



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
เพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโซลาร์เซลล์ และสารเร่งโตของพืช

Continuous Microwave Carbon Dot Synthesis from Agricultural Wastes for
Raw Materials of Solar Cells and Plant Growth Agents

โดย

จิระศักดิ์	ธาระจักร์
ภูมิรัตน์	นวรรตน์
ไพศาล	การถาง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน กันยายน ปี พ.ศ. 2567

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
เพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโซลาร์เซลล์ และสารเร่งโตของพืช

Continuous Microwave Carbon Dot Synthesis from Agricultural Wastes for
Raw Materials of Solar Cells and Plant Growth Agents

โดย

จิระศักดิ์	ธาระจักร์
ภูมิรัตน์	นวรรตน์
ไพศาล	การถาง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน กันยายน ปี พ.ศ. 2567

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ชื่อเรื่อง การสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโซล่าเซลล์ และสารเร่งโตของพืช

ชื่อนักวิจัยตามแผนงานวิจัย

- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1. นายจิระศักดิ์ ธาระจักร์ | หัวหน้าชุดโครงการวิจัย |
| 2. นายภูมิรัตน์ นวรัตน์ | หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยที่ 1 |
| 3. นายไพศาล การถาง | หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยที่ 2 |
| 4. นายจิระศักดิ์ ธาระจักร์ | หัวหน้าโครงการวิจัยย่อยที่ 3 |

แหล่งทุน งบประมาณรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

บทคัดย่อภาษาไทย

คาร์บอนดอท (Carbon dot) เป็นอนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับวัสดุคาร์บอน เช่น ท่อนาโนคาร์บอน กราฟีน เป็นต้น คาร์บอนดอทถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การผลิตโซล่าเซลล์ การพัฒนาการเร่งการเจริญเติบโตของพืช หรืออุปกรณ์ตรวจสอบต่างๆ เป็นต้น คาร์บอนดอทสามารถผลิตได้โดยการสังเคราะห์จากวัสดุเหลือใช้ทางชีวภาพ เช่น เปลือกผลไม้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยกระบวนการไมโครเวฟ เพื่อให้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนดอทได้ในปริมาณมาก โดยระบบที่ถูกออกแบบขึ้นนั้น สามารถช่วยลดเวลาในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนผิวดัตุเป็นอนุภาคคาร์บอนดอท ในการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยกระบวนการไมโครเวฟจากเปลือกผลไม้ โดยศึกษาชนิดของผลไม้ คือ ส้ม มะม่วง กล้วย เงาะ มังคุด และระดับความสุกของผลไม้ที่ส่งผลต่อขนาดและประสิทธิภาพของคาร์บอนดอทเมื่อนำไปใช้ผลิตโซล่าเซลล์ ขนาดของอนุภาคคาร์บอนดอทถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ประสิทธิภาพของคาร์บอนดอทพิจารณาจากกระแสที่เกิดขึ้นจากโซล่าเซลล์ที่ผลิตจากคาร์บอนดอทผลไม้ชนิดต่างๆ จากผลสามารถสรุปในเบื้องต้นว่าชนิดของผลไม้และอายุความสุกของผลไม้ไม่ส่งผลต่อขนาดคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ แต่ส่งผลต่อประสิทธิภาพคาร์บอนดอทเมื่อนำไปใช้ในการผลิตโซล่าเซลล์ และเมื่อศึกษาอิทธิพลของคาร์บอนดอทที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชผักคอสโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพืชที่รดด้วยน้ำและน้ำผสมคาร์บอนดอทร้อยละความเข้มข้น 1 และ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าคาร์บอนดอทมีผลต่อการสังเคราะห์แสงช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช ส่งผลให้น้ำหนักของพืชเพิ่มสูงขึ้น

คำสำคัญ คาร์บอนดอท เปลือกผลไม้ การสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่อง ไมโครเวฟ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ สารเร่งการเจริญเติบโตของพืช

Title Continuous Microwave Carbon Dot Synthesis from Agricultural Wastes
for Raw Materials of Solar Cells and Plant Growth Agents

Name of researcher

- | | | |
|-----------------|----------|--------------------------------|
| 1. Mr. Jirasak | Tharajak | Head of research project |
| 2. Mr. Poomirat | Nawarat | Head of Sub-Research Project 1 |
| 3. Mr. Paisan | Kanthang | Head of Sub-Research Project 2 |
| 4. Mr. Jirasak | Tharajak | Head of Sub-Research Project 3 |

Source of Funding Budget expenditure for fiscal year 2023

Abstract

Carbon dots are carbon particles in the nanometer scale. They are in the same group as carbon nanomaterials such as carbon nanotubes and graphene. Carbon dots are used in various applications such as solar cells, plant fertilizer, or sensing devices. Carbon dots can be synthesized from biowaste materials such as fruits peels. In this research, a continuous carbon dot synthesis system via microwave-assisted method was designed aimed for large quantities synthesis. The designed system can reduce the time during the heating process to convert the raw material powder into carbon dot particles. In addition, this study how the type of fruits peel (oranges, mangosteens, bananas, longans, and mangosteens) and the ripeness of the fruits affected the size of carbon dots and its efficiency when used in solar cells. The size of the carbon dot particles was analyzed using a transmission electron microscope (TEM). The solar cell efficiency was considered from the current generated by solar cells made from various carbon dots synthesized in this work. It was found that within the scope of this work, the type of fruit and the maturity state of the fruit may not affect the size of the carbon dots synthesized using the microwave technique, but they may affect the efficiency of its counterpart solar cells. Finally, the influence of carbon dots on the growth of Cos lettuce plants by considering the change in weight of plants watered with water and water mixed with carbon dots at concentrations of 1 and 2 percent by weight, it was found that carbon dots influenced photosynthesis, helping to increase plant growth, resulting in increased plant weight.

Keyword Carbon Dots, Fruit Peels, Continuous Carbon Dot Synthesis, Microwave, Solar Cells, Plant Growth Agents

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโซลาร์เซลล์และสารเร่งโตของพืช โดยแบ่งออกเป็น 3 โครงการย่อย คือ โครงการย่อยที่ 1 การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการศึกษาถึงกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากผลไม้ภายในประเทศไทย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ โครงการย่อยที่ 2 ต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นการออกแบบระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง เพื่อรองรับการสังเคราะห์คาร์บอนดอทให้ได้ปริมาณสูงในเวลาน้อย และโครงการย่อยที่ 3 อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทเพื่อเพิ่มพัฒนาการเจริญเติบโตของพืช โดยโครงการได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการวิจัยงบประมาณด้าน ววน. ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2566 (ผ่านหน่วยงาน) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) รหัสโครงการ: 4140971 อย่างไรก็ตามโครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับความอนุเคราะห์การวิเคราะห์ทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และบริการ (SISC) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิจัยนี้จะสามารถช่วยส่งเสริมการพัฒนาและแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อไป

คณะผู้วิจัยโครงการ

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 กรอบแนวความคิดในการวิจัย	5
1.6 คำสำคัญของการวิจัย	6
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 คาร์บอนดอท	7
2.2 กระบวนการผลิตคาร์บอนดอท	7
2.3 ระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่อง	12
2.4 คาร์บอนดอทกับการเจริญเติบโตของพืช	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	16
3.1 วิธีการดำเนินการโครงการย่อยที่ 1	16
3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี	17
3.1.2 เครื่องมือ	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
3.1.3 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท	17
3.1.4 การผลิตโซล่าเซลล์ด้วยคาร์บอนดอท	18
3.1.5 การทดสอบวิเคราะห์คาร์บอนดอท	19
3.1.6 การทดสอบวิเคราะห์ประสิทธิภาพโซล่าเซลล์ด้วยคาร์บอนดอท	19
3.2 วิธีการดำเนินการโครงการย่อยที่ 2	20
3.3 วิธีการดำเนินการโครงการย่อยที่ 3	21
บทที่ 4 ผลการวิจัย	22
4.1 ผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 1	22
4.1.1 ผลการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้	22
4.1.2 ประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์คาร์บอนดอท	25
4.2 ผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 2	26
4.2.1 การออกแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ	26
4.2.2 เครื่องสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ	27
4.3 ผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 3	28
4.3.1 ผลการทดลองศึกษาการใช้คาร์บอนดอทกับการเจริญเติบโตของต้นกล้า	28
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	30
5.1 สรุปและอภิปรายผล	30
5.2 ข้อเสนอแนะ	31
บรรณานุกรม	32
ภาคผนวก	34
ประวัติย่อผู้วิจัย	42

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้าที่
1. บทสรุปความสัมพันธ์โครงการในการดำเนินการวิจัย	4
2. แสดงกรอบงานวิจัยการวิจัยและพัฒนา	6
3. แสดงภาพรวมของคาร์บอนดอท	8
4. แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยเทคนิคไมโครเวฟ	8
5. ขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนดอทจากเปลือกส้ม	9
6. การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันทางเคมี เพื่อปรับสมบัติของคาร์บอนดอท	10
7. การเคลื่อนที่ของประจุใน dye-sensitized solar cell	11
8. ระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไฮโดรเทอร์มอลแบบต่อเนื่อง	13
9. ระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง	14
10. อิทธิพลคาร์บอนดอทที่ความเข้มข้น 0.01 – 0.3 mg/mL ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช	15
11. อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง	15
12. ส่วนประกอบโซลาร์เซลล์จากคาร์บอนดอท	18
13. การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์คาร์บอนดอท	19
14. ขนาดอนุภาคคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกผลไม้	23
15. ขนาดอนุภาคคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์เปลือกกล้วยที่สามระดับความสุกด้วยวิธีไมโครเวฟ	24
16. การออกแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ	27
17. เครื่องสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ	27
18. ผลของอนุภาคคาร์บอนดอทที่ส่งผลต่อน้ำหนักต้นอ่อนของผักคอส	28
19. ลักษณะเจริญเติบโตของผักคอสในระยะต้นอ่อน	29
20. ลักษณะเจริญเติบโตของผักคอสในระยะต้นกล้า	29

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
1. ผลการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้	22
2. อนุภาคคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ	23
3. ผลการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้า (μA) จากเปลือกผลไม้ไทย	25
4. ผลการศึกษาค่าความต่างศักย์ (mV) จากเปลือกผลไม้ไทย	26



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แม้ว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมจะได้รับการยอมรับและตระหนักว่าเป็นปัญหาสำคัญทั้งในระดับโลกและระดับประเทศ อันเนื่องมาจากส่งผลกระทบต่อที่ร้ายแรงและเห็นได้ชัดถึงการเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและรุนแรงมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นปัญหาฝุ่น PM 2.5 การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ ซึ่งนำไปสู่การเกิดอุทกภัยที่ทวีความรุนแรงขึ้น แต่ความพยายามในการลดต้นเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันกลับไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากแนวทางในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันยังคงมีต้นทุนทางเศรษฐกิจสูงและลงมือปฏิบัติได้ยาก จึงเป็นที่มาของโมเดลเศรษฐกิจ BCG ที่รัฐบาลสนับสนุนให้มีการใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อเพิ่มศักยภาพทรัพยากรชีวภาพของไทย (Bio Economy) การส่งเสริมให้เกิดการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดอย่างยั่งยืนโดยการหมุนเวียนทรัพยากร (Circular Economy) และการพัฒนาศักยภาพทางเศรษฐกิจที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Economy) ซึ่งแนวคิดนี้จะสำเร็จได้จำเป็นอย่างยิ่งที่ประเทศไทยจะต้องมีการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ที่เหมาะสมอย่างเร่งด่วน เปลือกผลไม้เป็นเศษวัสดุที่ได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปผลไม้ ซึ่งนับเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่หารายได้ให้กับประเทศ ในทางกลับกัน เปลือกผลไม้กลับถูกมองว่าเป็นวัสดุเหลือใช้และมีการนำไปใช้ประโยชน์ต่อยอดได้น้อยหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมเปลือกผลไม้เหล่านี้จะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เนื่องจากองค์ความรู้ในการใช้ประโยชน์จากเปลือกผลไม้ไทยมีอยู่อย่างจำกัด และยังไม่สามารถรับการถ่ายทอดไปสู่การเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ได้ หากมีการพัฒนาองค์ความรู้ที่เหมาะสมในการเพิ่มมูลค่าจากเปลือกไม้ไทยไปสู่สร้างผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้จะเป็นประโยชน์ต่อประเทศไทยเป็นอย่างมาก เพราะเปลือกผลไม้ นับว่าเป็นวัสดุที่มีต้นทุนถูก นอกจากนี้ยังสามารถช่วยในการลดปริมาณขยะโดยการเพิ่มมูลค่าตามแนวคิด BCG อย่างแท้จริง จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า คาร์บอนดอท หนึ่งในวัสดุฉลาดในกลุ่มวัสดุนาโน ซึ่งมีศักยภาพในการต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีขั้นสูงได้ในหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (solar cells) ตัวเก็บประจุคุณภาพสูง (super capacitor) งานภาพถ่ายชีวภาพ (bioimaging) และอื่นอีกมากมาย โดยคาร์บอนดอทสามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุหลากหลายชนิด รวมถึงเปลือกผลไม้ ทำให้คาร์บอนดอทเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมและควรแก่การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้สามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ microwave assisted ซึ่งสามารถกระทำได้ง่ายและรวดเร็วด้วยเตาไมโครเวฟปกติในครัวเรือน แต่การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนดอทได้ในปริมาณที่จำกัด ทำให้ไม่เหมาะแก่การพัฒนาต่อยอดไปสู่การผลิตคาร์บอนดอทในเชิงพาณิชย์ แม้ว่าคาร์บอนดอท

จะมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ทางเทคโนโลยีที่หลากหลาย แต่รายงานการใช้งานคาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ในเทคโนโลยีเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ยังมีอยู่อย่างจำกัด สำหรับการใช้คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้สำหรับเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืชแม้จะมีอยู่มากแต่ยังคงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอีกมากโดยเฉพาะความพยายามในการพัฒนาสารเร่ง การเจริญเติบโตให้เหมาะสมกับพืชกลุ่มเป้าหมาย โจทย์การวิจัยของโครงการวิจัยนี้ คือพัฒนายังยองค์ความรู้ต่อยอดจากประเด็นและข้อจำกัดของการผลิตคาร์บอนดอทและการนำไปใช้ประโยชน์ตามที่กล่าวไปข้างต้นเพื่อเป้าหมายในการพัฒนากระบวนการผลิตที่ครบวงจรของคาร์บอนดอทจากวัสดุเหลือใช้เปลือกผลไม้ไทยไปสู่ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีอย่างเช่น เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์และสารเร่งเจริญเติบโตของพืชต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาองค์ความรู้ในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้เพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีอย่างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์และสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช

1.2.2 พัฒนาระบบการผลิตเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์และสารเร่งการเจริญเติบโตของพืชจากคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกผลไม้

1.2.3 พัฒนาระบบเครื่องผลิตคาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องเพื่อเป้าหมายการต่อยอดสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการย่อยที่ 1

(ภาษาไทย) การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

(ภาษาอังกฤษ) Incorporation of carbon dot derived from Thai fruit peel to increase the efficiency of solar cel

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	เปลือกเงาะ เปลือกส้ม เปลือกมังคุด
กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอท	ไมโครเวฟ ไฮโดรเทอร์มอล
การวิเคราะห์ ทดสอบ	ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนดอทด้วย AFM TEM สมบัติการเรืองแสงด้วย Fluorescent Optical microscope สมบัติทางไฟฟ้าเคมี

โครงการย่อยที่ 2

(ภาษาไทย) ต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

(ภาษาอังกฤษ) A Prototype of a Continuous Microwave Carbon Dot Synthesis System from Agricultural Wast

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	วัสดุทดสอบ เปลือกกล้วย วัสดุทำเครื่อง สแตนเลส 302 ชุดลำเลียงวัสดุทำจากเทปลอน
กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอท	ไมโครเวฟ
การวิเคราะห์ ทดสอบ	ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนดอทด้วย Particle size analysis SEM TEM

โครงการย่อยที่ 3

(ภาษาไทย) อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด

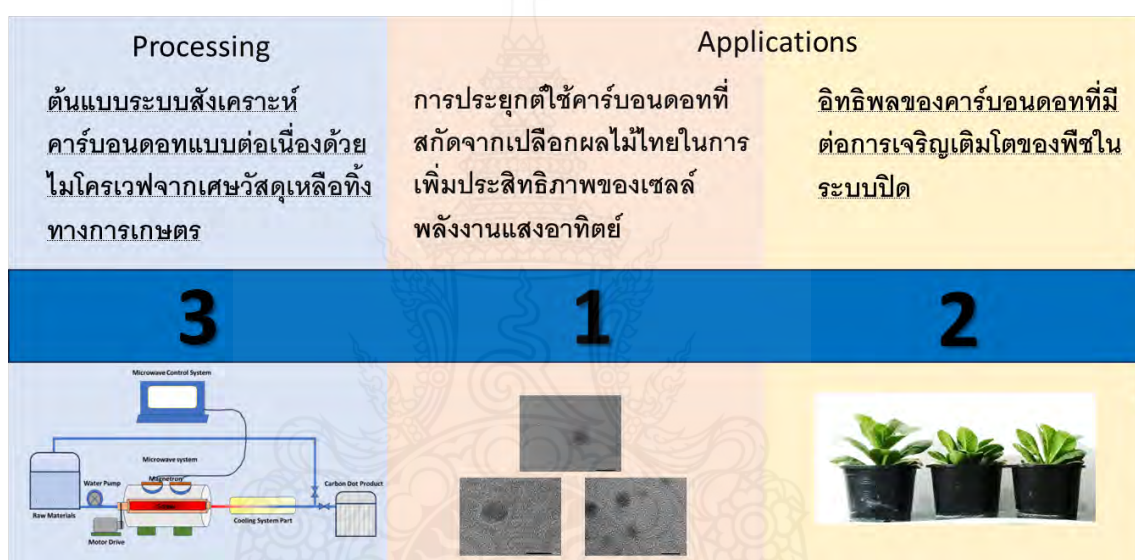
(ภาษาอังกฤษ) Effect of Carbon Dots on growth of indoor plant

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	คาร์บอนดอทขนาด < 10 nm ผักคอส
กระบวนการปลูก ลดน้ำ	น้ำ น้ำ + Carbon dot
การวิเคราะห์ ทดสอบ	ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนดอทด้วย Particle size analysis SEM TEM

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยภายใต้โครงการการสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโซล่าเซลล์และสารเร่งโตของพืช ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นงานวิจัยย่อย 3 คือ โครงการย่อยที่ 1 การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการศึกษาถึงกระบวนการสังเคราะห์

คาร์บอนดอทจากผลไม้ภายในประเทศไทย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ โครงการย่อยที่ 2 ต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นการออกแบบระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง เพื่อรองรับการสังเคราะห์คาร์บอนดอทให้ได้ปริมาณสูงในเวลาสั้น และโครงการย่อยที่ 3 อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทเพื่อเพิ่มพัฒนาการเจริญเติบโตของพืช อย่างไรก็ตามทั้ง 3 โครงการความสัมพันธ์กันดังแสดงรูปที่ 1



รูปที่ 1 บทสรุปความสัมพันธ์โครงการในการดำเนินการวิจัย

โครงการย่อยที่ 1

1. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. สังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ด้วยวิธีการ microwave assisted
3. ปรับปรุงสมบัติของคาร์บอนดอท
4. ทดสอบสมบัติของคาร์บอนดอท
5. พัฒนาต้นแบบเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบไม่มีและมีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบ
6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสองแบบ
7. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการย่อยที่ 2

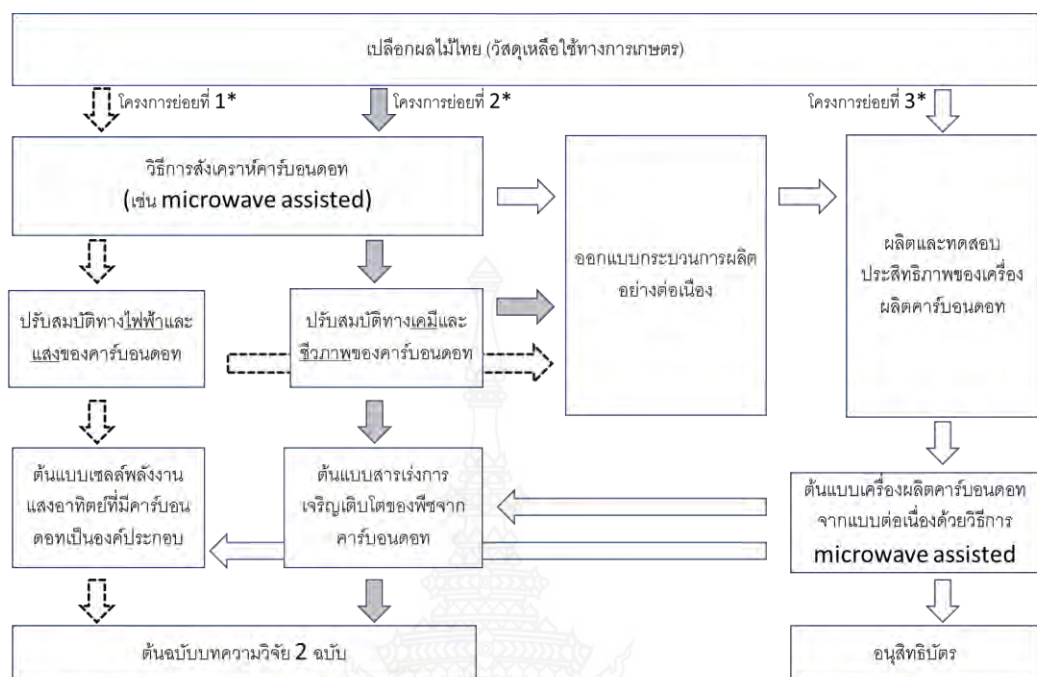
1. การศึกษาข้อมูลพื้นฐานจากวรรณกรรม
2. การจัดซื้อจัดจ้างวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ
3. ผลิตต้นแบบนวัตกรรม
4. การสรุปวิเคราะห์ผลการวิจัย
5. การจัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการย่อยที่ 3

1. การศึกษาข้อมูลพื้นฐานจากวรรณกรรม
2. การจัดซื้อจัดจ้างวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ
3. ทำการทดลองอิทธิพลของคาร์บอนดอทที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช
4. การสรุปวิเคราะห์ผลการวิจัย
5. การจัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 กรอบแนวความคิดในการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยพัฒนาองค์ความรู้และต้นแบบผลิตภัณฑ์เพื่อส่งเสริม การสังเคราะห์ คาร์บอนดอทจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างเปลือกไม้ไทยเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีอย่างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์และสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช โครงการนี้แบ่งออกเป็นโครงการย่อยสามโครงการ โครงการย่อย 1 เน้นการวิจัยองค์ความรู้ การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทยนำไปสู่การพัฒนาต้นแบบเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่มี คาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบ โครงการย่อย 2 เน้นการวิจัยองค์ความรู้การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจาก เปลือกผลไม้ไทยนำไปสู่การพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์สารเร่งการเจริญเติบโตของพืชจากคาร์บอนดอท และโครงการย่อยที่ 3 เน้นวิจัยพัฒนากระบวนการผลิตคาร์บอนที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ นำไปสู่การสร้างต้นแบบเครื่องผลิตคาร์บอนดอทแบบต่อเนื่อง โดยทั้งสามโครงการมีการเชื่อมโยงกันดัง รูปที่ 2



*โครงการย่อยสามโครงการแต่ละโครงการแยกตามลูกศรแต่ละชนิด

รูปที่ 2. แสดงกรอบงานวิจัยการวิจัยและพัฒนา

1.6 คำสำคัญของการวิจัย

ภาษาไทย	คาร์บอนดอท เปลือกผลไม้ การสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่อง ไมโครเวฟ เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ สารเร่งการเจริญเติบโตของพืช
ภาษาอังกฤษ	Carbon Dots, Fruit Peels, Continuous Carbon Dot Synthesis, Microwave, Solar Cells, Plant Growth Agents

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

องค์ความรู้พื้นฐานและต้นแบบผลิตภัณฑ์นวัตกรรมจากคาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทย ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ต่อไป

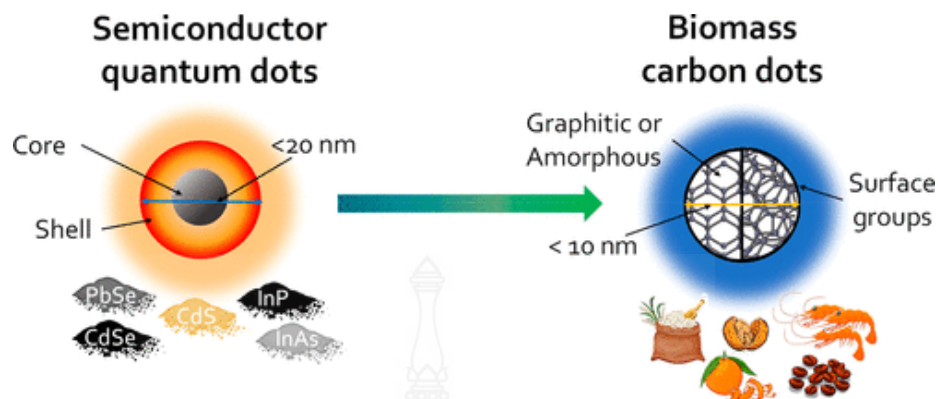
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนดอท

คาร์บอนดอท (carbon dot) คืออนุภาคคาร์บอนที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จัดอยู่ในตระกูลเดียวกับวัสดุคาร์บอน เช่น ท่อนาโนคาร์บอน กราฟีน เป็นต้น คาร์บอนดอทถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การผลิต โซลาร์เซลล์ การพัฒนาการเร่งการเจริญเติบโตของพืช หรืออุปกรณ์ตรวจสอบต่างๆ เป็นต้น คาร์บอนดอทผลิตได้จากการสังเคราะห์ การสังเคราะห์คาร์บอนดอทสามารถดำเนินการได้ 2 แนวทาง คือ 1. แบบ top down และ 2. แบบ bottom up การสังเคราะห์แบบ top down เป็นการลดขนาดของวัสดุที่มีโครงสร้างคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรโดยใช้กระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการอาร์ค (arc-discharge) กระบวนการทางเลเซอร์ (laser ablation) กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical) หรือ กระบวนการใช้คลื่นความถี่สูง (ultrasonication) ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบ bottom up เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ขนาดเล็กผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) และคาร์โบไนเซชัน (carbonization) จากการให้ความร้อนด้วยวิธีต่างๆ เช่น ไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) ไพโรไลซิส (pyrolysis) ไมโครเวฟ microwave หรือ คลื่นความถี่สูง (ultrasonic) เป็นต้น การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากสารอินทรีย์ที่มาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงเหมาะสมกับกระบวนการสังเคราะห์แบบ bottom up โดยการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ให้ความร้อนได้ในเวลาอันสั้นและมีประสิทธิภาพสูง

