



ผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่มีต่อปริมาณธาตุ โครงสร้างผลึก และสภาพพื้นผิวของกากสาหร่ายพวงองุ่น

Effect of Calcination Temperature on Elemental Composition, Crystal Structure and Surface Morphology of *Caulerpa lentillifera* Residue

เกศริน มีมล^{1*}, อนุวัฒน์ หัสดี¹, ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ¹, วาทีนี จันมี²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

²สาขาวิชาเคมี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

Kedsarin Meemon^{1*}, Anuwat Hassadee¹, Tippavan Hongkachern¹, Watinee Chanmee²

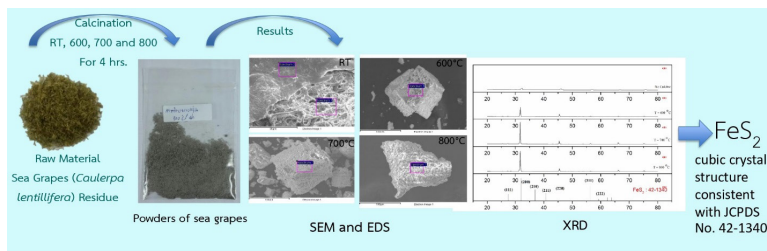
¹Department of Physics, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok 10600

²Department of Chemistry, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok 10600

Received 5 June 2025; Received in revised 23 September 2025; Accepted 30 September 2025

GRAPHICAL ABSTRACT

ABSTRACT



This research investigates the effects of calcination at room temperature and at 600°C, 700 °C and 800 °C for 4 hours on the elemental composition, crystal structure, and surface morphology of *Caulerpa lentillifera* residue. The analytical techniques employed include energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron

microscopy (SEM). Elemental analysis revealed the presence of 15 elements. The carbon and oxygen contents of the *Caulerpa lentillifera* residue decreased as the calcination temperature increased. Moreover, the concentrations of chlorine and sodium increased particularly at 800°C, reaching 48.03 wt% and 29.25 wt%, respectively. XRD analysis at 600°C, 700°C and 800°C showed distinct diffraction peaks corresponding to the pyrite phase (FeS₂) with a cubic crystal structure, specifically along the (111), (200), (220), and (311) planes, consistent with JCPDS No. 42-1340. SEM image indicated that increasing the calcination temperature resulted in a transformation from an amorphous fibrous morphology to well-ordered, fine crystalline structures. At 800°C, well-defined cubic geometric crystals were observed, consistent with the XRD results. These findings demonstrate that calcination temperature significantly influences both the elemental composition and crystalline structure of the biomass, indicating its potential for development as an adsorbent, catalyst, or ceramic material. The selection of an appropriate calcination temperature can determine the desired material properties, for instance, utilizing the increased sodium and chlorine content for adsorption applications, or employing the FeS₂ phase as a catalyst.

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
กากสาหร่ายพวงองุ่น; แคลไซต์; ไพไรต์ Keywords	<p>งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซต์ของกากสาหร่ายพวงองุ่นที่อุณหภูมิห้อง, 600°C, 700°C และ 800°C นาน 4 ชั่วโมง ต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุ โครงสร้างผลึก และสภาพพื้นผิว โดยใช้เครื่องเทคนิคสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (EDS), เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (SEM) ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุพบมีทั้งหมด 15 ชนิด โดยปริมาณคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ในกากสาหร่ายพวงองุ่นลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาแคลไซต์เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่โซเดียม (Na) และคลอรีน (Cl) มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 800°C มีค่า 48.03%wt และ 29.25%wt ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิ 600°C, 700°C และ 800°C พบพีคของผลึกชัดเจนตรงกับเฟสไพไรต์ (FeS₂) ที่มีโครงสร้างผลึกระบบคิวบิก (Cubic) โดยมีระนาบผลึกหลัก (111), (200), (220) และ (311) สอดคล้องกับ JCPDS No. 42-1340 โดยลักษณะพื้นผิวพบว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงจากเส้นใยแบบอสัณฐานไปสู่โครงสร้างผลึกขนาดเล็กเรียงตัวดีขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 800°C ให้ผลึกทรงเรขาคณิตชัดเจนในระบบคิวบิก สอดคล้องกับผล XRD จึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซต์มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุและโครงสร้าง มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับ ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือวัสดุเซรามิก โดยการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการสำหรับการใช้งานนั้น ๆ เช่น การใช้ประโยชน์จากปริมาณโซเดียม (Na) และคลอรีน (Cl) ที่เพิ่มขึ้นเพื่อเป็นวัสดุดูดซับ หรือการใช้ไพไรต์ (FeS₂) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา</p>

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kedsarin.me@bsru.ac.th

DOI:

