรากฏโบรอนคาร์ไบด์ในองค์ประกอบเฟส โดยมีคาร์บอนเป็นเฟสหลัก และเมื่อลดอุณหภูมิการสังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 เป็น 1350 องศาเซลเซียส ไม่พบเฟสโบรอนคาร์

ไบต์ในผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน พบว่ามีพันธะ B-O-C บริเวณเลขคลื่น 1000-1200 cm^{-1} ปรากฏอยู่ในสารตั้งต้นทั้งสาม

4. จากการทดลองเปรียบเทียบ สังเคราะห์ส่วนผสม SBA4 โดยผ่านและไม่ผ่านกระบวนการแคลไซน์ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการสังเคราะห์ทั้งสองสภาวะมีลักษณะองค์ประกอบเฟสคล้ายคลึงกันมาก คือประกอบด้วยเฟสโบรอนคาร์ไบด์และมีคาร์บอนเป็นเฟสหลักในผลิตภัณฑ์

5. ในการทดลองนำส่วนผสม SBA4 ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่ 180 องศาเซลเซียส พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 1450 องศาเซลเซียส มีพีคโบรอนคาร์ไบด์ในองค์ประกอบเฟสต่ำกว่าที่พบในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล นอกจากนี้ยังพบเฟสสัณฐาน เฟสโบรอนออกไซด์ และคาร์บอนปริมาณมากในผลิตภัณฑ์ สาเหตุอาจเนื่องมาจากการล้มตัวของโครงสร้างใหม่ซึ่งส่งผลให้โบรอนแพร่เข้าไปในโครงสร้างได้ลำบากกว่าเดิม

ข้อเสนอแนะและแนวทางการดำเนินงานต่อในอนาคต

จากผลสรุปที่ได้รายงานมาข้างต้น แม้การดำเนินงานวิจัยส่วนใหญ่จะสำเร็จลุล่วงด้วยดี แต่เนื่องด้วยสถานการณ์โรคระบาดโควิด-19 ทำให้ผู้วิจัยจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนแผนดำเนินการทดลอง มีสิ่งที่ควรต้องศึกษาเพิ่มเติมและที่ควรปรับปรุง ดังต่อไปนี้

- ปรับปรุงกระบวนการเตรียมรังใหม่ให้มีขนาดเล็กลง หรือมีลักษณะที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในสารละลายกรดบอริก เพื่อให้โบรอนในสารละลายสามารถแพร่เข้าไปสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลในรังใหม่ได้มากขึ้น
- เพิ่มสูตรส่วนผสมของสารตั้งต้นให้ช่วงกว้างขึ้น
- ศึกษาเพิ่มเรื่องการนำกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลมาใช้ในการสังเคราะห์ ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

บรรณานุกรม

- [1] J. Greim, K.A.J.U.s.e.o.i.c. Schwetz, Boron carbide, boron nitride, and metal borides, (2000).
- [2] V. Domnich, S. Reynaud, R.A. Haber, M.J.J.o.t.A.C.S. Chhowalla, Boron carbide: structure, properties, and stability under stress, 94(11) (2011) 3605-3628.
- [3] H.J.S.S.S. Werheit, Boron carbide: Consistency of components, lattice parameters, fine structure and chemical composition makes the complex structure reasonable, 60 (2016) 45-54.
- [4] H. Zeng, Y.-M. Kan, G.-J.J.M.L. Zhang, Synthesis of boron carbide powder from hexagonal boron nitride, 64(18) (2010) 2000-2002.
- [5] S. Avcioglu, F. Kaya, C.J.M.L. Kaya, Non-catalytic synthesis of boron carbide (B₄C) nano structures with various morphologies by sol-gel process, 249 (2019) 201-205.
- [6] I. Yanase, R. Ogawara, H.J.M.L. Kobayashi, Synthesis of boron carbide powder from polyvinyl borate precursor, 63(1) (2009) 91-93.
- [7] K. Dateraksa, S.J.J.o.M. Sinchai, Materials, Minerals, Phase formation of boron carbide powder synthesized from glutinous rice flour, 29(3) (2019).
- [8] S.K. Vijay, R. Krishnaprabhu, V. Chandramouli, S.J.C.I. Anthonysamy, Synthesis of nanocrystalline boron carbide by sucrose precursor method-optimization of process conditions, 44(5) (2018) 4676-4684.
- [9] H. SarithaDevi, M. Swapna, G. Ambadas, S.J.C.P.B. Sankararaman, Low-temperature green synthesis of boron carbide using aloe vera, 27(10) (2018) 107702.
- [10] H.S. Devi, M. Swapna, G. Ambadas, S.J.O. Sankararaman, Spectroscopy, Optical emission diagnosis of boron carbide synthesized using natural carbon precursors, 125(6) (2018) 928-932.
- [11] M. Choudhury, D.J.I.J.o.F. Devi, T. Research, Impact of high temperature and pressure on sericin scouring of muga silk cocoons, 41(1) (2016) 93-96.
- [12] K.-J. Kwon, H. Seok, Silk Protein-Based Membrane for Guided Bone Regeneration,