2.2 กระบวนการผลิตคาร์บอนดอท

การผลิตคาร์บอนดอทถือเป็นแนวทางแก้ไขปัญหามลพิษที่พบได้ในควอนตัมเคมีคอนดักเตอร์ เนื่องจากคาร์บอนดอทมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพมากกว่าและสามารถสังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีอยู่ทั่วไป และไม่เป็นพิษ เช่น ชีวมวล ซึ่งเป็นคาร์บอนดอทที่เป็นที่ต้องการมากที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 3



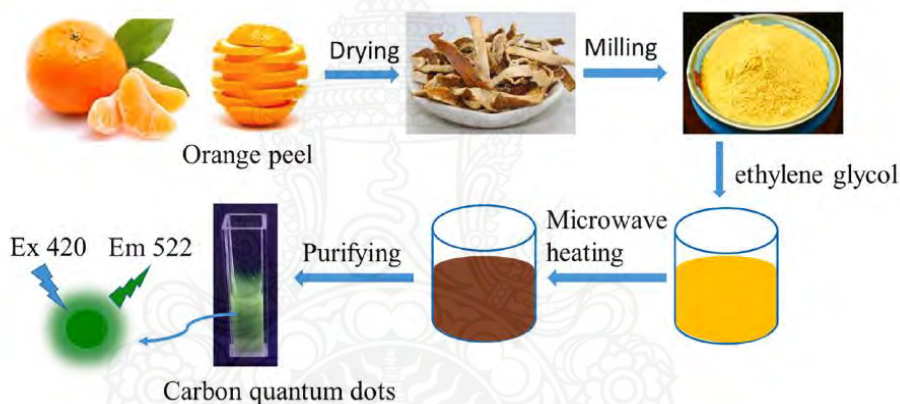
รูปที่ 3 แสดงภาพรวมของคาร์บอนดอท [1]

การสังเคราะห์คาร์บอนดอท สามารถทำได้หลายวิธี เช่น Hydrothermal Method, Pyrolysis, Microwave synthesis, Ultrasonication, Chemical Oxidation และ Extraction Method เป็นต้น [1] วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟนับเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถนำมาใช้ผลิตคาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ต่างๆ เช่น เปลือกส้ม [2] [3] เปลือกกล้วย [3] ยางมะม่วงหิมพานต์ [4] เป็นต้น



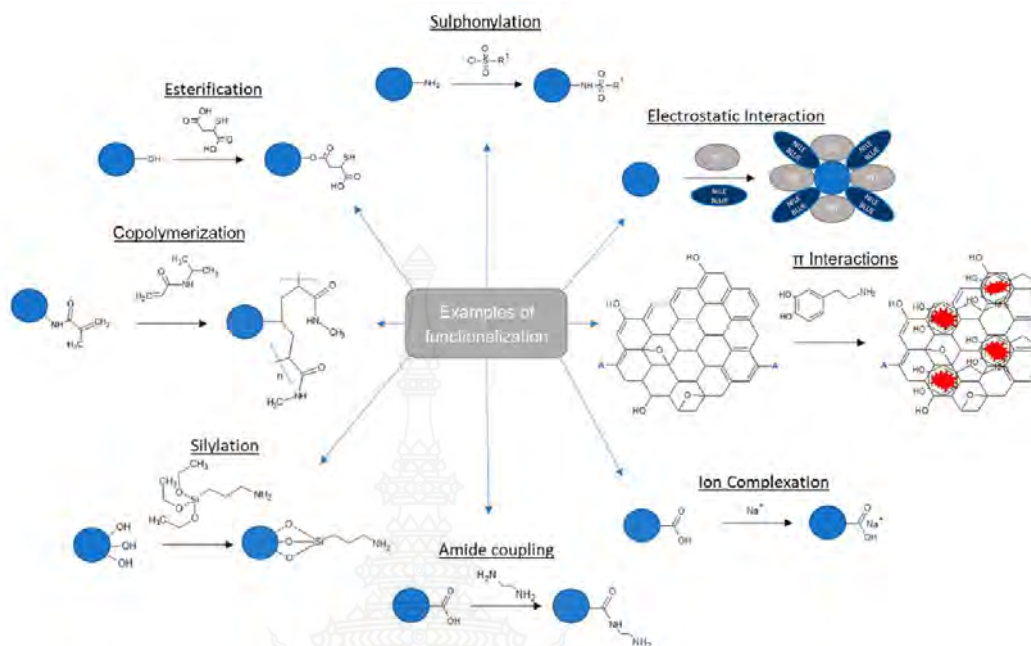
รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยเทคนิคไมโครเวฟ [3]

Fatimah และคณะ [3] ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้สองชนิด ได้แก่ เปลือกส้มและเปลือกกล้วย ด้วยวิธีการ microwave assisted แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งการพิสูจน์ผลของคาร์บอนดอทจากการสังเคราะห์ด้วยการทดสอบ photoluminescence, the absorbance of Ultraviolet Visible light และการตรวจสอบพันธะทางเคมีจากเครื่องทดสอบ Fourier Transform Infra-Red spectroscopy โดยสารละลายคาร์บอนดอทแสดงการเรืองแสงที่ชัดเจน โดยมี absorbance wavelength ที่ 286 nm และ 319 nm สำหรับคาร์บอนดอทจากเปลือกส้ม และ 284 nm สำหรับคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วย ผลของ Photoluminescent แสดงความยาวคลื่นที่ 498nm สำหรับคาร์บอนดอทจากเปลือกส้ม และ 501 nm สำหรับคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วย ซึ่งเป็นการยืนยันผลของการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR [4]



รูปที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนดอทจากเปลือกส้ม [2]

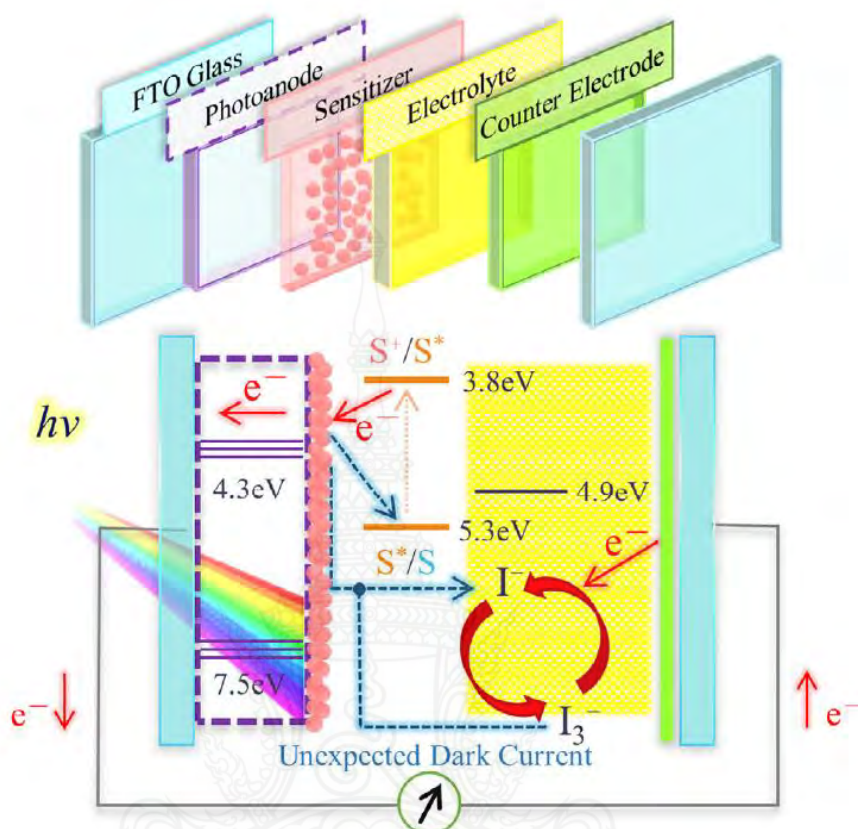
Hu และคณะ [2] ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนดอท โดยใช้เปลือกส้มเป็นสารตั้งต้น และใช้ ethylene glycol เป็น passivation reagents แสดงได้ดังรูปที่ 5 คาร์บอนดอทที่สกัดได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-5 nm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4.2 nm จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) การทดสอบ FT-IR พบว่าคาร์บอนดอทที่ได้ มี FTIR absorption bands ที่ 3,416 2,936 2,428 1,648 1,349 1,151 และ 1,082 cm^{-1} ตามลำดับ จากการทดสอบ XRD พบการเลี้ยวเบนของมุม 2θ ที่ 12° และ 30° ซึ่งตรงกับคาร์บอนอสัณฐานในเปลือกส้ม [3]



รูปที่ 6 การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันทางเคมี เพื่อปรับสมบัติของคาร์บอนดอท [1]

หนึ่งในสมบัติที่ดีของคาร์บอนดอท คือ สามารถถูกปรับปรุงสมบัติได้ง่ายและหลากหลายด้วยการปรับปรุงพื้นผิวของคาร์บอนดอท (surface modification) ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนดอทด้วยวัสดุที่หลากหลาย เช่น ไอออน โมเลกุลสารอินทรีย์ โพลีเมอร์ ดีเอ็นเอ และโปรตีน เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติของคาร์บอนดอท โดยกระบวนการในการปรับปรุงพื้นผิวทางคาร์บอนสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น Amide Coupling, Esterification, Sulfonylation Reaction, Copolymerization, Silylation, Complexation, และ Electrostatic เป็นต้น แสดงได้ดังรูปที่ 6

คาร์บอนดอทที่ถูกสังเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น Sensor, Bioimaging, Drug Carriers และ Electrical Applications เป็นต้น สมบัติเรืองแสงที่พิเศษของคาร์บอนดอท เช่น การเรืองแสงตามการถูกกระตุ้น (excitation dependent fluorescence emission) การเรืองแสงโดยอิสระจากการถูกกระตุ้น (excitation independence fluorescence emission) และการเรืองแสงตามขนาด (size-dependent fluorescence emission) เป็นเหตุ คาร์บอนดอทถูกใช้เป็นองค์ประกอบในโซลาร์เซลล์หลากหลายประเภท เช่น dye-sensitized solar cells [5] หรือ perovskite solar cell [6] เป็นต้น



รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของประจุใน dye-sensitized solar cell [5]

อุปกรณ์ dye-sensitized solar cells ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ photoanode, sensitizer, electrolyte, และ counter electrode ซึ่งคาร์บอนดอทถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้แสดงได้ดังรูปที่ 7 คาร์บอนดอทที่มีสมบัติการดูดกลืนแสงที่ดีในหลายช่วงคลื่นของแสงขาว ทำให้คาร์บอนดอทเหมาะสมที่จะเป็นวัสดุประเภท sensitizer ใน dye-sensitized solar cells ปัจจุบันเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดใช้ sensitizer จากสารประกอบรูปีเดียม (Ru) อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงแต่สารประกอบรูปีเดียมมีปริมาณน้อยในธรรมชาติทำให้มีราคาสูง และผลักดันให้นักวิทยาศาสตร์เร่งพัฒนาวัสดุทดแทน ซึ่งหนึ่งในวัสดุนั้นก็คือ คาร์บอนดอท [5] นอกจากนี้ คาร์บอนดอทยังแสดงถึงศักยภาพในการเป็น counter electrode ใน dye-sensitized solar cells แทนแพลตตินัม Pt ซึ่งมีราคาสูงได้อีกด้วย โดยการผสมคาร์บอนดอทในพอลิเมอร์ เช่น polypyrrole หรือ polyaniline พบว่าสารคอมพอสิตเหล่านี้มีคุณภาพใกล้เคียงกับ counter electrode

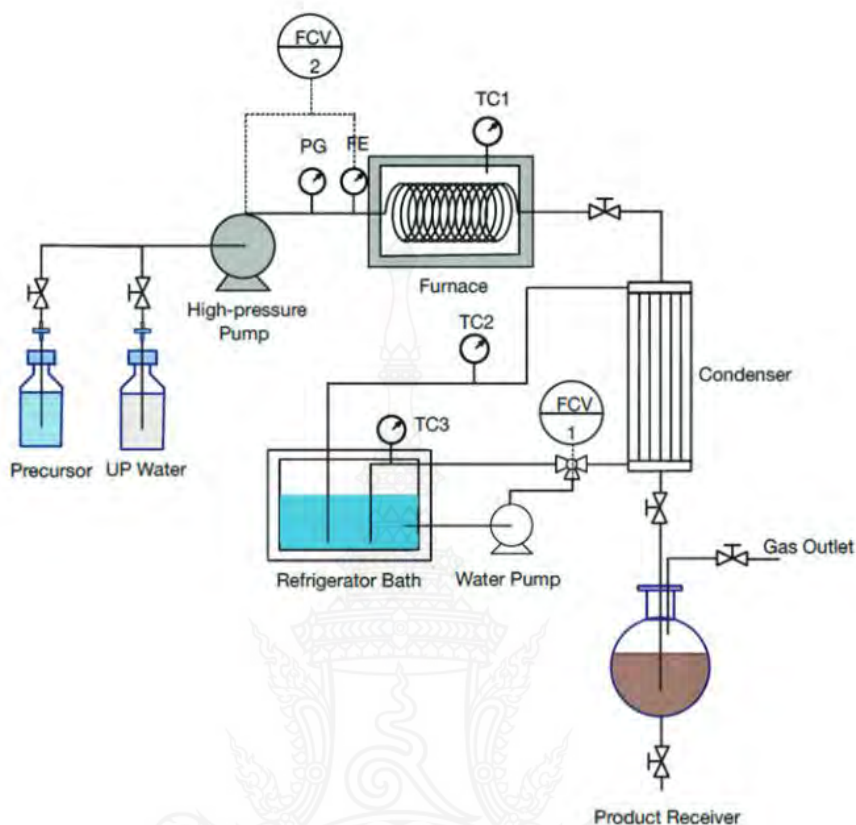
จากแพลตฟอร์ม [7] การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้สามารถทำได้หลากหลาย คาร์บอนดอทที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถถูกปรับปรุงสมบัติได้ง่ายด้วยกระบวนการทางเคมีที่หลากหลาย ประกอบกับสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของคาร์บอนดอททำให้คาร์บอนดอทสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในหลายเทคโนโลยี ในงานวิจัยนี้