1. บทนำ

สาหร่ายทะเลเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศทางทะเล โดยทำหน้าที่เป็นผู้ผลิตหลัก (Primary producer) ในห่วงโซ่อาหารทางทะเล และจัดเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีคุณค่าทั้งทางสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ สาหร่ายทะเลสามารถเจริญเติบโตได้ดีในแหล่งน้ำกร่อยและน้ำทะเลตามธรรมชาติ [1] ในอดีตจนถึงปัจจุบันสาหร่ายทะเลเป็นที่นิยมบริโภคทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ เนื่องจากมีคุณสมบัติประโยชน์หลากหลายด้าน ไม่เพียงแต่ด้านโภชนาการ แต่ยังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ปศุสัตว์ การบำบัดน้ำเสีย ปุ๋ยชีวภาพ เครื่องสำอาง และเวชภัณฑ์ [2] ในยุคปัจจุบันการบริโภคสาหร่ายทะเลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในกลุ่มผู้รักสุขภาพ สาหร่ายทะเลมักถูกใช้แทนผักในหลายเมนูอาหาร เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีปริมาณแคลอรีต่ำ ประเทศไทยโดยกรมประมงได้ส่งเสริมการเพาะเลี้ยงสาหร่ายทะเลหลายชนิด หนึ่งในนั้นคือ “สาหร่ายพวงองุ่น” ซึ่งเป็นที่นิยมสูงในกลุ่มผู้บริโภคเพื่อสุขภาพ เนื่องจากประกอบด้วยวิตามินที่หลากหลาย ได้แก่ วิตามิน A, B, C, E และ K ที่สามารถดูดซึมได้ง่าย อีกทั้งยังมีกากใยสูง ช่วยในการขับถ่าย เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการลดน้ำหนักและมีแคลเซียมสูง ซึ่งมีบทบาทในการบำรุงกระดูก รวมถึงมีคุณสมบัติช่วยปรับสมดุลร่างกาย รักษาความชุ่มชื้นของเซลล์ผิว บำรุงสมอง และเส้นผม จากคุณสมบัติที่หลากหลายของสาหร่ายทะเล หลายหน่วยงานและสถาบันวิจัยจึงให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้าของสาหร่าย โดยเฉพาะในด้านการดูดซับสารมลพิษ เช่น แอมโมเนีย (NH_4^+) ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ รวมถึงการนำไปเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง ซึ่งมีผลการทดลองพบว่าสารสกัดจากสาหร่ายสามารถลดเลือนริ้วรอยบนผิวหนังได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาทางเภสัชวิทยาที่แสดงให้เห็นว่าสาหร่ายมีศักยภาพในการต้านเซลล์มะเร็งและชะลอความเสื่อมของระบบประสาท งานวิจัยบางชิ้นมุ่งเน้นการพัฒนาสารสกัด

จากสาหร่ายพวงองุ่นและสาหร่ายลีนมังกกร เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและยา หรือเพื่อนำสารสกัดจากสาหร่ายไปทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพกับเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ [4] จากกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากสาหร่ายเพื่อใช้ในการแพทย์ คือ กระบวนการสกัดของแข็งด้วยของเหลว (Solid-Liquid extraction; SLE) ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการสกัดที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการแยกสารออกฤทธิ์จากวัตถุดิบชีวภาพ โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์หรือไม่ใช้อินทรีย์เพื่อดึงสารที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพออกมา ปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของกระบวนการ ได้แก่ ชนิดของตัวทำละลาย อัตราส่วนของแข็งต่อตัวทำละลาย อุณหภูมิ และเวลาในการสกัด หนึ่งในตัวทำละลายที่ได้รับความนิยมคือ เอทิลแอซิเตต (Ethyl acetate) ซึ่งจัดเป็นตัวทำละลายกึ่งขั้ว (Semi-polar solvent) ที่สามารถดึงสารออกฤทธิ์ที่มีขั้วปานกลางออกจากวัตถุดิบชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาที่ผ่านมา เช่น งานของ Chantree et al. [4] ได้รายงานว่าการสกัดเอทิลแอซิเตต จากสาหร่ายลีนมังกกรซึ่งได้มาจากกระบวนการสกัดของแข็งด้วยของเหลวมีฤทธิ์กระตุ้นให้เกิด Apoptosis, Autophagy และ Cell cycle arrest ในเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพเชิงชีวภาพของสารสกัดที่ได้ และยืนยันถึงความสำคัญของการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในกระบวนการสกัด ขณะเดียวกัน กระบวนการดังกล่าวยังทิ้งกากสาหร่ายที่สามารถนำไปต่อยอดได้

คุณสมบัติพื้นฐานของกากสาหร่ายสามารถอธิบายได้จากองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึก และสัณฐานวิทยา เทคนิคสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (Energy dispersive spectroscopy, EDS) ใช้ระบุชนิดและปริมาณสัมพัทธ์ของธาตุ ซึ่งมักตรวจพบคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก ร่วมกับธาตุแคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg), ซิลิกอน (Si), เหล็ก (Fe) และกำมะถัน (S) ขณะที่เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffractometer, XRD) ใช้ระบุชนิด

ของสารประกอบผลึก รวมถึงการเกิดเฟสผลึกใหม่หลังผ่านกระบวนการให้ความร้อนเช่นการเผาแคลไซน์ (Calcination) ส่วนเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning electron microscope, SEM) ช่วยให้เห็นโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวที่มีความพรุนและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญต่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุพรุนในงานดูดซับหรือเป็นสารตั้งต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ในบรรดาสารประกอบผลึกที่เกิดขึ้นภายในกากสาหร่าย ผลึกไพไรต์ (Pyrite) และมาเคอไซด์ (Marcasite) ถือเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญเนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่โดดเด่น เช่น ความเสถียรทางความร้อน สมบัติกึ่งตัวนำ และพฤติกรรมทางแม่เหล็กไพไรต์ มักเป็นเฟสที่เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูงภายใต้สภาวะรีดิวซ์ และมีความน่าสนใจในงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS, XRD และ SEM จึงมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ โครงสร้างผลึก และลักษณะพื้นผิวของกากสาหร่าย

