

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาวัสดุชีวภาพเลียนแบบรากหญ้าทะเลเคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยาทาง
แสงสำหรับการตรึงคาร์บอนในระบบนิเวศทางทะเล

Development of a Biomaterial Mimicking Seagrass Roots Coated
with a Photocatalyst for Carbon Sequestration in Marine
Ecosystems

กัญญากัด เหมือนมี¹, รุจิรนนท์ ลีสุขสาม^{1*}, พรพรรณ โฉมวงษ์¹, สายธาร สาลีผล¹

¹โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย สุพรรณบุรี อำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี 72110

Kanyapak Maunmee¹, Rujiranan Leesuksam^{1*}, Pornpan Chomwong¹,
Saythan Saleephol¹

¹ Princess Chulabhorn Science High School Suphan Buri, Song Phi Nong, Suphan Buri 72110, Thailand

*Corresponding author

E-mail address: seagrass.carbonproject@gmail.com

Received: 29/03/2026; Revised: 25/04/2026; Accepted: 30/05/2026

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
ไมซีเลียม ภาวะกรดในทะเล สารเร่งปฏิกิริยาทางแสง แคลเซียมคาร์บอเนต วัสดุชีวภาพ	การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากกิจกรรมของมนุษย์ส่งผลให้มหาสมุทรดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ซึ่งแม้จะช่วยชะลอภาวะโลกร้อนแต่กลับก่อให้เกิดภาวะกรดในทะเล ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่สร้างโครงสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต เช่น หอย ปะการัง และสัตว์ทะเลเปลือกแข็ง รวมถึงระบบนิเวศหญ้าทะเลที่มีบทบาทสำคัญในการกักเก็บคาร์บอน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุชีวภาพจากไมซีเลียมเลียนแบบโครงสร้างรากหญ้าทะเล และศึกษาประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำให้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อลดผลกระทบของภาวะกรดในทะเล วัสดุชีวภาพถูกพัฒนาจากการเพาะไมซีเลียมบนฟางข้าวร่วมกับเปลือกหอยบด เพื่อสร้างโครงสร้างพรุนคล้ายรากหญ้าทะเล จากนั้นนำวัสดุฐานไปประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ได้แก่ สาร CaO สารคอมโพสิต CaO/TiO ₂ และ สารคอมโพสิต CaO/TiO ₂ -ZnO โดยทำการทดสอบในน้ำปราศจากไอออนและน้ำทะเลจำลองที่มีการเติมแหล่งคาร์บอนไดออกไซด์และกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ถูกประเมินจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ผลการทดลองพบว่าไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตและยึดเกาะฟางข้าวและเปลือกหอยได้ดี โดยฟางข้าวที่

มีขนาดเล็กและอัตราส่วนฟางข้าวต่อเปลือกหอยที่เหมาะสมช่วยให้เกิดโครงสร้างวัสดุที่แข็งแรงและสม่ำเสมอ ในส่วนของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง พบว่าสารแคลเซียมออกไซด์สามารถเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบคาร์บอเนตได้ และเมื่อใช้ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะในระบบน้ำทะเลจำลอง ซึ่งปรากฏสัญญาณของหมู่คาร์บอเนตอย่างชัดเจนจากผลการวิเคราะห์ FT-IR

KEYWORDS

Mycelium
Ocean acidification
Photocatalyst
Calcium carbonate
Biomaterial

ABSTRACT

The increasing concentration of carbon dioxide in the atmosphere due to human activities has led to significant absorption of CO₂ by the oceans. Although this process helps mitigate global warming, it results in ocean acidification, which adversely affects marine organisms that rely on calcium carbonate structures, such as mollusks, corals, and shell-forming marine species. It also impacts seagrass ecosystems, which play a crucial role in carbon sequestration. This study aims to develop a biomaterial derived from mycelium that mimics the root structure of seagrass, and to investigate the efficiency of photocatalysts in converting dissolved carbon dioxide into calcium carbonate, with the goal of mitigating the effects of ocean acidification. The biomaterial was fabricated by cultivating mycelium on rice straw combined with ground seashells to form a porous structure resembling seagrass roots. The resulting base material was then integrated with photocatalysts, including CaO, CaO/TiO₂ composites, and CaO/TiO₂-ZnO composites. Experiments were conducted in both de-ionized water and simulated seawater systems supplemented with a carbon dioxide source and activated under ultraviolet (UV) light. The efficiency of CO₂ conversion was evaluated through functional group analysis using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). The results demonstrated that the mycelium successfully grew and effectively bound to both rice straw and seashell particles. Smaller straw particle size and an optimal straw-to-shell ratio contributed to a stronger and more uniform material structure. Regarding photocatalytic performance, calcium oxide was found to effectively convert CO₂ into carbonate compounds. Furthermore, its combination with titanium dioxide and zinc oxide significantly enhanced the conversion efficiency, particularly in the simulated seawater system, where distinct carbonate functional group signals were observed in the FT-IR analysis.

1. บทนำ

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งการเผาไหม้ เชื้อเพลิง การตัดไม้ทำลายป่า และกิจกรรมอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งมหาสมุทรทำหน้าที่เป็นแหล่งดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใหญ่ที่สุดในโลก โดยดูดซับได้

มากกว่าหนึ่งในสี่ของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่ถูกปล่อยออกมาในบรรยากาศ ถึงแม้การดูดซับของมหาสมุทรจะสามารถลดความรุนแรงของภาวะโลกร้อนได้ แต่กลับส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาใหม่ที่เรียกว่า ภาวะกรดในทะเล (ocean acidification) ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศในทะเลอย่างกว้างขวาง เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แตกตัวในน้ำทะเลจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับไอออนคาร์บอเนต จึงเกิดการเพิ่มขึ้นของกรดคาร์บอนิก และการลดลงของไอออนคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารประกอบหลักของเปลือก และโครงสร้างแข็งของสิ่งมีชีวิตในทะเลจำนวนมาก ผลกระทบที่ตามมาทำให้สิ่งมีชีวิตที่สร้างเปลือกแข็ง (calcifying organisms) เช่น ปู กุ้ง หอยชนิดต่าง ๆ รวมถึงปะการัง เป็นต้น มีความยากลำบากในการสร้างและคงสภาพเปลือก หรือโครงสร้างไว้ได้ มีการเจริญเติบโตช้าลง อัตราการมีชีวิตลดลง และเสี่ยงต่อการถูกกลืนมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร และเศรษฐกิจชุมชนชายฝั่งที่พึ่งพาการประมงสัตว์ทะเลเหล่านี้ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อหนึ่งในระบบธรรมชาติที่มีบทบาทสำคัญในการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในทะเลคือ ระบบนิเวศหญ้าทะเล (seagrass ecosystem) (Apostoloumi et al., 2021; Kaewsrihaw et. Al., 2022) ซึ่งสามารถกักเก็บคาร์บอนในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดคาร์บอนในน้ำ และชะลอผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แต่เนื่องด้วยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากขึ้น และอุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้ระบบนิเวศหญ้าทะเลมีจำนวนลดลงมากหากไม่มีมาตรการรองรับ หรือไม่มีการรับมือกับปัญหาเหล่านี้จะส่งผลกระทบอย่างหนักเมื่อรวมกับภาวะกรดในทะเล