2.3 ระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่อง

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่ละเทคนิคจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเป็นรูปแบบที่ง่ายแต่ใช้เวลานาน เมื่อต้องการขยายผลออกสู่อุตสาหกรรม ซึ่งต้องการผลผลิตในปริมาณมากในเวลาจำกัด การสังเคราะห์แบบทั่วไปในห้องปฏิบัติการอาจไม่เพียงพอและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน การออกแบบระบบการสังเคราะห์ให้สามารถผลิตอย่างต่อเนื่องจึงเป็นทางหนึ่งที่ต้องการ โดย Supajaruwong, S. และคณะ [8] ได้ดำเนินการออกแบบระบบสำหรับการสังเคราะห์ CD จากสารละลายน้ำตาลด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลอย่างต่อเนื่อง แสดงได้ดังรูปที่ 8 อุปกรณ์ดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

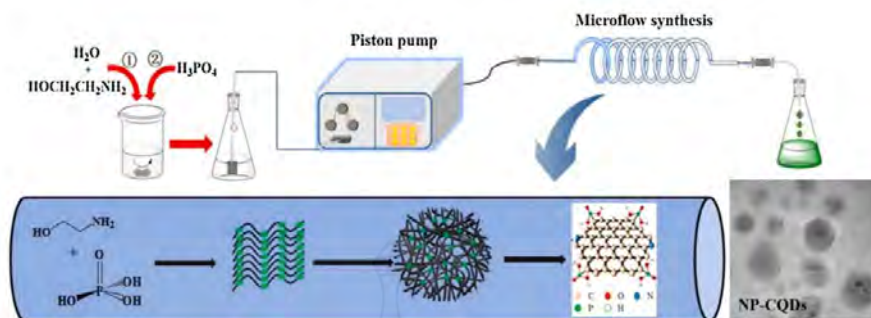
- 1) ส่วนลำเลียงสารซึ่งประกอบด้วยถังบรรจุสารและปั๊มแรงดันสูง
- 2) ส่วนปฏิกิริยาที่มีเครื่องปฏิกรณ์ไหลสแตนเลสและเตาเผา
- 3) ส่วนควมแน่นที่มีระบบคอนเดนเซอร์และตัวรับผลิตภัณฑ์

โดยในระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอท ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำตาลซูโครส (5 % w/v) ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิต CD อย่างต่อเนื่อง สารละลายซูโครสที่เตรียมขึ้นใหม่จะถูกกวนเพื่อให้ผสมกันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นจึงไล่แก๊สออกด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ก่อนที่จะเริ่มฉีดสารละลายซูโครสเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ไหล ปั๊มแรงดันสูงฉีดน้ำกลั่นเพื่อกำจัดแก๊สและทำความสะอาดสิ่งสกปรกในท่อ หลังจากนั้นสารละลายซูโครสจะถูกฉีดด้วยปั๊มแรงดันสูงด้วยอัตราการไหลคงที่ (1, 5 และ 10 มล.ต่อนาที) เข้าไปในส่วนป้อนผ่านท่อสแตนเลส (เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.75 มม. หรือ 750 ไมโครเมตร และความยาว 10 ม.) เข้าไปในโซนปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วยเตาเผา (อัตราการให้ความร้อน 5°C ต่อนาที) ซึ่งอุณหภูมิปฏิกิริยาระหว่าง 240 และ 350°C ที่ความดันในช่วง 0.2 ถึง 1.8 MPa ผลิตภัณฑ์หลังจากปฏิกิริยาจะผ่านโซนคอนเดนเซอร์และเริ่มเก็บตัวอย่าง CD สารละลาย CD ถูกทำให้ผ่านกระบวนการกรองจากไมโครฟิลเตรชันด้วยเมมเบรนกรองขนาด 0.22 ไมโครเมตร



รูปที่ 8 ระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอตด้วยไฮโดรเทอร์มอลแบบต่อเนื่อง
(continuous hydrothermal method) [8]

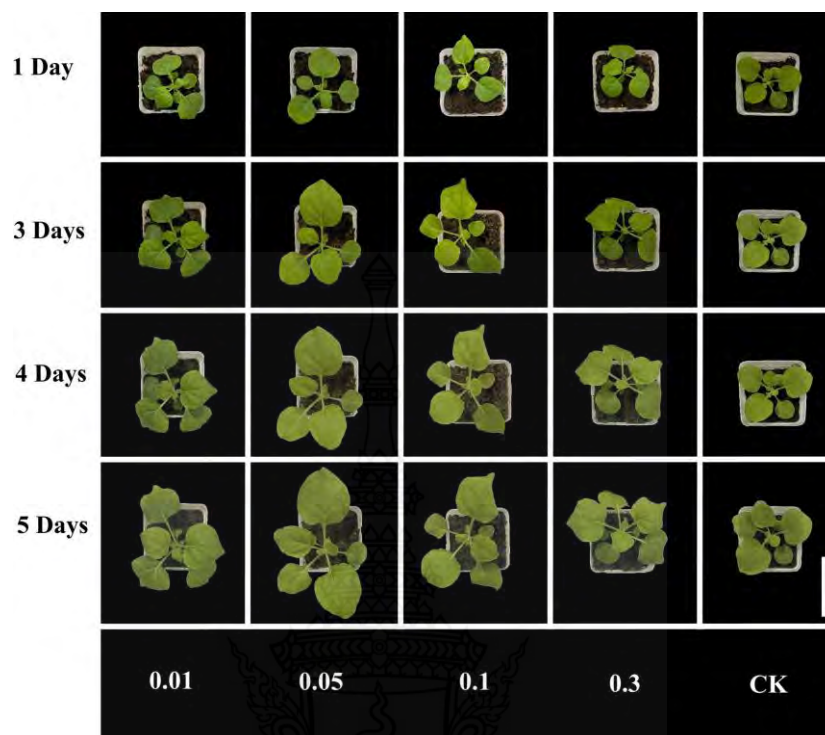
Liet al. และคณะ [9] ได้ใช้ระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอตด้วยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยใช้ไมโครรีแอक्टरแบบแคปิลลารีสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มม. สำหรับการผลิต CD อย่างต่อเนื่อง ($T = 110\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$) ทั้งจากสารตั้งต้นคาร์บอนแบบทั่วไป เช่น เอทานอล เอมีน และกรดฟอสฟอริก หรือจากแหล่งคาร์บอนที่เฉพาะ เช่น นม นมถั่วเหลือง น้ำส้ม หรือน้ำแตงโม ($T = 120\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$) โดยพารามิเตอร์ที่ส่งผลในกระบวนการสังเคราะห์โดยทั่วไปจะประกอบด้วย อุณหภูมิ ประเภทของปฏิกิริยา เวลาการคงอยู่ ลักษณะและความเข้มข้นของสารตั้งต้นคาร์บอน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อขนาดอนุภาคเล็ก การกระจายขนาด และผลผลิต ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการอย่างต่อเนื่องนี้จะช่วยลดเวลาและการใช้พลังงานในขณะที่เพิ่มผลผลิตได้



รูปที่ 9 ระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง [9]

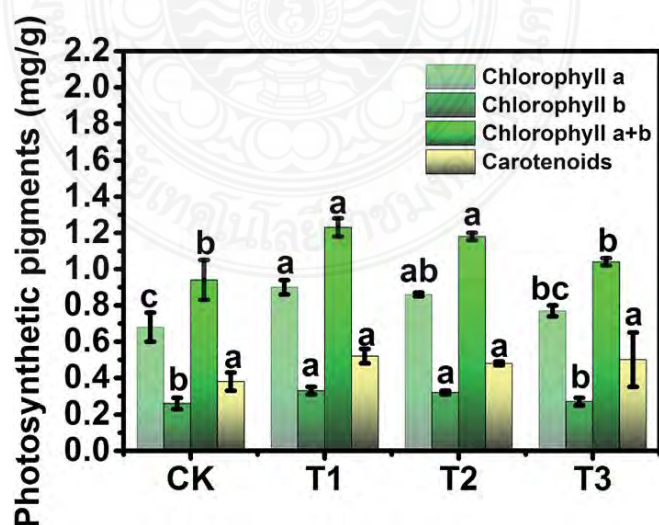
2.4 คาร์บอนดอทกับการเจริญเติบโตของพืช

คาร์บอนดอท (CD) เป็นฟอสเฟอรอนินทรีย์ประเภทใหม่ได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากข้อดีที่ชัดเจนของการเตรียมที่ง่ายและราคาถูก ลักษณะการเรืองแสงของ CD จึงถูกนำมาใช้งานมากมาย เช่น การตรวจจับทางเคมี/ชีวภาพ การสร้างภาพทางชีวภาพ การเร่งปฏิกิริยาและอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง CD ที่ส่วนใหญ่เป็นพืชต่ำและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามได้มีการนำ CD มาใช้งานทางด้านแสงอย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบนาโนไฮบริด CD-คลอโรพลาสต์ที่แปลงแสงสีน้ำเงินเพื่อเร่งการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจาก CD ไปยังคลอโรพลาสต์ การเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงผ่านการเก็บเกี่ยวแสงด้วย CD คาร์บอนดอทส่วนใหญ่มีการแปลงแสงสีน้ำเงิน/เขียวที่มีความยาวคลื่นสั้น ซึ่งคลอโรพลาสต์ของในเซลล์พืชไม่ได้ใช้โดยตรง แต่เมื่อสังเคราะห์ CD ที่แปลงแสงสีใกล้เคียงที่มีผลผลิตควอนตัมสูงและมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี มีประสิทธิภาพในการเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชและการสังเคราะห์แสง และไม่เป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยสามารถดูดซึมจากรากไปยังลำต้นและใบผ่านระบบท่อลำเลียงได้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงหรือปรับปรุงการเจริญเติบโตของพืช จากการทดลองเพื่อศึกษากลไกของ CDs ที่ทำให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้นจากการที่ CDs แปลงแสงอินฟราเรด (NIR) และทดลองกับพืช *Nicotiana benthamiana* [10] พบว่า NIR-CDs มีประสิทธิภาพในการเพิ่มการดูดซับแสงอัลตราไวโอเลตและการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจาก CDs ไปยังคลอโรพลาสต์ของพืช *N. benthamiana* ดังนั้น นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบยืนยันที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงและการสังเคราะห์คลอโรพลาสต์พบว่า ยีน *PsbP* และ *PsiK* เป็นตัวควบคุมหลักที่กระตุ้นการสังเคราะห์แสงที่ถูกกระตุ้นโดย NIR-CDs โดยผลการทดสอบการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช แสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 อิทธิพลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.01 – 0.3 mg/mL ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช [10]

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของ Zheng, Y. และคณะ [11] พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลกับกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยช่วยให้กระบวนการสังเคราะห์แสงเพิ่มสูงขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 11



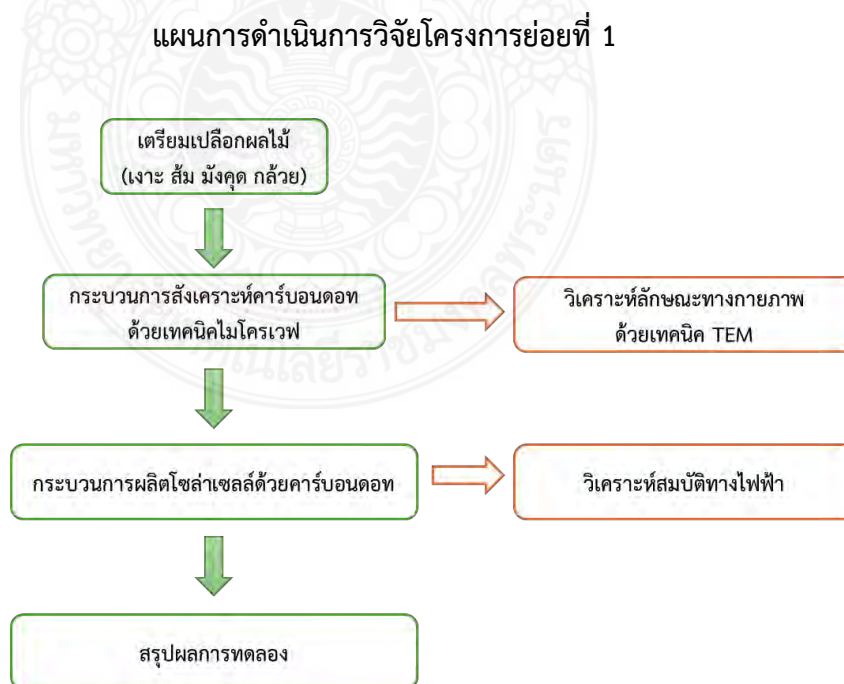
รูปที่ 11 อิทธิพลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง [11]