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาการนำกากสาหร่ายพวงองุ่นที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดของแข็งตัวของเหลวในงานวิจัยก่อนหน้านี้ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ (Calcination) ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษาปริมาณธาตุ โครงสร้างผลึก และลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่ได้ โดยมุ่งหวังให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านฟิสิกส์วัสดุ เช่น วัสดุดูดซับ (Adsorbent) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) หรือเซรามิกชีวภาพ (Bioceramics) ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ในการใช้ทรัพยากรชีวภาพอย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุ

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ กากสาหร่ายพวงองุ่น (*Caulerpa lentillifera* residue) ซึ่งเป็นกากที่เหลือจากกระบวนการสกัดของแข็งตัวของเหลว (Solid-Liquid extraction; SLE) โดยใช้เอทิลแอสซิเตต

(Ethyl acetate) เป็นตัวทำละลาย กากสาหร่ายที่ได้อยู่ในสภาพแห้งและถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น (Figure 1) สำหรับการศึกษาคูณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น การเผาแคลไซน์ (Calcination)



Figure 1 *Caulerpa lentillifera* residue

2.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติของกากสาหร่ายพวงองุ่นได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การชั่งน้ำหนักและการบรรจุ: นำกากสาหร่ายพวงองุ่นมาชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล (Digital balance) ที่มีความละเอียดสูง แล้วบรรจุลงในถ้วยเซรามิก (Ceramic crucible) ซึ่งทนทานต่ออุณหภูมิสูง

2. การเผาแคลไซน์ (Calcination): นำกากสาหร่ายพวงองุ่นที่บรรจุแล้วไปเผาแคลไซน์ ในเตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง, 600°C, 700°C และ 800°C นาน 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศปกติ (ในอากาศ) การเลือกช่วงอุณหภูมิที่หลากหลายนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพของกากสาหร่าย

3. การบดตัวอย่าง: หลังจากผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์ กากสาหร่ายพวงองุ่นที่ได้จะถูกนำมาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร (Mortar and pestle) จนได้ผงละเอียดและสม่ำเสมอพร้อมสำหรับการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป (Figure 2)

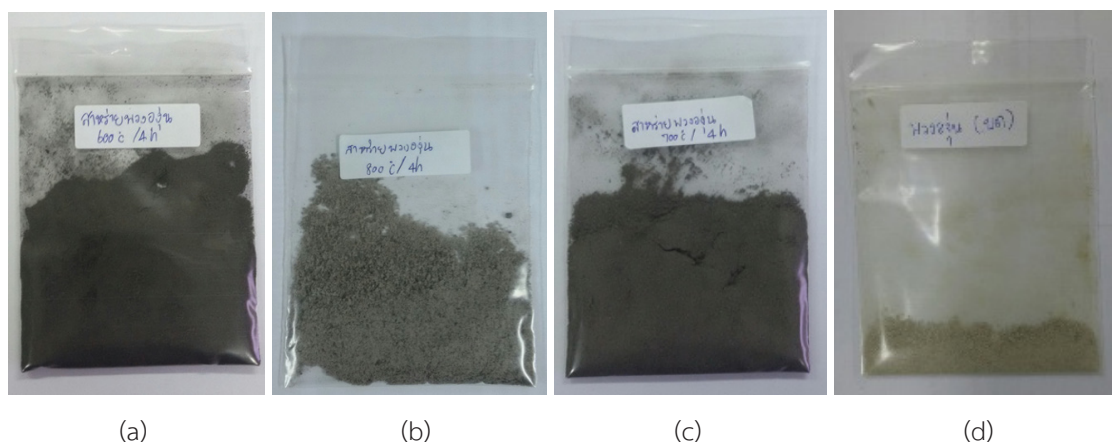


Figure 2 Powders of *Caulerpa lentillifera* residue was calcined at different temperatures. (a) Room temperature (b) 600°C (c) 700°C (d) 800°C

ผงกากสาหร่ายพวงองุ่นที่ผ่านการเตรียมจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่สำคัญ ได้แก่ การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบธาตุ ดำเนินการโดยใช้เครื่องเทคนิคสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (Energy dispersive spectroscopy, EDS) รุ่น INCAx-act (Oxford) เพื่อระบุชนิดและหาปริมาณธาตุองค์ประกอบในตัวอย่าง การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ดำเนินการโดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffractometer, XRD) รุ่น LabX XRD-6100 (Shimadzu) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเฟส โครงสร้างผลึก และระบุสารประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังการเผาแคลไซน์ และการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวดำเนินการโดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-6610LV (JEOL Ltd) เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา โครงสร้างพื้นผิว และขนาดอนุภาค

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

กากสาหร่ายพวงองุ่นเมื่อเผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิห้อง, 600°C, 700°C, 800°C นาน 4 ชั่วโมง ทดสอบลักษณะองค์ประกอบธาตุด้วยเครื่องเทคนิคสเปกโทรสโกปีพลังงานกระจาย (Energy dispersive spectroscopy: EDS) พบว่ากากสาหร่ายพวงองุ่นมีปริมาณธาตุทั้งหมด 15 ชนิด คือ คาร์บอน (Carbon, C), ออกซิเจน (Oxygen, O), คลอรีน (Chlorine, Cl), โซเดียม (Sodium, Na), แมกนีเซียม (Magnesium, Mg), กำมะถัน (Sulfur, S), ซิลิกอน (Silicon, Si), ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P), อะลูมิเนียม (Aluminium, Al), แคลเซียม (Calcium, Ca), โพแทสเซียม (Potassium, K), เหล็ก (Iron, Fe), แมงกานีส (Manganese, Mn), ไม่ระบุชนิด (Not identified, N) และไม่ระบุชนิด (Not identified, I)

การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบธาตุมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการเผาแคลไซน์อย่างมีนัยสำคัญ (Table 1) โดยพบว่าองค์ประกอบหลักที่ตรวจพบในกากสาหร่ายพวงองุ่นที่ไม่ผ่านการเผา ได้แก่ ปริมาณธาตุ C และ O สูงถึง 47.15%wt และ 31.74%wt ตามลำดับ

Table 1 Elemental composition of *Caulerpa lentillifera* residue calcined at various temperatures as determined by EDS

Elements	Quantities of elements (%wt)			
	Temperature of calcination (°C)			
	Room temperature	600	700	800
C	47.15	51.77	6.82	7.67
Cl	4.68	26.13	46.51	48.03
O	31.74	13.78	12.75	8.31
Na	1.34	6.56	29.18	29.25
Mg	0.66	0.64	1.58	1.1
S	0	0.34	0.52	0.36
Si	0	0	0.35	0.46
P	0	0	0.2	0.28
Al	0.59	0	0.21	0.21
Ca	0.58	0.77	1.05	1.34
K	0.41	0	0.83	2.6
N	11.31	0	0	0
I	1.54	0	0	0
Fe	0	0	0	0.2
Mn	0	0	0	0.19

อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ปริมาณของ C และ O ลดลงอย่างชัดเจน เหลือเพียง 7.67%wt และ 8.31%wt ที่อุณหภูมิ 800°C สะท้อนถึงการสลายตัวด้วยความร้อนและการระเหยของสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในวัสดุ ในทางกลับกันองค์ประกอบที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ได้แก่ ปริมาณธาตุ Cl และ Na โดยพบว่าปริมาณของ Cl เพิ่มขึ้นจาก 4.68%wt ในภากรายพวงอุ้งนไม่เผาเป็น 48.03%wt ที่อุณหภูมิ 800°C ขณะที่ Na เพิ่มขึ้นจาก 1.34%wt เป็น 29.25%wt ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบปริมาณธาตุ S ตั้งแต่อุณหภูมิ 600°C ขึ้นไป และธาตุ Fe และ Mn ปรากฏชัดเจนที่อุณหภูมิ 800°C แสดงให้เห็นว่าธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเผาแคลไซน์มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุของภากรายพวงอุ้งน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. [5] ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาแบบไพโรไลซิสต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของถ่านชีวภาพที่ได้จากมูลสุกร พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณ C, H และ O ลดลงอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการสลายตัวและการระเหยของสารอินทรีย์ในรูปของสารระเหยและก๊าซ ในขณะที่ปริมาณธาตุในรูปสารประกอบอินทรีย์ เช่น Na และ Cl มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงถึงการสะสมตัวของแร่ธาตุทนความร้อนในโครงสร้างถ่านชีวภาพเมื่อผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงและสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bahri et al. [6] ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ต่อคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของซีเมนต์จากฟางข้าวโพด พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์สลายตัวและระเหยออกไปการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือ ปริมาณ C และ O ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ธาตุที่ไม่ระเหย เช่น Na และ Ca มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามลำดับที่อุณหภูมิสูง ซึ่งยืนยันว่ากระบวนการเผาแคลไซน์ช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ของธาตุที่ต้องการได้

3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ภากรายพวงอุ้งนเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิอุณหภูมิห้อง, 600°C, 700°C, 800°C นาน 4 ชั่วโมง ทดสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction: XRD) โดยใช้รังสีเอกซ์ของ CuK_α ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) ได้รูปแบบการเลี้ยวเบน (Figure 3) พบว่าลักษณะการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของภากรายพวงอุ้งนเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C นาน 4 ชั่วโมง สอดคล้องกับค่ามาตรฐานของไพไรต์ (Pyrite) FeS_2 : JCPDS 42-1340 โดยเฉพาะพีคที่ตำแหน่ง $2\theta \approx 28.5^\circ, 33.1^\circ, 37.1^\circ, 40.8^\circ, 47.4^\circ$ และ 56.3° สามารถระบุระนาบผลึกหลักได้เป็น (111), (200), (220) และ (311) แสดงถึงการเกิดผลึกของ FeS_2 ที่มีโครงสร้างระบบคิวบิก (Cubic phase) อย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาแคลไซน์เป็นอุณหภูมิ 700°C, 800°C นาน 4 ชั่วโมง พบว่าความเข้มของพีคเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะพีคคมชัดมากขึ้นแสดงถึงระดับของการตกผลึก (Crystallinity) ที่สูงขึ้นและไม่พบพีคของเฟสอื่น เช่น มาร์คาไซต์ (Marcasite) หรือ แมกนีไทต์ (Magnetite) Fe_3O_4 บ่งชี้ว่าสภาวะการเผาแคลไซน์ในงานวิจัยนี้ยังคงส่งเสริมการคงอยู่ของเฟส FeS_2 เพียงเฟสเดียว จึงกล่าวได้ว่าภากรายพวงอุ้งนเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C, 700°C, 800°C จัดเป็นสารประกอบของ FeS_2 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (Cubic) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Henríquez et al. [7] ที่ศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางของ FeS_2 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลและผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C–600°C สามารถเกิดเฟส FeS_2 ได้อย่างชัดเจนโดยไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นมาร์คาไซต์ ทั้งยังพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิช่วยส่งเสริมให้การตกผลึกของเฟส FeS_2 มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสนับสนุนผลการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ผลที่ไม่พบเฟสมาร์คาไซต์ที่เป็นโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) สอดคล้องกับงานของ Qian et al. [8] ที่ศึกษาการเปลี่ยนรูปของแร่ไพไรต์ (Fe_{1-x}S) ไปเป็นไพไรต์ FeS_2 และ