จากการศึกษาเกี่ยวกับไมซีเลียมซึ่งเป็นเครือข่ายเส้นใยของเชื้อราที่มีความแข็งแรง สามารถเจริญเติบโตบนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว เป็นต้น นับเป็นวัสดุชีวภาพที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Tahir et al., 2024) โครงสร้างตามธรรมชาติของไมซีเลียมมีลักษณะพรม น้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปได้ตามต้องการ คุณสมบัติเหล่านี้เอื้อต่อการประยุกต์ใช้ในระบบนิเวศ โดยเฉพาะการเลียนแบบรากหญ้าทะเลซึ่งทำหน้าที่ดูดซับคาร์บอน (Hawkins et al., 2023; Livne et al., 2022) และป้องกันการพัดพาของตะกอนใต้ทะเล ปัญหาภาวะกรดในทะเลที่รุนแรงขึ้นจากการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวทางแก้ไขจากงานวิจัยด้านโฟโตคาทาไลซิสซึ่งชี้ให้เห็นว่าสารกึ่งตัวนำอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ (Zou et al., 2023) สามารถใช้พลังงานจากแสงเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำให้กลายเป็นสารประกอบคาร์บอเนตที่มีเสถียรภาพได้ แต่หากมีเพียงไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ จึงศึกษาเพิ่มเติมพบว่าแคลเซียมออกไซด์มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาให้คาร์บอนกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสามารถหาได้จากเปลือกหอยที่ผ่านการเผา (Fatimah et al., 2018) รวมถึงได้มีการเพิ่มซิงค์ออกไซด์ (Jiang et al., 2021) เพิ่มเติมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำงานร่วมกันของแคลเซียมออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ เสริมเปลือกหอยบดลงในวัสดุฐานไมซีเลียม เปลือกหอยบดไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตไม่เพียงช่วยเพิ่มน้ำหนักและความคงตัวให้กับวัสดุ แต่ยังมียบทบาทเสริมในการปรับสมดุลความเป็นกรด-เบสเพื่อให้ไมซีเลียมมีสภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุชีวภาพสำหรับการใช้งานในทะเลโดยใช้ไมซีเลียมที่เลี้ยงบนฟางข้าวเป็นวัสดุฐานเลียนแบบรากหญ้าทะเลเคลือบด้วยแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่ผสมกับวัสดุอื่น (Parsafard et al., 2024) คือ แคลเซียมออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เสริมด้วยซิงค์ออกไซด์ เพื่อสร้างวัสดุที่มีคุณสมบัติในดักจับคาร์บอนในน้ำทะเล และเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบนิเวศ ทำให้ลดคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำทะเล และปรับสมดุลความเป็นกรด-เบสช่วยลดผลกระทบของภาวะกรดในทะเลที่กำลังคุกคามสิ่งมีชีวิตเปลือกแข็งชนิดต่าง ๆ

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การศึกษาการเจริญเติบโตของไมซีเลียมและการพัฒนาวัสดุชีวภาพ

2.1.1 การศึกษาการเจริญเติบโตของไมซีเลียมภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโครงสร้างวัสดุชีวภาพจากไมซีเลียมให้มีลักษณะคล้ายรากหญ้าทะเล เพื่อใช้เป็นโครงสร้างฐานของวัสดุ

ก. การทำแม่พิมพ์ทำการออกแบบรูปทรงรากหญ้าทะเลโดยใช้โปรแกรม SketchUp และพิมพ์ต้นแบบด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ จากนั้นนำชิ้นงานต้นแบบมาทำแม่พิมพ์ยางพาราในบล็อกสี่เหลี่ยม โดยทาสีสนิบริเวนผิวแม่พิมพ์เพื่อให้สามารถแกะออกได้ง่าย เทยางพาราลงที่ละด้านเพื่อสร้างแม่พิมพ์แบบประกบ

b. การขึ้นรูปวัสดุเตรียมฟางข้าวและเปลือกหอย โดยนำฟางข้าวไปนึ่งฆ่าเชื้อเป็นเวลา 30 นาที และตัดให้มีขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร ส่วนเปลือกหอยนำไปล้างทำความสะอาดและต้มเป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดกลิ่นและฆ่าเชื้อ จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C แล้วบดให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรง 400 mesh และผ้าขาวบางเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ นำวัสดุทั้งสองชนิดมาผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของฟางข้าวต่อเปลือกหอยในแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ขนาดของฟางข้าว	อัตราส่วนฟางข้าว : เปลือกหอย
ชุดที่ 1	ฟางข้าวตัด 1 ซม.	2 : 1
ชุดที่ 2	ฟางข้าวปั่น	2 : 1
ชุดที่ 3	ฟางข้าวตัด 1 ซม.	1 : 1
ชุดที่ 4	ฟางข้าวปั่น	1 : 1

หลังจากนั้นนำส่วนผสมแต่ละชุดคลุกเคล้าให้เข้ากันใส่ไมซีเลียมลงในส่วนผสมในอัตราส่วน 1 : 3 และบรรจุส่วนผสมลงในแม่พิมพ์ ปิดด้วยกระดาษกรองและเจาะรูเพื่อให้อากาศถ่ายเท นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 25 วัน เพื่อให้ไมซีเลียมเจริญเติบโตและยึดเกาะวัสดุจนเกิดโครงสร้างที่แข็งแรงเมื่อครบกำหนด นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหยุดการเจริญของไมซีเลียมและเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ

2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบผง

2.2.1 การเตรียมสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

นำเปลือกหอยนางรมบดไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงและผ้าขาวบางเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคสม่ำเสมอ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ หลังจากนั้นปล่อยให้เย็น บดให้ละเอียด และเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เครื่อง Raman Spectrometer และเครื่อง XRD

2.2.2 การเตรียมสารคอมโพสิตแคลเซียมออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (CaO/TiO₂)

ชั่งแคลเซียมออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 : 1 ผสมในน้ำปราศจากไอออน (De-ionized water: DI) กลั่นและกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C จากนั้นกรองและอบแห้งที่ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเผาที่ 500 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็น บดให้ละเอียด และเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เครื่อง Raman Spectrometer และเครื่อง XRD

2.2.3 การเตรียมสารคอมโพสิตแคลเซียมออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์ (CaO/TiO₂-ZnO)

ชั่งสาร CaO/TiO₂ และซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 2 : 1 จากนั้นผสมและกวนในน้ำ DI เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C จากนั้นกรองและอบแห้งที่ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเผาที่ 500 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็น บดให้ละเอียด และเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR เครื่อง Raman Spectrometer และเครื่อง XRD