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการศึกษาวิจัยออกเป็น 3 โครงการย่อย คือ โครงการย่อยที่ 1 การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการศึกษาถึงกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากผลไม้ภายในประเทศไทย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ โครงการย่อยที่ 2 ต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นการออกแบบระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง เพื่อรองรับการสังเคราะห์คาร์บอนดอทให้ได้ปริมาณสูงในเวลา น้อย และโครงการย่อยที่ 3 อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด เป็น การศึกษาการประยุกต์ใช้สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทเพื่อเพิ่มพัฒนาการเจริญเติบโตของพืช โดยแต่ละโครงการย่อยจะมีกระบวนการศึกษาวิจัยดังนี้

3.1 วิธีดำเนินการโครงการย่อยที่ 1

โครงการย่อยที่ 1 การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์



3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี

1. กระจก FTO ขนาด 2 x 2.5 เซนติเมตร
2. น้ำ DI
3. สารละลาย Electrolytes
4. ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)
5. คาร์บอนดอท
6. สารละลายเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

3.1.2 เครื่องมือ

1. เครื่อง MAGNETIC STIRRER
2. เครื่อง Doctor Blade
3. เตาให้ความร้อน (Hot Plate)
4. เครื่อง Ultrasonic Cleaner
5. เครื่อง Spin Coater

3.1.3 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ ด้วยกระบวนการไมโครเวฟ มีขั้นตอนในการสังเคราะห์ ดังนี้

1. เตรียมเปลือกผลไม้ โดยการล้าง หั่นเป็นชิ้นเล็ก และปั่นจนละเอียด
2. นำเปลือกผลไม้ที่ปั่นจนละเอียด ผสมกับน้ำ ทำให้กระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิก
3. ทำการแยกกากกับของเหลวออกจากกันด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 5000 rpm
4. นำของเหลวที่มีอนุภาคขนาดเล็กผสมอยู่ในสถานะ และนำเข้าไมโครเวฟที่กำลัง 750 วัตต์ เพื่อระเหยน้ำออกจนหมด
5. นำอนุภาคขนาดเล็กที่เหลืออยู่จากการอบมาเติมน้ำ และปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 1000 rpm
6. แยกอนุภาคขนาดใหญ่ออก และนำของเหลวที่เหลือมาทำการกรองเพื่อให้ได้สารที่มีอนุภาคคาร์บอนดอทอยู่

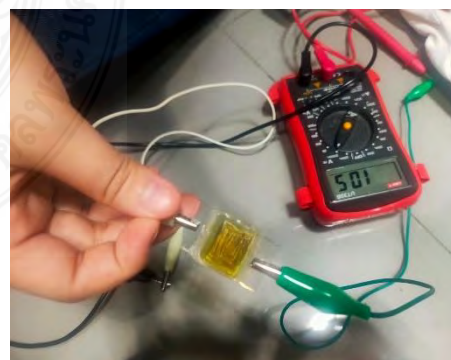
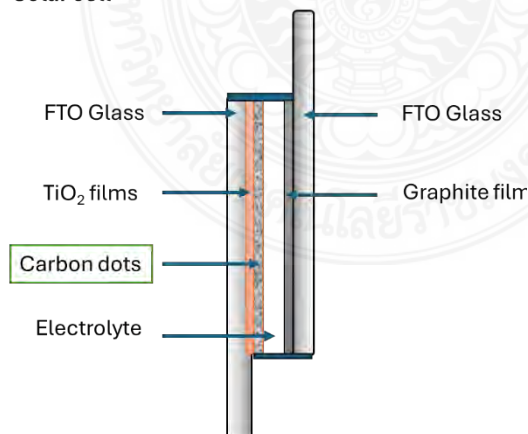
3.1.4 การผลิตโซลาร์เซลล์ด้วยคาร์บอนดอท

ในกระบวนการผลิตโซลาร์เซลล์มีขั้นตอนการผลิตดังนี้

1. นำกระจก FTO ขนาด 2×2.5 เซนติเมตร ผ่านการทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานเพื่อขจัดคราบไขมันออก แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด อบทำให้แห้ง
2. ตรวจสอบผิวหน้ากระจกด้านเคลือบสาร FTO เพื่อให้นำไฟฟ้า โดยใช้มัลติมิเตอร์ตรวจสอบ
3. เตรียมพื้นผิวบริเวณที่ต้องการขึ้นรูปโซลาร์เซลล์โดยทำ Mask area ด้วยการปิดเทปกาวในส่วนที่ไม่ต้องการเคลือบชั้นฟิล์มโซลาร์เซลล์
4. เตรียมผง TiO_2 ผสมกับแอทานอลในอัตราส่วน 1 : 1.7 คนให้เข้ากันด้วยเครื่อง Magnetic stirrer เป็นเวลา 20 - 30 นาที
5. เทของผสม TiO_2 บนแผ่นกระจกที่ทำการ Mask area ไว้แล้ว ปาดขึ้นรูปฟิล์ม TiO_2 ด้วยเครื่อง Doctor Blade และนำไปให้ความร้อนบน hotplate ที่อุณหภูมิ 450 องศา เวลา 1 ชั่วโมง
6. เมื่อขึ้นงานเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำการหยดคาร์บอนดอทเพื่อย้อมสีฟิล์ม TiO_2 แล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง

การประกอบเซลล์เป็น โซลาร์เซลล์

Solar cell



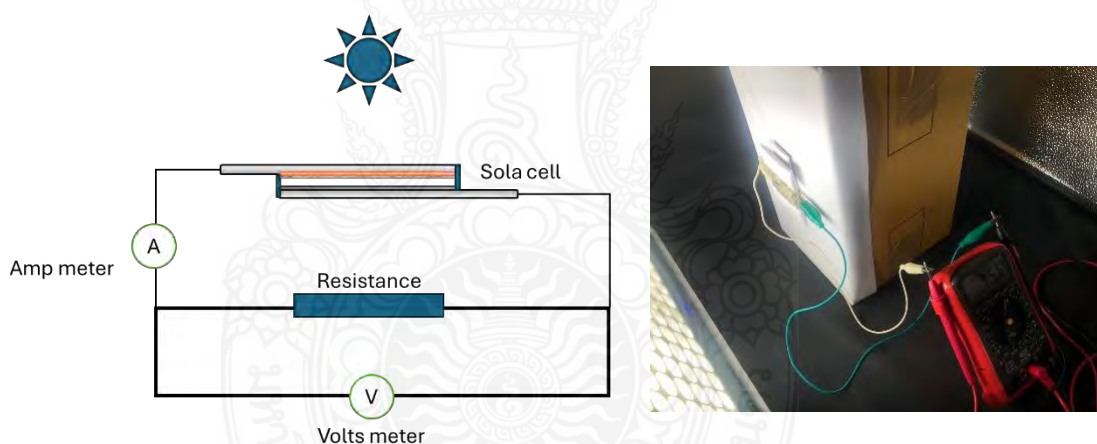
รูปที่ 12 ส่วนประกอบโซลาร์เซลล์จากคาร์บอนดอท

3.1.5 การทดสอบวิเคราะห์คาร์บอนดอท

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนดอท ถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นเป็นภาพ 2 มิติ ดังนั้นจากการทดสอบดังกล่าวสามารถบอกถึงขนาดของคาร์บอนดอทที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดังกล่าว

3.1.6 การทดสอบวิเคราะห์ประสิทธิภาพโซลาร์เซลล์ด้วยคาร์บอนดอท

การตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์คาร์บอนดอทที่ผลิตจากเปลือกผลไม้ไทย โดยทำการวัดประสิทธิภาพการทำงานโดยตรง เมื่อนำโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้มารับแสงและวัดค่าความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นภายในเวลา 7 วัน



รูปที่ 13 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์คาร์บอนดอท

3.2 วิธีการดำเนินการโครงการย่อยที่ 2

โครงการย่อยที่ 2 ต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

แผนการดำเนินการวิจัยโครงการย่อยที่ 2

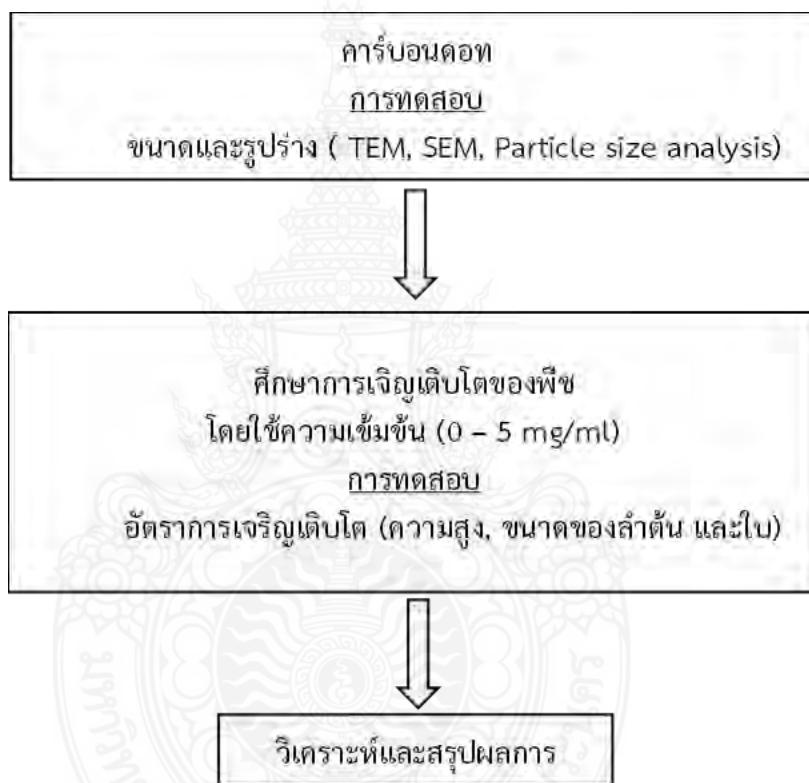


การศึกษาพัฒนาสร้างต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องนั้นจะมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยแสดงได้ตามแผนภาพการดำเนินงาน โดยในการออกแบบระบบนั้นจะพัฒนาจากขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทในห้องปฏิบัติการ แต่ปรับขั้นตอนในการทำให้เป็นแบบต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ได้คาร์บอนดอท ยังคงต้องมีกระบวนการกรองเพื่อให้ได้ช่วงขนาดอนุภาคที่แคบและสม่ำเสมอ

3.3 วิธีการดำเนินการโครงการย่อยที่ 3

โครงการย่อยที่ 3 อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด

แผนการดำเนินการวิจัยโครงการย่อยที่ 3



ในการศึกษาอิทธิพลของคาร์บอนดอทที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชนั้น จะนำคาร์บอนดอทที่ผลิตได้ในโครงการย่อยที่ 1 มาเป็นวัตถุดิบในการทดสอบวิจัย โดยการนำคาร์บอนดอทผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 0-5 mg/ml มาใช้ในการรดน้ำและสังเกตการเจริญเติบโตของพืช โดยพิจารณาในส่วนของความสูง ลักษณะใบ และขนาดของลำต้นเป็นหลัก

บทที่ 4 ผลการวิจัย

การศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโซลาร์เซลล์ และสารเร่งโตของพืชจะแบ่งออกเป็นโครงการย่อย 3 โครงการ คือ การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ การศึกษาต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการศึกษาอิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด ดังนั้นจึงแสดงผลการวิจัยในแต่ละหัวข้อการวิจัยดังนี้

4.1 ผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 1

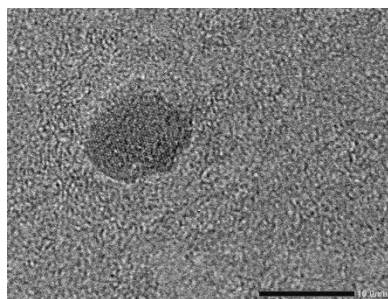
โครงการย่อยที่ 1 การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์

4.1.1 ผลการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้

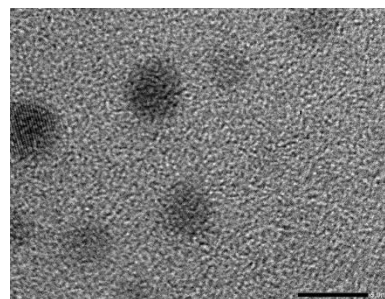
การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ เปลือกเงาะ เปลือกส้ม และเปลือกมังคุด ด้วยวิธีไมโครเวฟเปรียบเทียบกับวิธีไฮโดรเทอร์มอล จากการตรวจสอบขนาดของคาร์บอนดอทด้วยภาพถ่ายอิเล็กตรอนดังรูปที่ 14 พบว่าขนาดของคาร์บอนดอททุกชนิดมีขนาดต่ำกว่า 10 nm ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเปลือกผลไม้ทั้ง 3 ชนิด เมื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ทั้งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟหรือไฮโดรเทอร์มอล สามารถสังเคราะห์ให้มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 10 nm และเมื่อพิจารณาถึงอายุความสุกผลไม้ พบว่าอายุความสุกผลไม้ไม่ส่งผลต่อขนาดของคาร์บอนดอทที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ แสดงได้ดังตารางที่ 2 และ รูปที่ 15