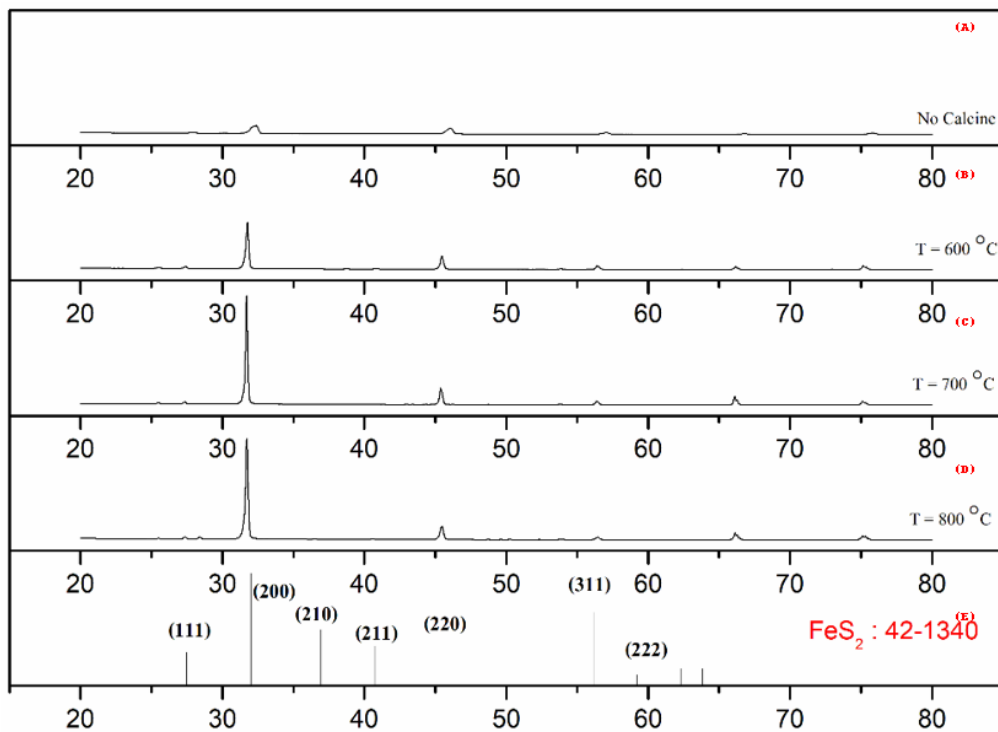


Figure 3 X-ray diffraction of *Caulerpa lentillifera* residue at different temperatures for 4 h.

- (A) No calcination
 (B) Calcined at 600 °C
 (C) Calcined at 700 °C
 (D) Calcined at 800 °C
 (E) Standard diffraction pattern of FeS₂ (JCPDS No. 42-1340)

มาร์คาไซต์ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงที่อุณหภูมิสูงถึง 220°C พบว่าแร่มาร์คาไซต์ มักจะเกิดขึ้นเป็นเฟสหลักหรือเฟสรองเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 150°C) และในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง (pH < 5) ในขณะที่แร่ไพไรต์ จะเป็นผลผลิตหลักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรือในสภาวะที่ไม่เป็นกรดมาก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของกากสาหร่ายพวงองุ่นที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้ทราบระนาบของการเลี้ยวเบนที่ปรากฏคือ (111), (200), (220), (311) และยังสามารถนำระนาบที่ปรากฏไปคำนวณระยะห่างระหว่างอะตอมได้ซึ่งจากข้อมูลกากสาหร่ายพวงองุ่นเผา

แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600°C, 700°C และ 800°C จัดเป็นสารประกอบของไพไรต์ FeS₂ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (Cubic) ดังนั้นจึงมีความยาวของแกนทั้ง 3 เท่ากันและทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกันโดย $a = b = c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา นำไปคำนวณโดยใช้สูตรระบบผลึกแบบคิวบิก (Cubic system) แสดงดังสมการ(1) โดย d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก คือ ระยะห่างระหว่างอะตอม (Lattice constant parameter) และ h, k, l คือ ค่าของดัชนีมิลเลอร์ของระนาบที่ขนานกัน ผลการคำนวณแสดงดัง Table 2

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = (h^2 + k^2 + l^2) \frac{1}{a^2} \tag{1}$$

Table 2 Distention amount atom of *Caulerpa lentillifera* residue at different temperatures

Temperature (°C)	Lattice	Average distance between atom (Å)
600	(111), (200), (220), (311)	5.58
700	(111), (200), (220), (311)	5.59
800	(111), (200), (220), (311)	5.58

จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการคำนวณระยะห่างระหว่างอะตอม (Table 2) ไม่เปลี่ยนแปลง อิทธิพลของอุณหภูมิไม่ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคของกากสาหร่ายพวงอุ้งเปลี่ยนแปลง การวิเคราะห์โครงสร้างของกากสาหร่ายทำให้ทราบข้อมูลเชิงคุณภาพแล้วยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณได้ด้วยโดยการคำนวณหาค่าขนาดผลึกเฉลี่ยโดยใช้สมการเชอร์เรอร์