2.2.4 การเตรียมน้ำทะเลจำลอง

เตรียมน้ำทะเลจำลองโดยใช้สัดส่วนที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ ศิริภรณ์ และคณะ (2556) โดยชั่งสารเคมี ได้แก่ sodium chloride 23.991 กรัม, potassium chloride 0.742 กรัม, calcium chloride 1.135 กรัม, magnesium chloride 5.102 กรัม, sodium sulfate 4.012 กรัม, sodium bromide 0.085 กรัม, strontium chloride 0.011 กรัม และ carbonic acid 0.027 กรัม แล้วละลายในน้ำ DI 1 ลิตร จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก 30 นาที และวัดค่าความเค็มได้ 34 ppt

2.2.5 การทดสอบประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแบบผงในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต

เตรียมน้ำ DI และน้ำทะเลจำลอง (Sea) อย่างละ 500 มิลลิลิตร เติมน้ำ NaHCO₃ ปริมาณ 0.424 กรัม กวน 30 นาที และแบ่งใส่บีกเกอร์ ๆ ละ 100 มิลลิลิตร เติมสารเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ปริมาณ 0.25 กรัมต่อบีกเกอร์ ดังตารางที่ 2 จากนั้นให้แสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองและเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย FT-IR

ตารางที่ 2 ชนิดของสารในแต่ละชุดการทดลอง

ชนิดของน้ำ	ชนิดของสารในแต่ละชุดการทดลอง		
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
DI	CaO	CaO/TiO ₂	CaO/TiO ₂ -ZnO
Sea	CaO	CaO/TiO ₂	CaO/TiO ₂ -ZnO

2.3 การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุชีวภาพไมซีเลียมเคลือบสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตแบบผงแล้ว นำสารเร่งปฏิกิริยาทางแสงทั้ง 3 ชนิด มาทำสารเคลือบ โดยเริ่มจากซังผง PVA 5 กรัม ผสมในน้ำ DI 150 มิลลิลิตรกวนและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นซังผงสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง 0.5 กรัม และนำไปกวนให้สารมีอนุภาคสม่ำเสมอเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปเคลือบบนวัสดุไมซีเลียมด้วยแปรงและนำชิ้นงานที่เคลือบแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อนำไปทดสอบโดยใช้วิธีการทดสอบดังชุดการทดสอบประสิทธิภาพของผงสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การศึกษาการเจริญเติบโตของไมซีเลียมภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

การศึกษากการเจริญเติบโตของไมซีเลียมภายใต้สภาวะการเลี้ยงที่แตกต่างกัน เพื่อพัฒนาโครงสร้างวัสดุชีวภาพให้มีลักษณะคล้ายรากหญ้าทะเลสำหรับใช้เป็นโครงสร้างฐานวัสดุ ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 25 วัน โดยทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเจริญเติบโตของเชื้อไมซีเลียมภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

ขนาดของฟางข้าว ต่อเปลือกหอย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Mean ± S.D.
ฟางข้าวตัด 1 ซม. (2:1)	3	4	3	3.33 ± 0.58
ฟางข้าวปั่น (2:1)	4	5	4	4.33 ± 0.58
ฟางข้าวตัด 1 ซม. (1:1)	2	3	3	2.67 ± 0.58
ฟางข้าวปั่น (1:1)	4	3	3	3.33 ± 0.58

หมายเหตุ: คะแนนการเจริญเติบโตของเชื้อไมซีเลียมกำหนดดังนี้

1 = เจริญเติบโตได้น้อยมาก (เส้นใยปกคลุมน้อยกว่า 30%) , 2 = เจริญเติบโตได้น้อย (เส้นใยปกคลุม 30–50%)

3 = เจริญเติบโตปานกลาง (เส้นใยปกคลุม 50–70%) , 4 = เจริญเติบโตดี (เส้นใยปกคลุม 70–90%)

5 = เจริญเติบโตดีมาก (เส้นใยปกคลุมมากกว่า 90%)

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อไมซีเลียมภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบขนาดฟางข้าวและอัตราส่วนฟางข้าวต่อเปลือกหอย พบว่าการเจริญเติบโตของเชื้อไมซีเลียมมีความแตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ฟางข้าวปั่น (2:1), ฟางข้าวตัด 1 ซม. (2:1), ฟางข้าวปั่น (1:1) และ ฟางข้าวตัด 1 ซม. (1:1) ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean ± S.D.) เท่ากับ 4.33 ± 0.58, 3.33 ± 0.58, 3.33 ± 0.58 และ 2.67 ± 0.58 ตามลำดับ โดยคำนวณจากสมการที่ (1) และ (2)

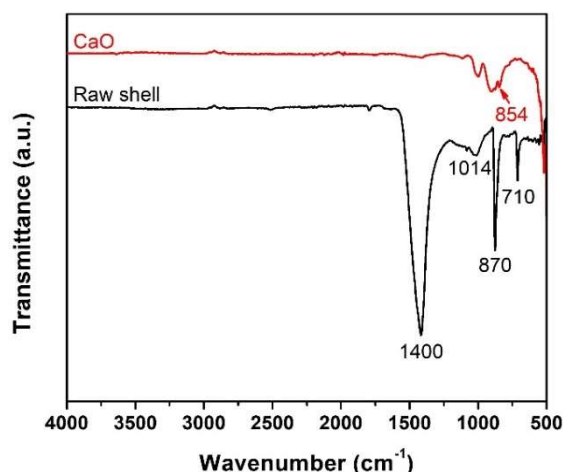
$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (1)$$

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

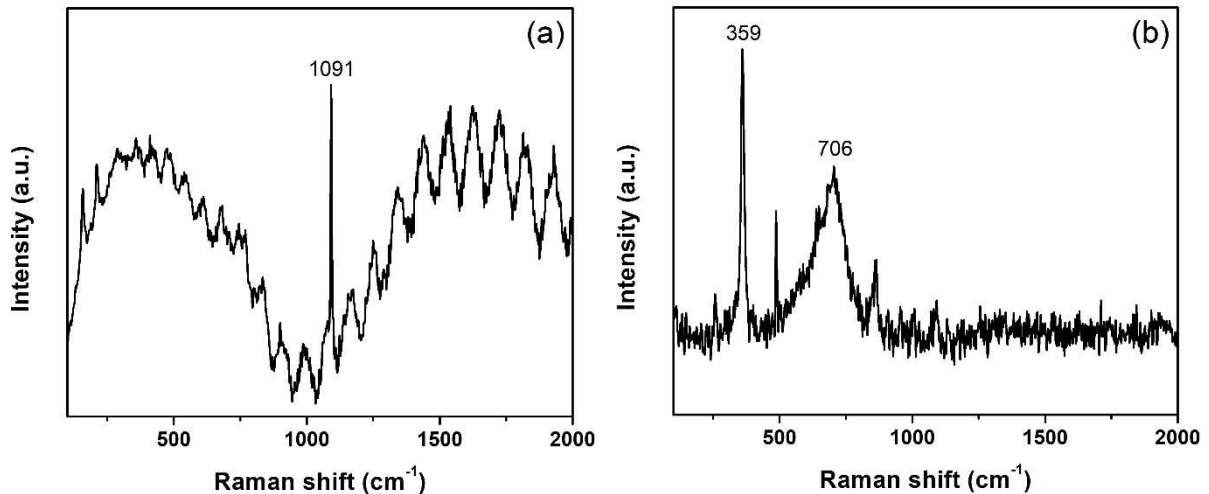
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของสารเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ

3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ CaO

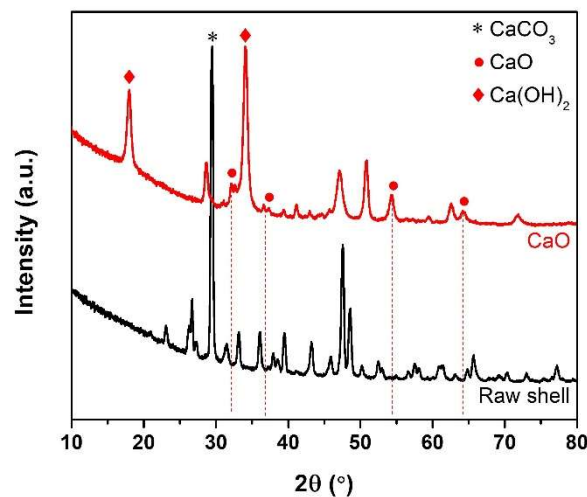
จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของเปลือกหอยนางรมดิบ (Raw shell) ดังภาพที่ 1 ปรากฏพิคการสั่นแบบ asymmetric stretching ของพันธะ C-O ในหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) อย่างชัดเจน ณ ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1400 cm^{-1} ร่วมกับพิคที่ตำแหน่ง 870 cm^{-1} และ 710 cm^{-1} ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เมื่อนำเปลือกหอยนางรมผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าพิค CaCO_3 หายไปเกือบทั้งหมด และปรากฏพิคในช่วงเลขคลื่น 854 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ Ca-O บ่งชี้ถึงการสลายตัวเชิงความร้อนของ CaCO_3 ไปเป็น CaO (Habte et al., 2019) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy โดยพบว่าตัวอย่างเปลือกหอยนางรมดิบก่อนการเผาในภาพที่ 2(a) ปรากฏพิคเด่นที่ตำแหน่งประมาณ 1091 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นแบบ symmetric stretching ของหมู่ CO_3^{2-} ที่เป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง CaCO_3 (Fernández-Manteca et al., 2025) ภายหลังการเผาในภาพที่ 2(b) พบว่าพิคที่ตำแหน่ง 1091 cm^{-1} หายไปอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ถึงการสลายตัวทางความร้อนของ CaCO_3 ไปเป็น CaO ตามปฏิกิริยา calcination อย่างไรก็ดี ในสเปกตรัมของตัวอย่างหลังเผาปรากฏพิคใหม่ที่ตำแหน่ง 359 cm^{-1} ซึ่งเป็นอัตลักษณ์ของพันธะ Ca-O (Galván-Ruiz et al., 2007; Wang et al., 2024) สอดคล้องกับ defect-induced Raman mode ของ CaO ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก เช่น oxygen vacancies หรือ lattice distortion นอกจากนี้ยังพบพิคที่ตำแหน่ง 706 cm^{-1} ของการสั่น calcium carbonate poly-morphs aragonite (Arroyo Loranca et al., 2023) ซึ่งแสดงถึงการคงเหลือของ CaCO_3 บางส่วน บ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฟสจาก CaCO_3 ไปเป็น CaO ยังไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีลักษณะเป็นระบบผสม (mixed phase) ระหว่าง CaO และ CaCO_3 นอกจากนี้การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ในภาพที่ 3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบ Cubic ของ CaO ตามมาตรฐาน JCPDS No. 37-1497 (Wu et al., 2023; Zhang et al., 2019) โดยพบพิคการเลี้ยวเบนหลักที่ตำแหน่ง 32.2° , 37.3° , 53.8° และ 64.1° มีการตรวจพบพิคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) หรือเฟส Portlandite ที่ตำแหน่ง 18.1° และ 34.1° แทรกเข้ามาเล็กน้อย (Huh et al., 216) ซึ่งเป็นผลจากสมบัติความชอบน้ำสูงของ CaO ที่ดูดซับความชื้นในบรรยากาศทำให้เกิด hydration ของ CaO ภายหลังการเผา และส่งผลให้ตัวอย่างมีลักษณะเป็น multi-phase system เมื่อเปรียบเทียบกับ CaO กับ Raw shell พบว่าโครงสร้าง CaCO_3 มีการเปลี่ยนเฟสไปอย่างชัดเจน จากความเข้มสัญญาณที่สูงและลักษณะพิคที่แหลมคมยืนยันได้ว่า CaO ที่สังเคราะห์จากวัสดุเหลือทิ้งนี้มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาเป็นวัสดุคอมโพสิตในลำดับถัดไป



ภาพที่ 1 สเปกตรัม FT-IR เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีระหว่างเปลือกหอยนางรมดิบ (Raw shell) และผงแคลเซียมออกไซด์หลังการเผา (CaO)



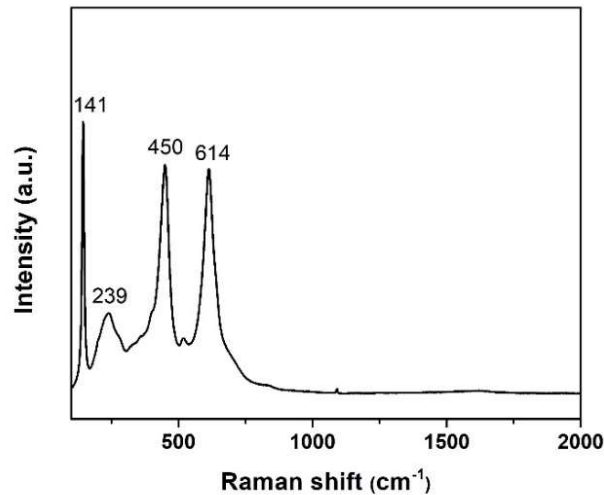
ภาพที่ 2 สเปกตรัมรามาน (Raman spectroscopy) ของ (a) เปลือกหอยนางรมดิบ และ (b) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม



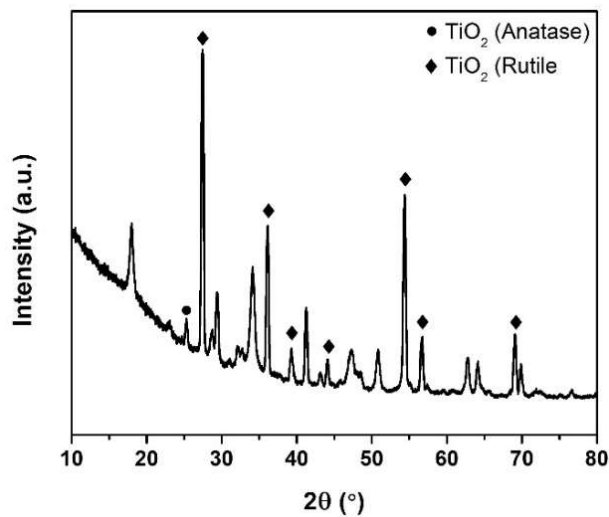
ภาพที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของผงแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ CaO/TiO_2