ตารางที่ 1 ผลการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้

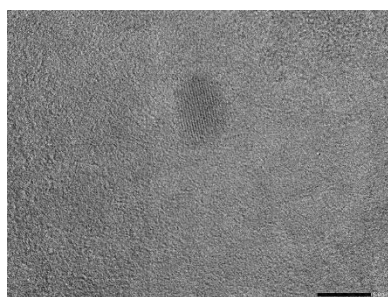
ชนิดเปลือกผลไม้	วิธีการสังเคราะห์	ขนาดอนุภาคคาร์บอนดอท(nm)
เปลือกเงาะ	ไมโครเวฟ	<10 nm
	ไฮโดรเทอร์มอล	<5 nm
เปลือกส้ม		<5 nm
เปลือกมังคุด		<10 nm



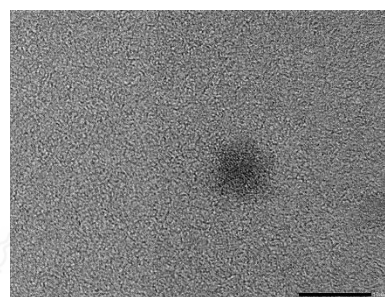
a. เปลือกเงาะ ด้วยวิธีไมโครเวฟ



b. เปลือกเงาะด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล



c. เปลือกส้มด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

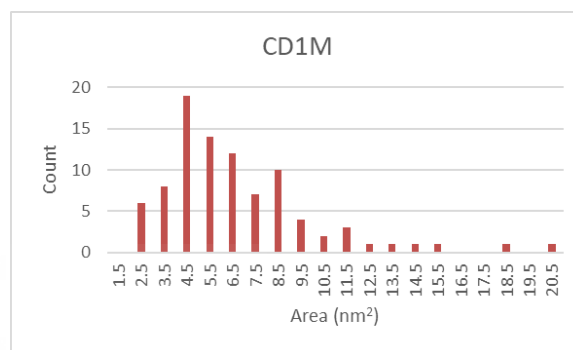
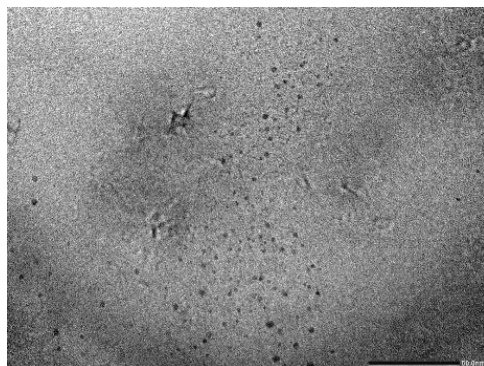


d. เปลือกมังคุดด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

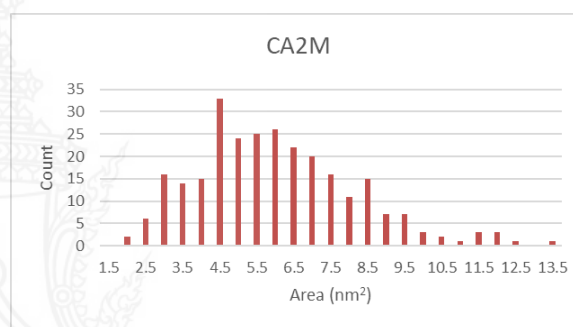
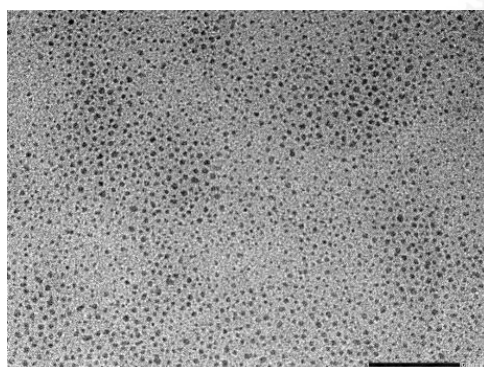
รูปที่ 14 ขนาดอนุภาคคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกผลไม้ด้วยวิธีไมโครเวฟและไฮโดรเทอร์มอล

ตารางที่ 2 อนุภาคคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไมโครเวฟ

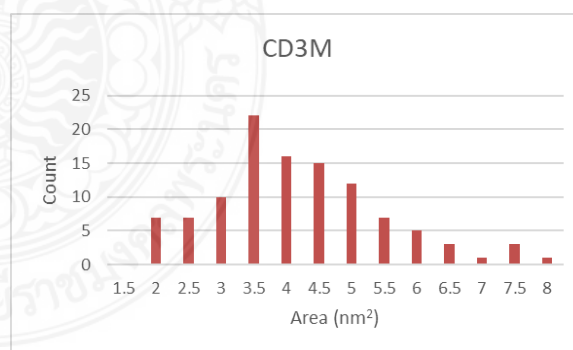
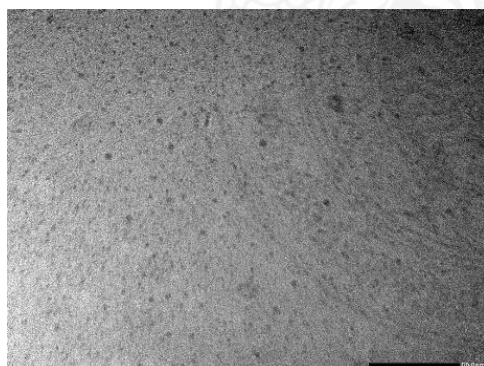
ชนิดเปลือกผลไม้	วิธีการสังเคราะห์	ขนาดอนุภาคคาร์บอนดอท (nm)
เปลือกกล้วยดิบ	ไมโครเวฟ	2.82 (พื้นที่เฉลี่ย 6.23 nm ²)
เปลือกกล้วยสุก		2.72 (พื้นที่เฉลี่ย 5.77 nm ²)
เปลือกกล้วยสุกมาก		2.24 (พื้นที่เฉลี่ย 3.92 nm ²)



a. ภาพถ่าย TEM (ซ้าย) และการกระจายตัวขนาดอนุภาคของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยดิบ



b. ภาพถ่าย TEM (ซ้าย) และการกระจายตัวขนาดอนุภาคของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยสุก



c. ภาพถ่าย TEM (ซ้าย) และการกระจายตัวขนาดอนุภาคของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยสุกมาก

รูปที่ 15 ขนาดอนุภาคคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยที่สามารถวัดความสูงด้วยวิธีไมโครเวฟ

4.1.2 ประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์คาร์บอนดอท

การวัดประสิทธิภาพการทำงานของโซล่าเซลล์คาร์บอนดอทที่ผลิตจากเปลือกผลไม้ไทย ทำการวัดโดยนำโซล่าเซลล์ที่ผลิตได้มารับแสงและวัดค่าความต่างศักย์และกระแสที่เกิดขึ้นภายในเวลา 7 วัน ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 3 แสดงถึงค่ากระแสไฟฟ้า (μA) ที่เกิดขึ้นจากโซล่าเซลล์คาร์บอนดอทจากผลไม้ต่างๆ จากผลการทดสอบพบว่าชนิดของผลไม้ส่งผลต่อคุณภาพของคาร์บอนดอทที่มีต่อประสิทธิภาพการเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า หรือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงอายุความสุกของผลไม้พบว่าส่งผลต่อคุณภาพของคาร์บอนดอทเช่นกัน ทั้งนี้อายุความสุกของผลไม้จะมีการเปลี่ยนแปลงสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของผลไม้ อาจส่งผลต่อคุณภาพของคาร์บอนดอท ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบความต่างศักย์เช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้า (μA) จากเปลือกผลไม้ไทย

ชนิด เปลือกผลไม้	ปริมาณกระแสไฟฟ้า (μA)								SD
	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่6	วันที่7	ค่าเฉลี่ย	
น้ำ	3.1	0.0	0.6	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	1.03
กล้วยดิบ	14.9	14.8	7.7	7.7	7.3	7.4	9.0	9.8	3.48
กล้วยสุก	8.0	8.1	2.9	11.9	3.8	4.1	4.0	6.1	3.30
กล้วยสุกมาก	19.8	28.2	11.8	13.1	9.8	14.8	15.5	16.1	6.18
มะม่วงดิบ	13.3	18.6	10.7	9.7	6.8	6.8	5.5	10.2	4.58
มะม่วงสุก	16.1	18.6	10.7	8.3	12.7	13.8	17.2	13.9	3.67
มะม่วงสุกมาก	10.9	14.8	8.3	11.8	9.6	10.5	11.0	11.0	2.02
ส้มดิบ	9.5	7.7	3.7	3.4	3.6	3.8	4.5	5.2	2.42
ส้มสุก	10.6	8.8	1.7	0.2	0.3	0.3	2.0	3.4	4.38

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาค่าความต่างศักย์ (mV) จากเปลือกผลไม้ไทย

ชนิด เปลือกผลไม้	ปริมาณความต่างศักย์ (mV)								SD
	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่6	วันที่7	ค่าเฉลี่ย	
น้ำ	13.0	19.0	23.5	19.4	19.6	12.8	19.5	18.1	3.87
กล้วยดิบ	290.0	291.0	253.0	235.0	208.0	172.5	213.0	237.5	43.89
กล้วยสุก	305.0	309.0	223.0	354.0	306.0	305.5	307.0	301.4	38.84
กล้วยสุกมาก	386.0	409.0	363.0	370.0	342.0	335.0	349.0	364.9	26.11
มะม่วงดิบ	370.0	387.0	336.0	298.0	284.0	316.0	307.0	328.3	38.14
มะม่วงสุก	377.0	378.0	350.0	334.0	358.0	368.0	381.0	363.7	17.33
มะม่วงสุกมาก	349.0	366.0	335.0	351.0	342.0	354.0	358.0	350.7	10.19
ส้มดิบ	255.0	252.0	168.0	379.0	185.0	167.5	159.5	223.7	79.35
ส้มสุก	280.0	276.0	81.2	182.0	75.0	24.0	41.8	137.1	108.46

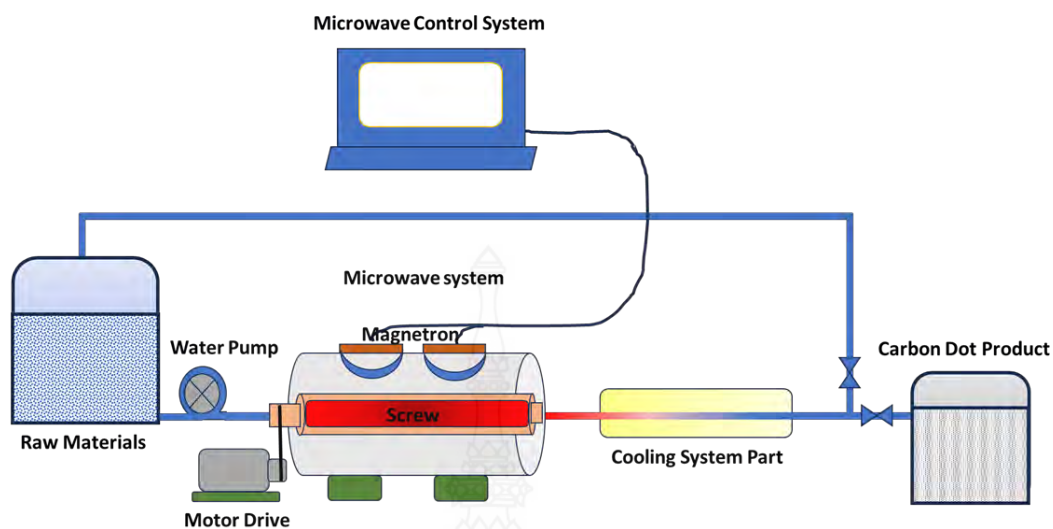
4.2 ผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 2

โครงการย่อยที่ 2 ต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

4.2.1 การออกแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ

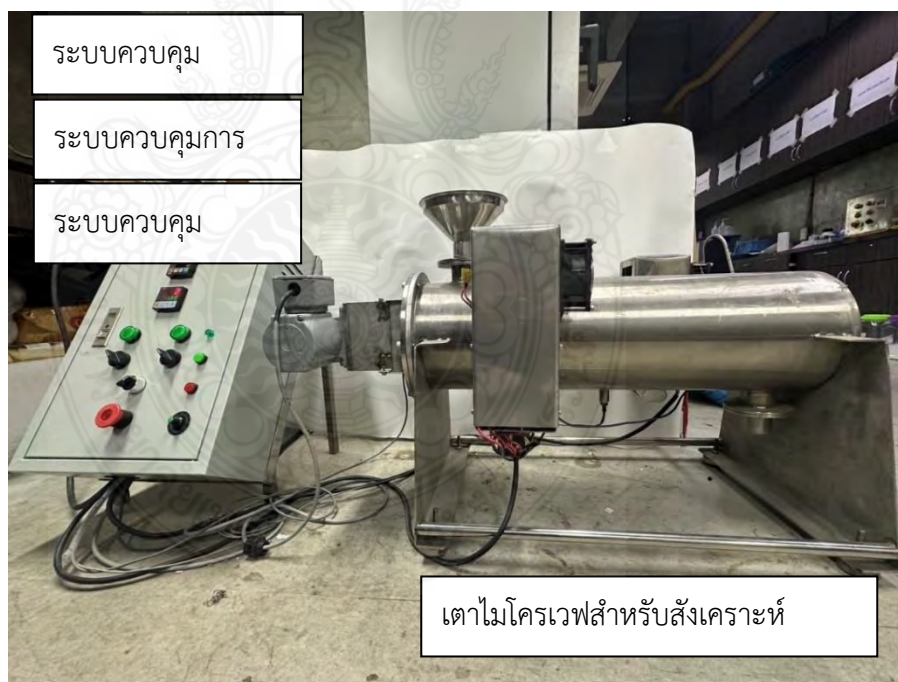
ในการออกแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ แสดงได้ดังรูปที่ 15 ซึ่งประกอบด้วยระบบการทำงาน 4 ส่วนด้วยกัน คือ