(Scherrer equation) แสดงดังสมการ(2) โดย t คือขนาดผลึกเฉลี่ย มีหน่วยเป็น อังสตรอม (Å) คือ ค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ β คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดของกราฟระฆัง หรือ Full width half maximum (FWHM) มีหน่วยเป็น เรเดียน และ θ คือ มุมของแบรกก (Bragg's angle) มีหน่วยเป็นองศา ผลการคำนวณแสดง Table 3

$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \tag{2}$$

Table 3 The average crystallite size of *Caulerpa lentillifera* residue at different temperatures

Temperature (°C)	Bragg angle $\cos \theta$ (radian)	Crystallite size (nm)
Room temperature	0.00864756	16.68
600	0.00364798	39.49
700	0.00274069	52.56
800	0.00331898	43.41

ผลการคำนวณขนาดผลึกเฉลี่ย (Table 3) แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ 600°C มีขนาดผลึกเฉลี่ย 39.49 nm อุณหภูมิ 700°C มีขนาดผลึกเฉลี่ย 52.56 nm และ อุณหภูมิ 800°C มีขนาดผลึกเฉลี่ย 43.41 nm การคำนวณขนาดผลึกเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น อิทธิพลของอุณหภูมิ ทำให้ขนาดผลึกเฉลี่ยของกากสาหร่ายพวงองุ่นเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น (Figure 4) สามารถกล่าวได้ว่าการวิเคราะห์โครงสร้างของกากสาหร่ายพวงองุ่นด้วยวิธีการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้เกิดผลึกของไฟไรต์ FeS_2 ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (Cubic)

3.3 ผลการวิเคราะห์สภาพพื้นผิว

ลักษณะของกากสาหร่ายพวงองุ่นเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ไม่เผา), 600°C, 700°C และ 800°C นาน 4 ชั่วโมง ทดสอบด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning electron microscope, SEM) (Figure 5) ผลการวิเคราะห์พบว่า ลักษณะสภาพพื้นผิวของกากสาหร่ายพวงองุ่นเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ไม่ผ่านการเผา) พื้นผิวของกาก

สาหร่ายพวงองุ่นมีลักษณะของเส้นใยคล้ายเซลลูโลส บ่งบอกถึงองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous) ที่ยังไม่เกิดการจัดเรียงตัวเชิงผลึกอย่างชัดเจน เมื่ออุณหภูมิการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้นเป็น 600°C สภาพพื้นผิวเริ่มเปลี่ยนจากลักษณะเส้นใยไปสู่การรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กในรูปของก้อนผลึก มีการลดลงของความขรุขระ และเริ่มเกิดการตกผลึกบางส่วน ที่อุณหภูมิ 700°C โครงสร้างผลึกมีลักษณะเรขาคณิตที่เด่นชัดมากขึ้น แสดงถึงกระบวนการตกผลึกที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยพื้นผิวมีแนวโน้มเรียบเนียน และมีการจัดเรียงตัวของผลึกเพิ่มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 800°C โครงสร้างผลึกมีลักษณะเป็นก้อนเด่นชัดมากขึ้น ลักษณะผลึกเริ่มแสดงรูปทรงที่สม่ำเสมอและสมมาตร พื้นผิวของผลึกมีลักษณะหยาบ ขรุขระ ไม่เรียบเนียน โดยผลึกที่เกิดขึ้นอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (Cubic system) ตามที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ซึ่งยืนยันการเกิดผลึกของไฟไรต์ FeS_2

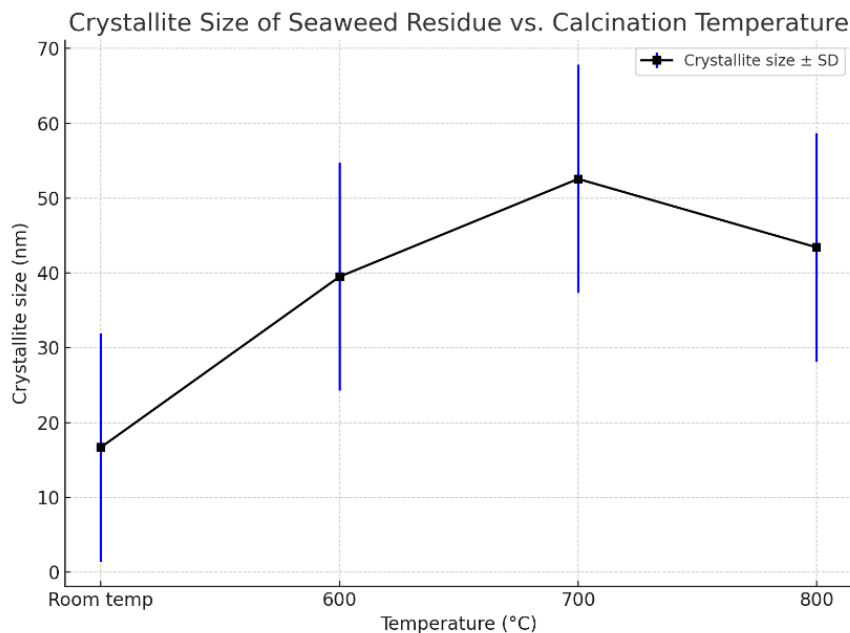


Figure 4 The average crystallite size of *Caulerpa lentillifera* residue at different temperatures

การเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้างพื้นผิวจาก ลักษณะเส้นใย (Amorphous-like structure) ไปสู่การ ก่อตัวของผลึกขนาดเล็กและมีลักษณะเรขาคณิต (Crystalline phase) แสดงให้เห็นถึงบทบาทของ กระบวนการเผาแคลไซน์ในการควบคุมการตกผลึกของ โลหะในอากาศสำหรับพวงอุ้งโดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. [9] ที่ศึกษา ผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ต่อความสามารถในการ ดูดซับสารหนูของตะกอนที่ผ่านการเผา พบว่าการเพิ่ม อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจากอลูมินาในรูปแบบอสัณฐาน (Amorphous) ไปสู่ผลึกแกมมา-อะลูมินา ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) ที่มีโครงสร้างรูพรุน และพื้นที่ผิวสูงชันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก โดยเฉพาะ สารหนูอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงงานวิจัยของ ของ Ferreira et al. [10] ที่ศึกษาการเตรียมและการเพิ่มความหนาแน่นของไฟไรต์ (FeS_2) ในรูปแบบแท่งขนาดใหญ่ (Bulk form) พบว่าการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงช่วย เพิ่มความเข้มของผลึกของ FeS_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสัญญาณ XRD ที่คมชัดและแข็งแรงบ่งชี้ถึงการเกิด ผลึกที่ดีขึ้น

4. สรุปผลวิจัย

การศึกษาลของการเผาแคลไซน์ต่ออากาศ สำหรับพวงอุ้งที่อุณหภูมิห้อง, 600°C, 700°C และ 800°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิการเผา มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบธาตุ โครงสร้างผลึก และสภาพ พื้นผิว จากข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่าอากาศ สำหรับพวงอุ้งที่ไม่ผ่านการเผามีคาร์บอน (C) และ ออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงสุดคือ 47.15%wt และ 31.74%wt ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึง การคงอยู่ของสารประกอบอินทรีย์ เมื่ออุณหภูมิการเผา แคลไซน์เพิ่มขึ้นถึง 800°C ปริมาณคาร์บอน (C) และ ออกซิเจน (O) ลดลง เหลือเพียง 7.67%wt และ 8.31%wt ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณธาตุคลอรีน (Cl) และโซเดียม (Na) เพิ่มขึ้นอย่างมากโดย Cl เพิ่มจาก 4.68%wt เป็น 48.03%wt และ Na เพิ่มจาก 1.34%wt

เป็น 29.25%wt บ่งชี้ว่าสารประกอบเหล่านี้มีความ เสถียรที่อุณหภูมิสูงและมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากการ สลายตัวด้วยความร้อนของสารอินทรีย์ และยังพบธาตุ เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน ที่อุณหภูมิ 800°C แสดงให้เห็นว่าธาตุเหล่านี้เป็น องค์ประกอบอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่หลังจากการสลาย ตัวด้วยความร้อนของสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ยังยืนยันว่าการเพิ่ม อุณหภูมิส่งผลให้ธาตุเหล่านี้รวมตัวกันและก่อตัวเป็นแร่ โลหะที่มีโครงสร้างผลึก ซึ่งปรากฏเป็นค่าพีคที่ชัดเจนตรง เฟสไฟไรต์ FeS_2 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (Cubic) โดยมีระนาบผลึกหลัก ได้แก่ (111), (200), (220), และ (311) สอดคล้องกับ FeS_2 : JCPDS 42-1340 และความเข้มของพีคยังเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น แสดงถึงการตกผลึกที่ดีขึ้น ไม่มีการตรวจพบเฟสอื่น เช่น marcasite หรือเฟสออกไซด์ของเหล็ก แสดงว่าการเผา แคลไซน์ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้อย่างคงส่งเสริมการคงอยู่ของ เฟส FeS_2 ได้ดี และผลการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วย กล้อง SEM แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่ เพิ่มขึ้นส่งผลต่อโครงสร้างพื้นผิว โดยที่อุณหภูมิห้องพบ ลักษณะเส้นใยคล้ายเซลลูโลส บ่งชี้ถึงโครงสร้างแบบ ออสัณฐาน (Amorphous) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600°C และ 700°C โครงสร้างพื้นผิวเริ่มเปลี่ยนไปเป็นผลึกขนาดเล็กที่มีความชัดเจนและสม่ำเสมอมากขึ้น และที่ 800°C โครงสร้างผลึกเด่นชัดในรูปทรงเรขาคณิตแบบคิวบิกของ แร่ FeS_2 ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่สนับสนุนงบประมาณการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เลิศลอยปัญญาชัย สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือการเลี้ยวเบนของรังสี เอกซ์ (XRD) ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