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) ในภาพที่ 4 ที่แสดงพีกเอกลักษณ์เด่นชัดของ Anatase- TiO_2 (E_g mode) ตำแหน่ง 141 cm^{-1} ร่วมกับการสั่นที่ 450 และ 614 cm^{-1} (Kumar et al., 2016) นอกจากนี้ การตรวจพบสัญญาณในช่วง 239 cm^{-1} ช่วยยืนยันการคงอยู่ของเฟส CaO และอนุพันธ์ขณะที่การความกว้างของพีกบริเวณ 450 และ 614 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการทับซ้อนบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างโครงสร้างหลักทั้งสองซึ่งสามารถยืนยันการสังเคราะห์สารคอมโพสิตที่มีการกระจายตัวของเฟสอย่างสม่ำเสมอ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างของสารคอมโพสิตแคลเซียมออกไซด์บนตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์ (CaO/TiO_2) ด้วยเทคนิคการหักเหของรังสีเอกซ์ (XRD) ดังแสดงใน ภาพที่ 5 ยืนยันการมีอยู่ของ TiO_2 ในองค์ประกอบวัสดุอย่างชัดเจน โดยปรากฏพีคการหักเหที่สำคัญที่มุม 2θ ประมาณ 25.3° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึกของ TiO_2 โครงสร้างเฟส Anatase (Ahmed et al., 2025) ร่วมกับพีกเด่นที่ตำแหน่ง 27.4° , 37.8° , และ 53.9° ซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างเฟส Rutile (Hossain & Ahmed, 2023) บ่งบอกความเป็นเฟสผสม



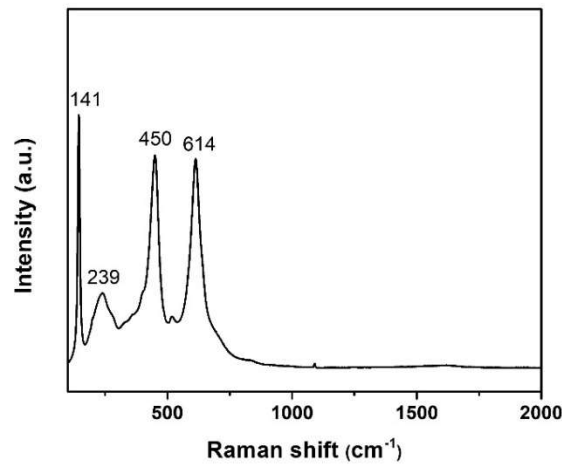
ภาพที่ 4 สเปกตรัมรามาน (Raman spectroscopy) ของแคลเซียมออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ (CaO/TiO₂)



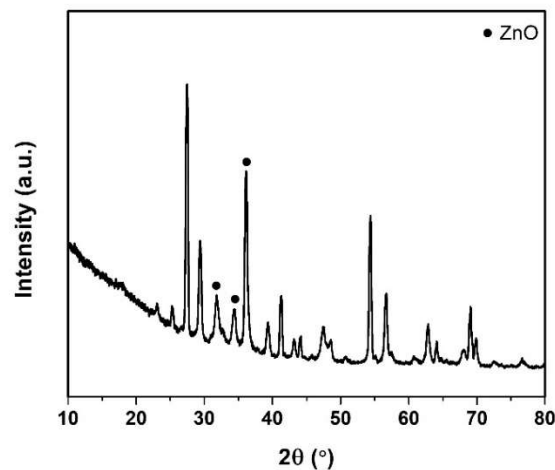
ภาพที่ 5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแคลเซียมออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ (CaO/TiO₂)

3.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของ CaO/TiO₂-ZnO

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของสารคอมโพสิตแคลเซียมออกไซด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์-ซิงค์ออกไซด์ (CaO/TiO₂-ZnO) ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ดังแสดงในภาพที่ 6 ปรากฏสัญญาณพีกเด่นที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 141, 450, 614 cm⁻¹ คล้ายกับโครงสร้าง CaO/TiO₂ ซึ่งอาจเกิดจากการซ้อนทับกันของสัญญาณระหว่าง TiO₂ และ ZnO บ่งชี้ถึงการเกิดการทับซ้อนกันบริเวณพื้นผิวสัมผัส และการรวมตัวกันอย่างมีประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิต เมื่อวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในภาพที่ 7 ปรากฏพีกการเลี้ยวเบนเฉพาะตัวของ ZnO โครงสร้าง Wurtzite ที่ 31.7°, 34.4°, 36.2° (Naufal et al., 2024) ที่สามารถยืนยันการมีอยู่ของ ZnO ร่วมกับโครงสร้าง CaO และ TiO₂ ได้ การอยู่ร่วมกันของเฟสทั้งสามชนิดสนับสนุนการสร้างโครงสร้างรอยต่อต่างชนิด ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดอัตราการรวมตัวกลับของประจุ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปเพื่อเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 6 สเปกตรัมรามาน (Raman spectroscopy) ของแคลเซียมออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ (CaO/TiO₂-ZnO)



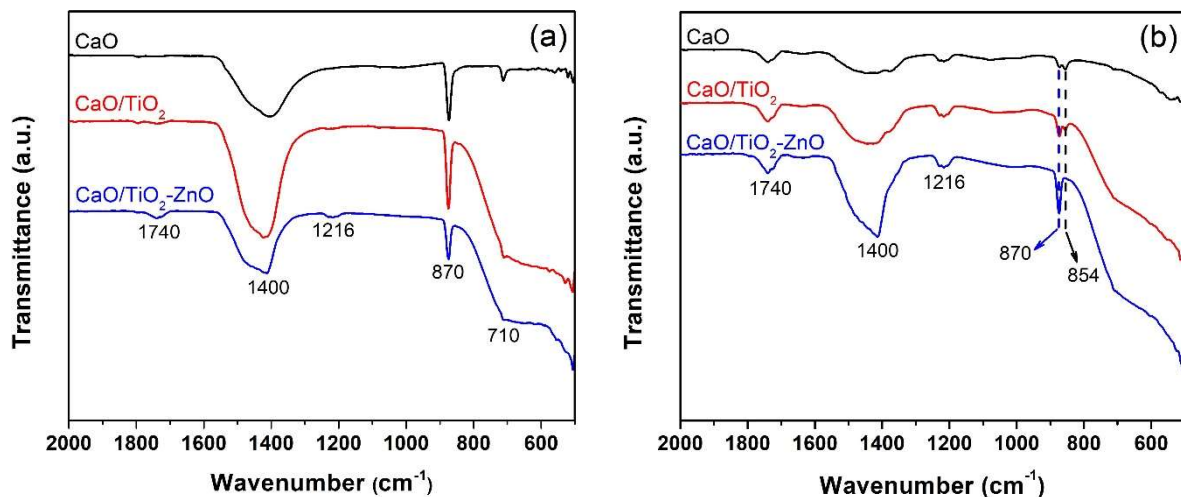
ภาพที่ 7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของแคลเซียมออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ (CaO/TiO₂-ZnO)