1. ระบบไมโครเวฟ
2. ระบบควบคุมอุณหภูมิ
3. ระบบควบคุมการไหล
4. เตาไมโครเวฟสำหรับสังเคราะห์คาร์บอน



รูปที่ 16 การออกแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ

4.2.2 เครื่องสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 17 เครื่องสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ

ส่วนประกอบของเครื่องสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ

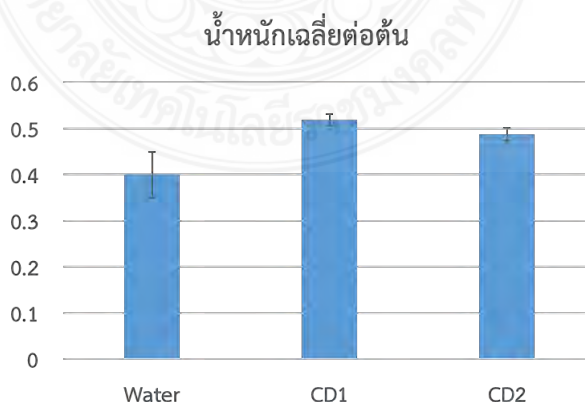
1. ระบบไมโครเวฟ เป็นระบบให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากผงเปลือกผลไม้ ซึ่งประกอบด้วยหัวไมโครเวฟ และชุดควบคุมไมโครเวฟ
2. ระบบควบคุมอุณหภูมิ เป็นชุดวัดและควบคุมอุณหภูมิเพื่อปรับอุณหภูมิตามสภาวะที่ต้องการ
3. ระบบควบคุมการไหล ประกอบด้วยชุดมอเตอร์สำหรับหมุนสกรูเพื่อพาผงเปลือกผลไม้เข้าสู่ระบบ
4. เตาไมโครเวฟสำหรับสังเคราะห์คาร์บอน ประกอบด้วยท่อลำเลียง และสกรู

4.3 ผลการวิจัยโครงการย่อยที่ 3

โครงการย่อยที่ 3 อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด

4.3.1 ผลการทดลองศึกษาการใช้คาร์บอนดอทกับการเจริญเติบโตของต้นกล้า

จากการศึกษาอิทธิพลของคาร์บอนดอทที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งในการทดลองนี้ได้ดำเนินการทดลองกับพืชผักคอส เมื่อทดสอบให้น้ำ (water) น้ำผสมคาร์บอนดอท 1 mg/g (CD1) และน้ำผสมคาร์บอนดอท 2 mg/g (CD2) พบว่าคาร์บอนดอทมีผลต่อน้ำหนักเฉลี่ยผักคอสอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง CD1 และ CD2 ไม่พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงได้ชัดเจนดังรูปที่ 18 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng, Y. และคณะ [11] ที่พบว่าคาร์บอนดอทสามารถช่วยกระตุ้นกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นกว่าการลดน้ำปกติ ดังนั้นขนาดของลำต้น ใบ น้ำหนักจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการทดสอบในระยะต้นกล้าของผักคอสดังรูปที่ 19 พบว่าอิทธิพลของคาร์บอนดอทส่งผลต่อการเจริญเติบโตชัดเจนเช่นเดียวกับผักคอสในระยะต้นอ่อน



รูปที่ 18 ผลของอนุภาคคาร์บอนดอทที่ส่งผลต่อน้ำหนักต้นอ่อนของผักคอส



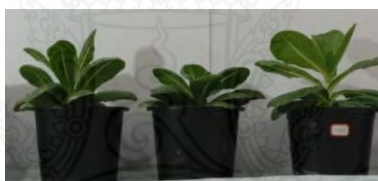
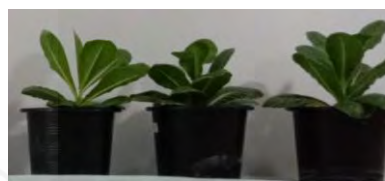
a. น้ำ

b. Carbon dot in H_2O c. Carbon dot in H_2O

รูปที่ 19 ลักษณะเจริญเติบโตของผักคอสในระยะต้นอ่อน



a. น้ำ

b. Carbon dot in H_2O c. Carbon dot in H_2O 

รูปที่ 20 ลักษณะเจริญเติบโตของผักคอสในระยะต้นกล้า



บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผล

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโซลาร์เซลล์ และสารเร่งโตของพืช ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นงานวิจัยย่อย 3 คือ โครงการย่อยที่ 1 การประยุกต์ใช้คาร์บอนดอทที่สกัดจากเปลือกผลไม้ไทยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการศึกษาถึงกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากผลไม้ภายในประเทศไทย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ โครงการย่อยที่ 2 ต้นแบบระบบสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นการออกแบบระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟแบบต่อเนื่อง เพื่อรองรับการสังเคราะห์คาร์บอนดอทให้ได้ปริมาณสูงในเวลาน้อย และโครงการย่อยที่ 3 อิทธิพลของคาร์บอนดอทที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชในระบบปิด เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทเพื่อเพิ่มพัฒนาการเจริญเติบโตของพืช ผลจากการศึกษาพบว่า

1. ชนิดและระดับความสุกของผลไม้ไม่ส่งผลต่อขนาดของคาร์บอนดอท
2. ระดับความสุกของผลไม้มีผลต่อคุณภาพของคาร์บอนดอท เนื่องจากองค์ประกอบของสารเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลง
3. เครื่องสังเคราะห์คาร์บอนดอทแบบต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟ สามารถผลิตคาร์บอนดอทได้ โดยต้องมีควบคุมขนาดของผงวัตถุดิบในขั้นตอนการนำเข้าสู่ระบบสังเคราะห์ และต้องมีระบบกรองอนุภาคขนาดใหญ่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ
4. คาร์บอนดอทสามารถพัฒนาเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืชได้ จากการกระตุ้นกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช

ดังนั้นเศษวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรเช่นเปลือกผลไม้ เช่น กล้วย เงาะ ส้ม มะม่วง สามารถนำมาเพิ่มมูลค่า สังเคราะห์เป็นคาร์บอนดอท เพื่อใช้ประโยชน์ต่างๆได้ เช่น การผลิตโซลาร์เซลล์ การผลิตสารเร่งเจริญเติบโตของพืช และเพิ่มน้ำหนักให้กับผัก เช่น ผักคอส ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาระบบการสังเคราะห์คาร์บอนดอทให้สามารถผลิตได้ในปริมาณเพิ่มสูงขึ้น
2. พัฒนาการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการในการนำไปใช้งาน
3. ศึกษาองค์ประกอบที่ผสมอยู่ในคาร์บอนดอท ที่ส่งผลต่อคุณภาพการใช้งานของคาร์บอนดอท



บรรณานุกรม

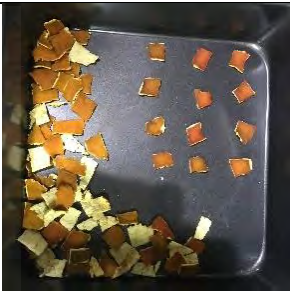
- [1] Wareing, T. C., Gentile, P., & Phan, A. N. (2021). Biomass-based carbon dots: current development and future perspectives. *ACS nano*, 15(10), 15471-15501.
- [2] Hu, X., Li, Y., Xu, Y., Gan, Z., Zou, X., Shi, J., ... & Li, Y. (2021). Green one-step synthesis of carbon quantum dots from orange peel for fluorescent detection of *Escherichia coli* in milk. *Food Chemistry*, 339, 127775.
- [3] Fatimah, S., Isnaeni, Abdullah, B., & Tahir, D. (2019, June). Strong luminescence carbon nanodots by green synthesis based microwave assisted from fruit peel. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1242, No. 1, p. 012038). IOP Publishing.
- [4] Pires, N. R., Santos, C. M., Sousa, R. R., Paula, R. C. D., Cunha, P. L., & Feitosa, J. P. (2015). Novel and fast microwave-assisted synthesis of carbon quantum dots from raw cashew gum. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26(6), 1274-1282.
- [5] Gao, N., Huang, L., Li, T., Song, J., Hu, H., Liu, Y., & Ramakrishna, S. (2020). Application of carbon dots in dye-sensitized solar cells: a review. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(10), 48443.
- [6] Zhang, X., Zeng, Q., Xiong, Y., Ji, T., Wang, C., Shen, X., ... & Zheng, W. (2020). Energy level modification with carbon dot interlayers enables efficient perovskite solar cells and quantum dot based light-emitting diodes. *Advanced Functional Materials*, 30(11), 1910530.
- [7] Vercelli, B. (2021). The role of carbon quantum dots in organic photovoltaics: a short overview. *Coatings*, 11(2), 232.
- [8] Supajaruwong, S., Porahong, S., Wibowo, A., Yu, Y. S., Khan, M. J., Pongchaikul, P., ... & Sakdaronnarong, C. (2023). Scaling-up of carbon dots hydrothermal synthesis from sugars in a continuous flow microreactor system for biomedical application as in vitro antimicrobial drug nanocarrier. *Science and Technology of Advanced Materials*, 24(1), 2260298.

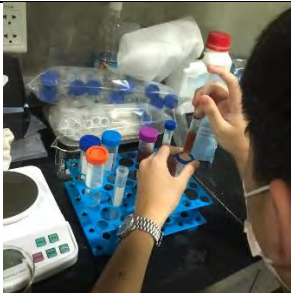
- [9] Lin, L., Yin, Y., Li, Z., Xu, H., Hessel, V., & Ostrikov, K. K. (2022). Continuous microflow synthesis of fluorescent phosphorus and nitrogen co-doped carbon quantum dots. *Chemical Engineering Research and Design*, 178, 395-404.
- [10] Wang, Y., Xie, Z., Wang, X., Peng, X., & Zheng, J. (2021). Fluorescent carbon-dots enhance light harvesting and photosynthesis by overexpressing PsbP and PsIK genes. *Journal of nanobiotechnology*, 19(1), 260.
- [11] Zheng, Y., Zhang, H., Li, W., Liu, Y., Zhang, X., Liu, H., & Lei, B. (2017). Pollen derived blue fluorescent carbon dots for bioimaging and monitoring of nitrogen, phosphorus and potassium uptake in *Brassica parachinensis* L. *RSC advances*, 7(53), 33459-33465.



ภาคผนวก

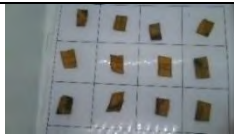
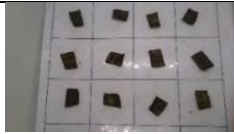
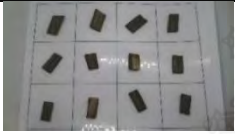
ขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทย โดยวิธีการไมโครเวฟ

กระบวนการสังเคราะห์	ภาพการขั้นตอนการสังเคราะห์
1. นำเปลือกผลไม้ล้างให้สะอาด	
2. นำเปลือกผลไม้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	
3. นำเปลือกผลไม้ 5 กรัม ไปปั่นลงในเครื่องปั่นจนกว่าจะละเอียด	
4. นำมากรองผ่านตะแกรงร่อน (ขนาด 0.83 มิลลิเมตร)	

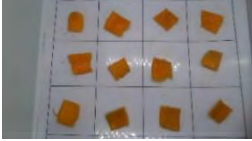
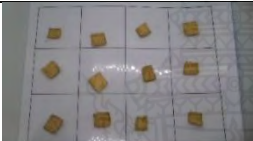
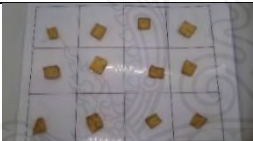
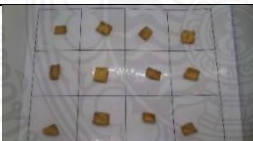
กระบวนการสังเคราะห์	ภาพการขั้นตอนการสังเคราะห์
5. นำสารที่กรองแล้วปริมาณ 2.5 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง	
6. ใส่น้ำครั้งละ 10 มิลลิลิตรและเขย่า จนครบปริมาตร 50 มิลลิลิตร และนำไป sonicate 15 นาที แล้วนำหลอดทดลองไปหมุนเหวี่ยงจนตกตะกอนด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่า 5000 rpm	
7. นำหลอดทดลองที่ปั่นเหวี่ยงแล้วแยกสารกับตะกอนด้วยไมโครปิเปต จากนั้นนำสารที่แยกตะกอนลงปิกเกอร์ด้วยไมโครปิเปต 10 มิลลิลิตร ใส่ปิกเกอร์ 2 ขนาด คือ 150ml และ 250 ml และนำปิกเกอร์เข้าเครื่องไมโครเวฟด้วยความร้อน 750 Watt และจนแห้งพร้อมบันทึกผลเวลาที่แห้ง	
8. เติมน้ำลงปิกเกอร์ด้วยไมโครปิเปต 10 มิลลิลิตร นำหลอดทดลองไปหมุนเหวี่ยงจนกว่าจะตกตะกอนด้วยความเร็ว 1 rpm และเทใส่ใน Syringe กรองผ่าน syringe filter เมื่อกรองเสร็จแล้วให้นำสารไปแช่ตู้เย็น	