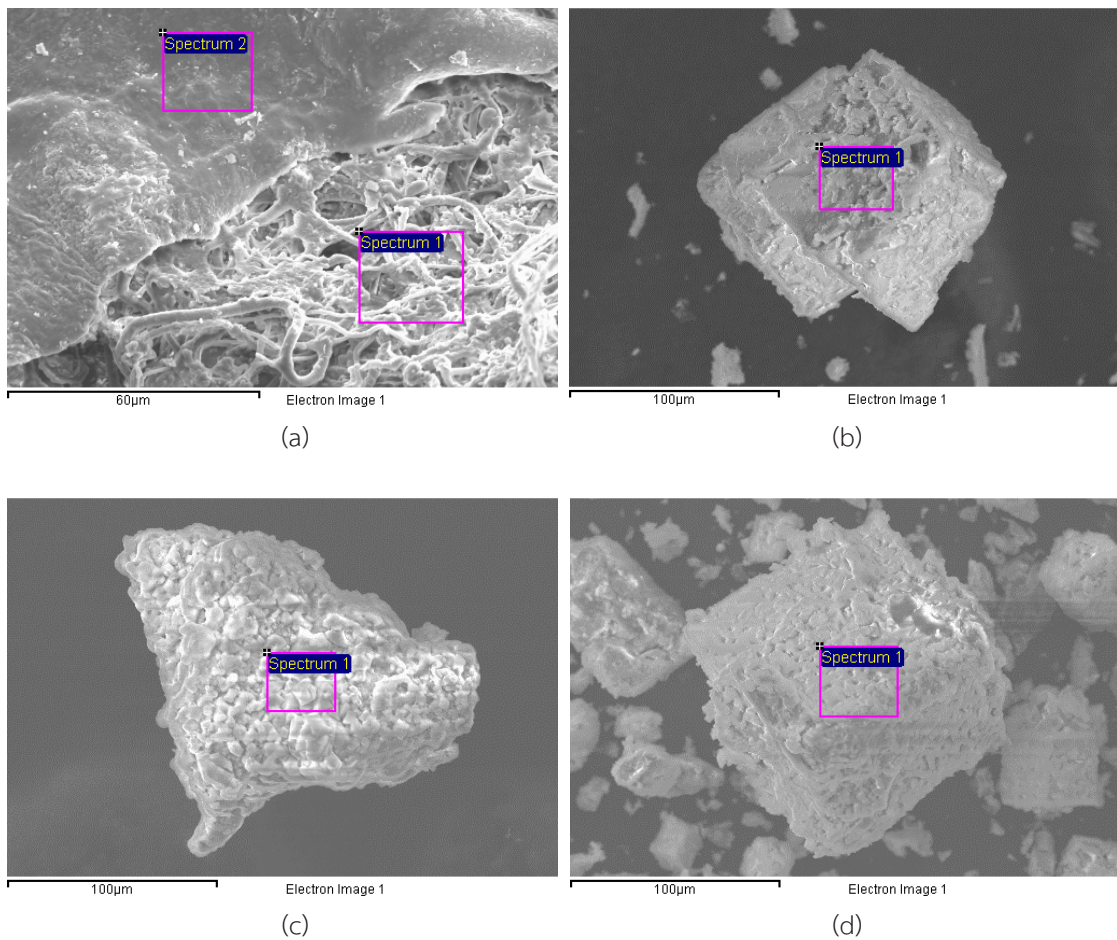


Figure 5 Morphology of *Caulerpa lentillifera* residue at different temperatures for 4 h.

(A) Room temperature

(B) Calcined at 600 °C

(C) Calcined at 700 °C

(D) Calcined at 800 °C

6. References

- [1] Mekasuk, C. and Thammaphiphol, S., 2017, Creating value added for *Caulerpa lentillifera* from upstream to downstream, J. Bus. Adm. Vis. (BAMJ). 9(2): 68-80. (in Thai)
- [2] Lertsongkram, A., Seaweeds Government Pharmaceutical Organization, Available Source: <https://www2.gpo.or.th/Portals/6/Newsletter/RDINewsYr23No2-4.pdf>, December 14, 2024. (in Thai)
- [3] Joshi, S., Kumari, R. and Upasani, V.N., 2018, Applications of algae in cosmetics: An overview, Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. 7(2): 1269-1278.
- [4] Chantree, P., Martviset, P., Sornchuer, P., Thongsepee, N., Sangpairoj, K., Meemon, K., Niamnont, N., Tamtin, M. and Sobhon, P., 2023, Ethyl acetate extract of *Halymenia durvillei* induced apoptosis, autophagy, and cell cycle arrest in colorectal cancer cells, J. Food Sci. Nutr. 28(1): 69.
- [5] Wang, K., Peng, N., Lu, G. and Dang, Z., 2020, Effects of pyrolysis temperature and holding time on physicochemical properties of swine-manure-derived biochar, Waste Biomass Valori. 11: 613-624.
- [6] Bahri, S., Upadhyay, R. and Harshwardhan, H., 2024, The effect of calcination temperature on the chemical and physical properties of corn straw ash, Int. J. Humanit. Soc. Sci. Manag. (IJHSSM). 4(4): 1062-1065.
- [7] Henríquez, R., Muñoz, E., Soto, G. and Mora, E., 2016, Single phase FeS₂ (pyrite) thin films prepared by combined electrodeposition and hydrothermal low temperature techniques, Int. J. Electrochem. Sci. 11: 4966-4978.
- [8] Qian, G., Xia, F., Joël, B., William M, S., Bei, J., Chen, G. and Allan, P., 2011, Replacement of pyrrhotite by pyrite and marcasite under hydrothermal conditions up to 220 °C: An experimental study of reaction textures and mechanisms, Am. Mineral. 96 (11-12): 1878-1893.
- [9] Kim, G., Ryu, J., Ryu, T., Kim, H.-I., Shin, J. and Cho, D.-W., 2024, Effects of calcination temperature on the adsorption ability of polyaluminum chloride (PAC) sludge-derived granules for As(V), J. Water Process Eng. 57: 104688.
- [10] Ferreira, H.M., Lopes, E.B., Malta, J.F., Ferreira, L.M., Casimiro, M.H., Santos, L.F., Pereira, M.F., Moço, D. and Gonçalves, A.P., 2021, Preparation and densification of bulk pyrite, FeS₂, J. Phys. Chem. Solids. 159: 110296.