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต

3.3.1 ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

จากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ของตัวเร่งปฏิกิริยาภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตเปรียบเทียบระหว่างสภาวะน้ำ DI และน้ำทะเลจำลอง ภาพที่ 8(a) แสดงผล FTIR ของการทดสอบในน้ำ DI พบว่าสารเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดมีพีคที่ตำแหน่งประมาณ 710-870 cm⁻¹ ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) (Diningsih & Rohmawati, 2022; Torres-Mansilla et al., 2023) ซึ่งสะท้อนถึงการส่งเสริมจากกลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) ในการกระตุ้นการเปลี่ยนรูปคาร์บอนให้ตกตะกอนเป็น CaCO₃ บนผิวของสารเร่งปฏิกิริยา เมื่อสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสง ($h\nu$) จะเกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน (e^-) และโฮล (h^+) ดังสมการ (3) จากนั้นคู่อิเล็กตรอนและโฮลเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำดังสมการ (4) และ (5) ทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาต่ออนุมูลต่าง ๆ ในสมการ (6-12) เพื่อแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำให้ตกตะกอนเป็น CaCO₃ ในที่สุด นอกจากนี้ที่ตำแหน่งพีค 1400 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นแบบ asymmetric stretching ของ CO₃²⁻ ยังสนับสนุนการเกิดหมู่คาร์บอเนต แต่ความกว้างและลักษณะของพีคดังกล่าวบ่งชี้ว่าบางส่วนของคาร์บอเนตอาจยังอยู่ในรูปของ surface carbonate ที่ยังไม่ตกผลึกอย่างสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาสาร CaO/TiO₂-ZnO พบพีคเพิ่มเติมที่ 1216 และ 1740 cm⁻¹ โดยพีคที่ 1216 cm⁻¹ สามารถระบุได้ว่าเป็นหมู่ไบคาร์บอเนต (HCO₃⁻) ซึ่งเป็น intermediate ในกระบวนการแปรสภาพ CO₂ ขณะที่พีคที่

1740 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C=O ของ species ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น (activated CO_2) การปรากฏของพีคทั้งสองตำแหน่งนี้สะท้อนว่าระบบของสารประกอบ $\text{CaO}/\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ ไม่เพียงแต่สามารถดักจับ CO_2 ได้เท่านั้น แต่ยังสามารถกระตุ้น CO_2 ให้เข้าสู่สถานะที่พร้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับและแปรสภาพคาร์บอนสูงกว่าสารเร่งปฏิกิริยา CaO และ CaO/TiO_2 สำหรับภาพที่ 8(b) ซึ่งเป็นผลการทดสอบในน้ำทะเลจำลอง พบว่าสารเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดแสดงพีคที่ 870, 1216, 1400 และ 1740 cm^{-1} อย่างเด่นชัด และมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบในน้ำ DI สะท้อนให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมที่มี HCO_3^- อยู่แล้วช่วยส่งเสริมทั้งกระบวนการดูดซับและการแปรสภาพ CO_2 ได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในตัวอย่าง CaO และ CaO/TiO_2 ปรากฏพีคที่ 854 cm^{-1} ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็น surface carbonate ที่ยังไม่พัฒนาเป็น CaCO_3 ที่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม ตัวอย่าง $\text{CaO}/\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ ไม่ปรากฏพีคดังกล่าว แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเปลี่ยนผ่านจาก intermediate ไปสู่ CaCO_3 เกิดขึ้นได้สมบูรณ์ยิ่งกว่าในสภาวะน้ำทะเลจำลองที่มีแหล่งคาร์บอนในรูปของ HCO_3^- ปริมาณสูง ซึ่งเอื้อต่อการเกิดกระบวนการ adsorption-activation-precipitation อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สามารถแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำไปเป็น CaCO_3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าวัสดุอื่น

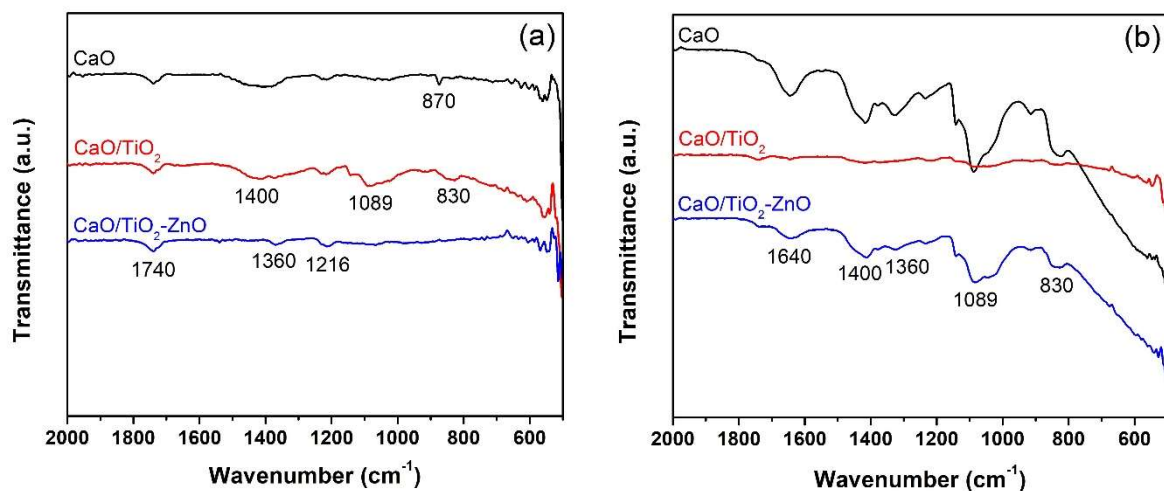


ภาพที่ 8 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ของ CaO , CaO/TiO_2 และ $\text{CaO}/\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ ภายหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาในสภาวะ (a) น้ำ DI และ (b) น้ำทะเลจำลอง

3.3.2 ผลการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้วัสดุชีวภาพไมซีเลียมเคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

จากการพัฒนาวัสดุชีวภาพจากไมซีเลียมที่มีโครงสร้างเลียนแบบรากหญ้าทะเลโดยอาศัยแม่พิมพ์จากเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ขึ้นรูปโครงสร้างฐานของวัสดุจากการบ่มไมซีเลียมร่วมกับฟางข้าวและเปลือกหอยในอัตราส่วนที่เหมาะสมตาม ตารางที่ 3 และนำไปทดสอบประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตภายใต้สภาวะน้ำ DI