- 8(8) (2018) 1214.
- [13] L.-D. Koh, Y. Cheng, C.-P. Teng, Y.-W. Khin, X.-J. Loh, S.-Y. Tee, M. Low, E. Ye, H.-D. Yu, Y.-W.J.P.i.P.S. Zhang, Structures, mechanical properties and applications of silk fibroin materials, 46 (2015) 86-110.
- [14] P.M. Barros, I.V.P. Yoshida, M.A.J.J.o.n.-c.s. Schiavon, Boron-containing poly (vinyl alcohol) as a ceramic precursor, 352(32-35) (2006) 3444-3450.
- [15] T. Siritienthong, J. Ratanavaraporn, P.J.I.j.o.p. Aramwit, Development of ethyl alcohol-precipitated silk sericin/polyvinyl alcohol scaffolds for accelerated healing of full-thickness wounds, 439(1-2) (2012) 175-186.
- [16] J.-T. Wang, L.-L. Li, L. Feng, J.-F. Li, L.-H. Jiang, Q.J.I.j.o.b.m. Shen, Directly obtaining pristine magnetic silk fibers from silkworm, 63 (2014) 205-209.
- [17] J.-T. Wang, L.-L. Li, M.-Y. Zhang, S.-L. Liu, L.-H. Jiang, Q.J.M.S. Shen, E. C, Directly obtaining high strength silk fiber from silkworm by feeding carbon nanotubes, 34 (2014) 417-421.
- [18] H.H. Kim, M.K. Kim, K.H. Lee, Y.H. Park, I.C.J.I.j.o.b.m. Um, Effects of different Bombyx mori silkworm varieties on the structural characteristics and properties of silk, 79 (2015) 943-951.
- [19] F. Torknik, O. Naeini, M. Razavi, N.S.J.M.T.P. Tabrizi, Synthesis of SiC nanofibers from a natural biopolymer via carbothermal reduction method, 5(7) (2018) 15861-15867.
- [20] W. Ahmad, M. Mamat, A. Zoolfakar, Z. Khusaimi, M. Rusop, A review on hematite α -Fe₂O₃ focusing on nanostructures, synthesis methods and applications, 2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd), IEEE, 2016, pp. 1-6.
- [21] W. Xu, Y. Zhou, H. Lin, S. Lu, J. Ling, R. Wang, Z. Wang, K.J.J.o.A. Wang, Compounds, Embedded ZrC-SiC nanocomposites from hydrothermal precursor with temperature-dependent oxidation resistance and high sinterability, 791 (2019) 316-327.
- [22] J. Saha, M. Mondal, M. Karim Sheikh, M.J.J.T.S.E. Habib, Extraction, structural and functional properties of silk sericin biopolymer from Bombyx mori silk cocoon

waste, 9 (2019) 2.

- [23] S.M. El-Sheikh, Y.M. Ahmed, A.A.-E.-B. Abd-Allah, S.A.J.J.o.t.A.C.S. Sayed, Influence of reaction temperature and time on nanoboron carbide morphology and its thermal stability, optical and electronic properties, 54(3) (2018) 501-512.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กานต์ชนก ภูผาทอง
วัน เดือน ปี เกิด	1 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	อ.ราชไศล จ.ศรีสะเกษ
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563
ที่อยู่ปัจจุบัน	54 ม.7 ตำบลหนองอึ่ง อำเภอราชไศล จังหวัดศรีสะเกษ 33160
ผลงานตีพิมพ์	K. Poophathong and S. Sinchai, "Boron Carbide Synthesis Using Silk Cocoon as Carbon Source," The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020), 1st-4th December 2020, Pattaya, Thailand.