และน้ำทะเลจำลองผลการวิเคราะห์สารเร่งปฏิกิริยาภายหลังการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของสารประกอบ CaCO_3 ดังภาพที่ 9(a) สารเร่งปฏิกิริยาที่ทดสอบในน้ำ DI แสดงพีกที่ตำแหน่ง $830\text{--}870\text{ cm}^{-1}$ และ 1089 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่คาร์บอเนตในโครงสร้าง CaCO_3 ที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุ ขณะที่พีกที่ 1216 cm^{-1} สัมพันธ์กับหมู่ HCO_3^- ซึ่งเป็นชนิดสารตัวกลาง (intermediate species) ในกระบวนการแปรสภาพ CO_2 ในน้ำ ส่วนช่วงพีกที่ $1360\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ CO_3^{2-} สะท้อนการก่อตัวของคาร์บอเนตที่ยึดเกาะอยู่บนพื้นผิว (surface carbonate) และพีกที่ตำแหน่ง 1740 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ C=O ของ activated CO_2 ผลลัพธ์ดังกล่าวบ่งชี้ว่ากระบวนการ photocatalysis สามารถแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ DI เป็น CaCO_3 ได้ เมื่อทดสอบในน้ำทะเลจำลองภายหลังการทดสอบพบพีกดังภาพที่ 9(b) ในลักษณะคล้ายกับการทดสอบในน้ำ DI และมีพีกเพิ่มเติมที่ตำแหน่ง 1645 cm^{-1} ซึ่งโดดเด่นสำหรับตัวอย่างวัสดุ CaO และ $\text{CaO/TiO}_2\text{-ZnO}$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลง HCO_3^- ที่เพิ่มมากขึ้นในกระบวนการแปรสภาพ CO_2 ในน้ำให้เป็น CaCO_3 บนพื้นผิววัสดุโฟโตคะตะลิสต์ บ่งบอกว่าวัสดุชีวภาพจากไมซีเลียมซึ่งมีโครงสร้างเลียนแบบรากหญ้าทะเลที่เคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา CaO และ $\text{CaO/TiO}_2\text{-ZnO}$ สามารถทำหน้าที่เป็นทั้งโครงสร้างรองรับ (scaffold) และตัวช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับ CO_2 ควบคู่กับการเร่งปฏิกิริยาดังแสง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำไปเป็น CaCO_3 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความเข้มของพีก FTIR พบว่าการทดสอบในน้ำทะเลจำลองให้สัญญาณของหมู่คาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตที่เข้มข้นกว่าน้ำ DI อย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับและแปรสภาพ CO_2 ในสภาวะน้ำทะเลนั้นสูงกว่า อันเนื่องมาจากการมีอยู่ของไบคาร์บอเนตและสมดุลคาร์บอเนตในระบบที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 9 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR ของวัสดุชีวภาพจากไมซีเลียมที่มีโครงสร้างเลียนแบบรากหญ้าทะเลเคลือบด้วยสารกระตุ้นเชิงแสง CaO , CaO/TiO_2 และ $\text{CaO/TiO}_2\text{-ZnO}$ ภายหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยา photocatalysis ในสภาวะ (a) น้ำ DI และ (b) น้ำทะเลจำลอง

4. บทสรุป

สรุปผลการศึกษาพบว่า การพัฒนานวัตกรรมวัสดุชีวภาพจากไมซีเลียมที่มีโครงสร้างเลียนแบบรากหญ้าทะเลเพื่อใช้เป็นฐานรองรับสารเร่งปฏิกิริยาดังแสงในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบคาร์บอเนตที่เสถียร โดยผลการศึกษาด้านการเจริญเติบโตของไมซีเลียมพบว่า สภาวะที่ใช้ฟางข้าวป่นผสมกับเปลือกหอยบดละเอียดในอัตราส่วน 2:1 ส่งเสริมการขยายตัวของเส้นใยได้ดีที่สุด โดยมีค่าคะแนนการเจริญเติบโตเฉลี่ยสูงสุดที่ 4.33 ± 0.58 ซึ่งเส้นใยไมซีเลียมสามารถยึดเกาะวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและประมงจนเกิดเป็นโครงสร้างฐานหลังผ่านการอบที่ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในส่วนของการสังเคราะห์สารเร่งปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR, Raman และ XRD ยืนยันได้ว่าสารแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เตรียมจากเปลือกหอยนางรมเผาที่ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีความบริสุทธิ์สูงและเมื่อนำมาพัฒนาเป็นสารคอมโพสิตแบบไตรภาค $\text{CaO/TiO}_2\text{-ZnO}$ จะเกิดโครงสร้างรอยต่อต่างชนิดที่สมบูรณ์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญที่ช่วยลดอัตราการรวมตัวกลับของประจุ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนสูงกว่าสารเดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญ

โดยเฉพาะเมื่อทดสอบในสภาวะน้ำทะเลจำลอง พบการปรากฏของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ที่สะท้อนโครงสร้าง CaCO_3 บริเวณเลขคลื่น $830\text{--}870\text{ cm}^{-1}$ และ 1089 cm^{-1} ที่มีความเข้มของสัญญาณที่ชัดเจนกว่าในน้ำ DI ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Ion Effect ในการเสริมการตกตะกอนบนพื้นผิววัสดุชีวภาพที่เคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการวิจัยในอนาคตอาจมีการศึกษาความทนทานของโครงสร้างโมซีเลียมต่อการกัดเซาะของกระแสน้ำในระยะยาวและการทดสอบในระบบนิเวศทางทะเลจริง เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและประสิทธิภาพในการลดภาวะความเป็นกรดของมหาสมุทร (Ocean acidification) ซึ่งการวิจัยต่อเนื่องในด้านนี้ถือเป็นแนวทางที่สำคัญอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้วัสดุฐานชีวภาพเพื่อการกักเก็บคาร์บอนอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากโครงการประกวดโครงงานของนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ ครั้งที่ 28 (YSC 2026) โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวทรา จันทรสุวรรณ ผู้อำนวยการโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารณราชวิทยาลัย สุพรรณบุรี ในการอำนวยความสะดวกในการทำโครงงาน และขอขอบคุณคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ในความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการวิจัย เครื่องมือวิจัย รวมทั้งวัสดุและอุปกรณ์

นางสาวกัญญากัด เหมือนมี และ นางสาวรุจิรณันท์ ลิขสุขสาม ขอขอบคุณ นางสาวพรพรรณ โฉมวงษ์ และ นางสาวสายธาร สาสีผล ครูที่ปรึกษาโครงงาน ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขจุดบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้โครงงานชิ้นนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณคณาจารย์ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ชาววิทยาศาสตร์จุฬารณราชวิทยาลัย สุพรรณบุรี ที่คอยให้คำปรึกษา ตลอดจนให้กำลังใจให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงาน ขอขอบพระคุณเป็นพิเศษสำหรับคุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยช่วยเหลือ ห่วงใยและให้กำลังใจจนโครงงานชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ คุณค่าประการใด ๆ ที่พึงมีจากโครงงานชิ้นนี้ คณะผู้จัดทำโครงงานขอมอบเป็นเครื่องสักการบูชาต่อพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

ศิริภรณ์ โคตะมี, เพ็ญพรรณ ศรีสกุลเดียว, และสมสมร แก้วบริสุทธิ์. (2556). องค์ประกอบแร่ธาตุหลักในน้ำทะเลเปรียบเทียบกับ

น้ำเกลือสินเธาว์เพื่อการอนุบาลลูกกุ้งก้ามกราม. *วารสารแก่นเกษตร*, 41(4), 419–424.

Ahmed, S., Shishir, M. K. H., Islam, M. T., Rahaman, M. A., Aman, S., Aidid, A. R., Sadia, S. I., Rana, M. M.,

& Alam, M. A. (2025). Crystallinity integration of anatase (TiO_2) nanocrystal by whole powder pattern fitting (WPPF) method: A Rietveld refinement study. *Results in Materials*, 26, 100673.

<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100673>

Apostoloumi, C., Malea, P., & Kevrekidis, T. (2021). Principles and concepts about seagrasses: Towards a sustainable future for seagrass ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 112936.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112936>

Arroyo Loranca, R. G., Rivera Pérez, C., Hernández Adame, L., Cruz Villacorta, A. A., Rodríguez López, J. L., & Hernández Saavedra, N. Y. (2023). Efecto de iones y concentración de proteína Ps19, una proteína de la concha de *Pteria sterna*, en los polimorfos de carbonato de calcio: Polimorfos de carbonato de calcio en Concha Nácar. *Biocencia*, 25(2), 136–145. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v25i2.1885>

Diningsih, C., & Rohmawati, L. (2022). Synthesis of calcium carbonate (CaCO_3) from eggshell by calcination method. *Indonesian Physical Review*, 5(3), 208–215. <https://doi.org/10.29303/ipr.v5i3.174>

- Fatimah, I., Rahmadiani, Y., & Pudiasari, R. A. (2018). Photocatalyst of perovskite CaTiO_3 nanopowder synthesized from CaO derived from snail shell in comparison with the use of CaO and CaCO_3 . *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 349, 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/349/1/012026>
- Fernández-Manteca, M. G., García García, B., Gómez-Galdós, C., Mirapeix, J., Arniz-Mateos, R., García-Escárcaga, A., Gutiérrez-Zugasti, I., Algorri, J. F., López-Higuera, J. M., Ocampo-Sosa, A. A., Rodríguez-Cobo, L., & Cobo, A. (2025). Structural Pattern Analysis in Patella vulgata Shells Using Raman Imaging. *Applied Sciences*, 15(9), 5180. <https://doi.org/10.3390/app15095180>
- Galván-Ruiz, M., Baños, L., & Rodríguez-García, M. E. (2007). Lime characterization as a food additive. *Sensory and Instrumentation for Food Quality*, 1, 169–175. <https://doi.org/10.1007/s11694-007-9019-8>
- Habte, L., Shiferaw, N., Mulatu, D., Thenepalli, T., Chilakala, R., & Ahn, J. W. (2019). Synthesis of nano-calcium oxide from waste eggshell by sol-gel method. *Sustainability*, 11(11), 3196. <https://doi.org/10.3390/su11113196>
- Hawkins, H.-J., Cargill, R. I. M., Van Nuland, M. E., Hagen, S. C., Field, K. J., Sheldrake, M., Soudzilovskaia, N. A., & Kiers, E. T. (2023). Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool. *Current Biology*, 33(11), R560–R573. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.027>
- Hossain, M. S., & Ahmed, S. (2023). Easy and green synthesis of TiO_2 (anatase and rutile): Estimation of crystallite size using Scherrer equation, Williamson–Hall plot, Monshi–Scherrer model, size–strain plot, and Halder–Wagner model. *Results in Materials*, 20, 100492. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100492>
- Hossain, M. S., Jahan, S. A., & Ahmed, S. (2023). Crystallographic characterization of bio-waste material originated CaCO_3 , green-synthesized CaO and Ca(OH)_2 . *Results in Chemistry*, 5, 100822. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100822>
- Huh, J.-H., Choi, Y.-H., Ramakrishna, C., Cheong, S. H., & Ahn, J. W. (2016). Use of calcined oyster shell powders as CO_2 adsorbents in algae-containing water. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 53(4), 429–434. <https://doi.org/10.4191/kcers.2016.53.4.429>
- Jiang, Q., Han, Z., Yuan, Y., & Cheng, Z. (2021). Preparation and properties of floral CaO/ZnO composite from Achatina fulica snail shell. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 61841–61847. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16260-9>
- Kaewsrihaw, R., Upanoi, T., & Prathep, A. (2022). Ecosystem services and vulnerability assessments of seagrass ecosystems: Basic tools for prioritizing conservation management actions using an example from Thailand. *Water*, 14(22), 3650. <https://doi.org/10.3390/w14223650>
- Kumar, K. A., Subalakshmi, K., & Senthilselvan, J. (2016). Effect of mixed valence state of titanium on reduced recombination for natural dye-sensitized solar cell applications. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 20, 1921–1932. <https://doi.org/10.1007/s10008-016-3191-x>
- Livne, A., Wösten, H. A. B., Pearlmutter, D., & Gal, E. (2022). Fungal mycelium bio-composite acts as a CO_2 -sink building material with low embodied energy. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(37), 12099–12106. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01314>

- Naufal, W. M., Wahyuningsih, S., & Lestari, W. (2024). Investigation of hexanal removal through adsorption and photocatalysis on ZIF-7 modified with ZnO, TiO₂, and ZnO/TiO₂ using ATR-FTIR. *Communications in Science and Technology*, 9(2), 235–242. <https://doi.org/10.21924/cst.9.2.2024.1505>
- Parsafard, N., Abedi, R., & Moodi, H. (2024). Ternary tin-doped titanium dioxide/calcium oxide (Sn–TiO₂/CaO) composite as a photocatalyst for efficient removal of toxic dyes. *RSC Advances*, 14, 19984. <https://doi.org/10.1039/d4ra03641g>
- Tahir, B., Tahir, M., Alraeesi, A., & Kumar, N. (2024). Photocatalytic carbon dioxide reduction with water to CO and CH₄ over bio-sludge modified TiO₂ composite. *Chemical Engineering Transactions*, 113, 193–198. <https://doi.org/10.3303/CET24113033>
- Torres-Mansilla, A., Álvarez-Lloret, P., Fernández-Peñas, R., D’Urso, A., Baldión, P. A., Oltolina, F., Follenzi, A., & Gómez-Morales, J. (2023). Hydrothermal transformation of eggshell calcium carbonate into apatite micro-nanoparticles: Cytocompatibility and osteoinductive properties. *Nanomaterials*, 13(16), 2299. <https://doi.org/10.3390/nano13162299>
- Wang, P., Long, D. M., Zhan, K., Peng, Y., Wang, Y., & Liu, S. (2024). Monitoring CaCO₃ content in recycled polypropylene with Raman spectrometry. *ACS Omega*, 9(22), 23462–23467. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00414>
- Wu, J., Liao, H., Ma, Z., Song, H., & Cheng, F. (2023). Effect of different initial CaO/SiO₂ molar ratios and curing times on the preparation and formation mechanism of calcium silicate hydrate. *Materials*, 16(2), 717. <https://doi.org/10.3390/ma16020717>
- Zhang, Y., Cho, Y., Yamaguchi, A., Peng, X., Miyauchi, M., Abe, H., & Fujita, T. (2019). CO₂ oxidative coupling of methane using an earth-abundant CaO-based catalyst. *Scientific Reports*, 9, 15454. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51817-2>
- Zou, W., Bian, H., Guo, J., Xu, J., & Guo, B. (2023). Preparation of titania–silica composite aerogel at atmospheric pressure and its catalytic performance in the synthesis of poly(butylene succinate). *Materials*, 16(9), 3296. <https://doi.org/10.3390/ma16093296>