การอบเปลือกผลไม้ในแต่ละช่วงเวลา

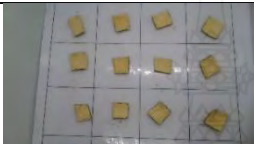
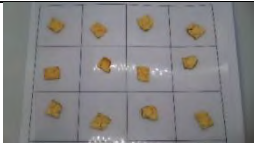
เปลือกกล้วย

เวลา (นาที)	เปลือกกล้วยดิบ	เปลือกกล้วยสุก	เปลือกกล้วยสุกมาก
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
90			
120			
150			

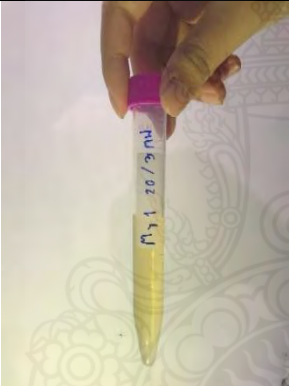
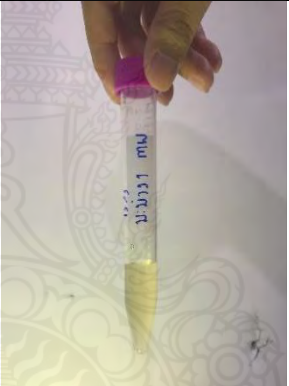
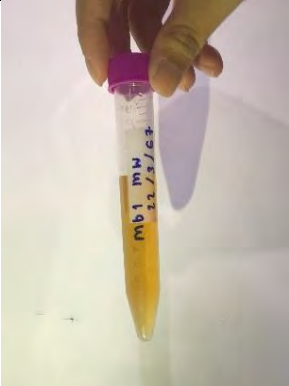
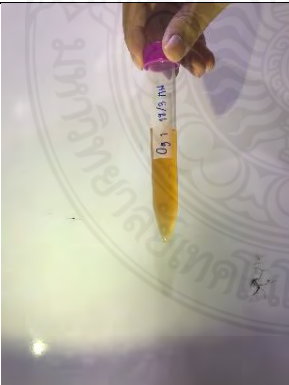
เปลือกมะม่วง

เวลา (นาทื)	เปลือกมะม่วงดิบ	เปลือกมะม่วงสุก	เปลือกมะม่วงสุกมาก
0			
10			
20			
30			
40			
50			
60			
90			
120			
150			

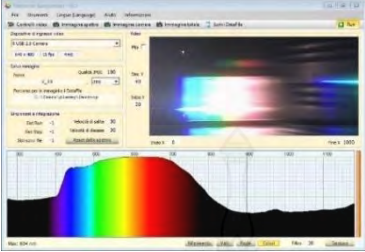
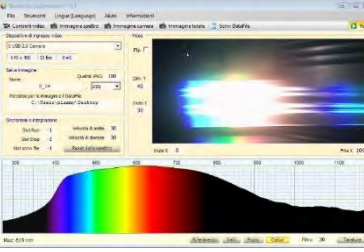
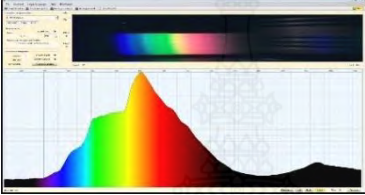
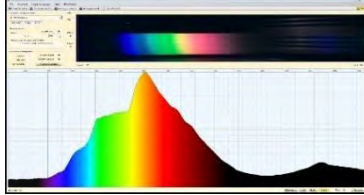
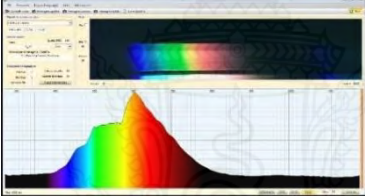
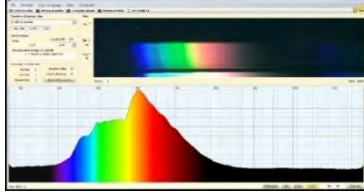
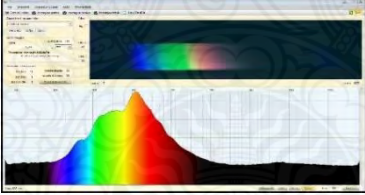
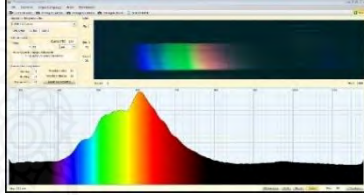
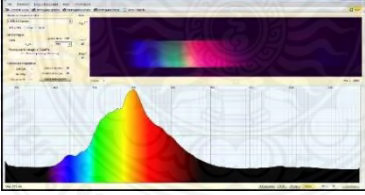
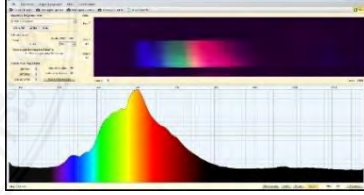
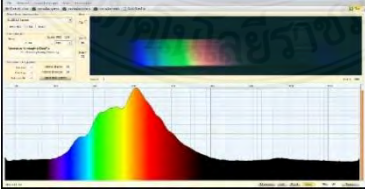
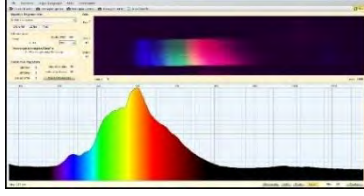
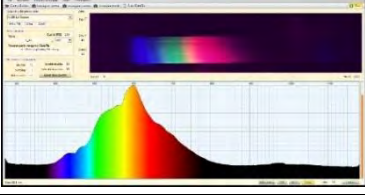
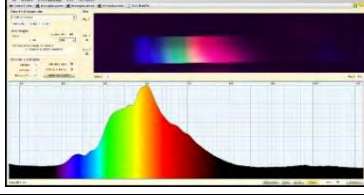
เปลือกส้ม

เวลา (นาทื)	เปลือกส้มดิบ		เปลือกส้มสุก	
0				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
90				
120				
150				

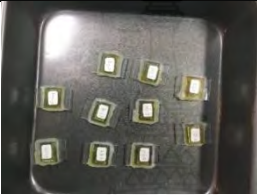
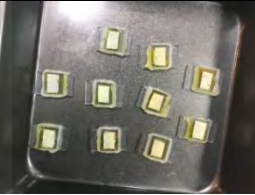
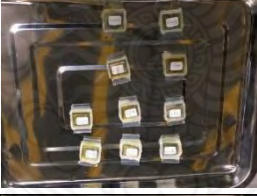
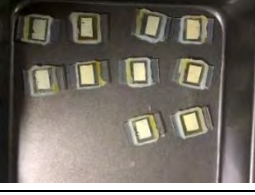
สารสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้

เปลือกผลไม้	ปริมาณความสุกของผลไม้		
	ดิบ	สุก	สุกมาก
กล้วย			
มะม่วง			
ส้ม			NA

ค่าความเข้มและสเปกตรัมของแสง ณ ขณะวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

วันที่ทำการทดสอบ	ค่าความเข้มและสเปกตรัมของแสง	
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

โซลาร์เซลล์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยคาร์บอนดอท

วันที่ทำการทดสอบ	โซลาร์เซลล์ชนิดสีย้อมไวแสงด้วยคาร์บอนดอท	
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ : นายจิระศักดิ์ ธาระจักร์
 ที่ทำงาน : สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 โทรศัพท์ : 02-836-3000 ต่อ 7510
 อีเมล : Jirasak.t@rmutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

2559 ปริญญาเอก (ปร.ด. เทคโนโลยีวัสดุ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 2546 ปริญญาโท (วศ.ม. เทคโนโลยีวัสดุ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 2544 ปริญญาตรี (วท.บ. ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยนเรศวร

วารสารวิชาการ

1. J. Tharajak, T. Palathai, N. Sombatsompop, "Recommendations for h-BN loading and service temperature to achieve low friction coefficient and wear rate for thermal-sprayed PEEK coatings", Surface and Coatings Technology, 321 (2017), pp. 477-483.
2. J. Tharajak, T. Palathai, N. Sombatsompop, "The effects of magnetic field-enhanced thermal spraying on the friction and wear characteristics of poly(ether-ether-ketone) coatings", Wear, Vol. 372-373 (2017), pp. 68-75.
3. J. Tharajak, T. Palathai, N. Sombatsompop, "Morphological and physical properties and friction/wear behavior of h-BN filled PEEK composite coatings", Surface and Coatings Technology, 273 (1) (2015), pp. 20-29.
4. N. Sanpo, J. Tharajak, Y. Li, C.C. Berndt, C. Wen, J. Wang, "Biocompatibility of transition metal-substituted cobalt ferrite nanoparticles", Journal of Nanoparticle Research, 16 (7) (2014), no. 2510, pp. 1-13.
5. J. Tharajak, T. Palathai, N. Sombatsompop, "Hardness, adhesion index and microstructure of PEEK coating on Al or Fe substrate by LVOF flame spray", Materials Science and Engineering A, 485 (1-2) (2008), pp. 66-73.

รายงานการประชุมวิชาการ

1. N. Sanpo, J. Tharajak, "Antimicrobial Property of Cold-Sprayed Transition Metals-Substituted Hydroxyapatite/PEEK Coating", Applied Mechanics and Materials (2017) 866, pp. 77-80.
2. N. Sanpo, J. Tharajak, "Influence of Feedstock Feed Rate on the Properties of SPPS-Deposited Cobalt Ferrite Splats", Applied Mechanics & Materials (2017) 866.
3. N. Sanpo, J. Tharajak, "Development of Thermal Spray Map for Liquid Feeding Thermal Spray System", Applied Mechanics and Materials (2017) 866, pp. 418-421.
4. N. Sanpo, J. Tharajak, "Antimicrobial Property of Hydroxyapatite Derivative Nanoparticles", Applied Mechanics and Materials (2017) 866, pp. 81-84.
5. N. Sanpo, J. Tharajak, "Influence of Lubricating Ceramic Content on Oxidation and Water Contact Angle of Carbon Steel", Applied Mechanics and Materials (2017) 866, pp. 295-298
6. N. Sanpo, J. Tharajak, "Antimicrobial Properties of Transition Metals Substituted Chitosan against Cobetia Marina", Applied Mechanics and Materials (2017) 848, pp. 123-126.
7. N. Sanpo, J. Tharajak, "Cold Spray Modification of ZnO-Cu Coatings for Bacterial Attachment Inhibition", Applied Mechanics and Materials (2017) 848, pp. 23-26.
8. T. Boonchoo, J. Tharajak, "Effect of Welding on Hardness and Deformation Behavior of Polypropylene by Scratch Test", Applied Mechanics and Materials (2016), 848, pp. 7-30.
9. N. Sanpo, J. Tharajak, "Biocompatibility of cold sprayed silver-doped hydroxyapatite/titanium coatings", Applied Mechanics and Materials (2016) pp. 848, 19-22.
10. J. Tharajak, D. Nicomrat, "Friction Coefficient and Worn Surface of Ferromagnetic Materials under Magnetic Fields", Applied Mechanics and Materials (2016) 848, pp. 31-34.
11. N. Sanpo, J. Tharajak, J. Wang, C.C. Berndt, "Surface Investigation of Laser Glazed Mullite Thin Films on Yttria-Stabilized Zirconia Coatings", Applied Mechanics and Materials (2015) 804, pp.104-107.

ชื่อ : นายภูมิรัตน์ นวรัตน์
ที่ทำงาน : สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
โทรศัพท์ : 02-836-3000 ต่อ 7510
อีเมล : poomirat.n@rmutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

2562 Ph.D. Physics Rensselaer Polytechnics Institute, USA

2561 M.S. Physics Rensselaer Polytechnics Institute, USA

2557 B.A. Physics Middlebury College, USA

วารสารวิชาการ

1. P. Nawarat, K. Beach, V. Meunier, H. Terrones, G.-C. Wang, K. M. Wang, "Voltage Dependent Barrier Height of Electron Transport through Iron Porphyrin Molecular Junctions" J. Phys. Chem. C, vol. 125, pp. 7350–7357, Mar. 2021.
2. J. Littlejohn, Z. Li, Z. Lu, X. Sun, P. Nawarat, Y. Wang, Y. Li, T. Wang, Y. Chen, L. Zhang, H. Li, K. Kisslinger, S. Shi, J. Shi, A. Raeliarijaona, W. Shi, H. Terrones, K. M. Lewis, M. Washington, T. M. Lu, and G.-C. Wang, "Large metallic vanadium disulfide ultrathin flakes for spintronic circuits and quantum computing devices," ACS Appl. Nano Mater., vol. 2, no. 6, pp. 3684–3694, Jun. 2019.
3. P. Nawarat (Presenter), K. Beach, H. Terrones, G.-C. Wang, and K. M. Lewis, "Transition of Conduction Mechanism from Direct Tunneling to Fowler-Nordheim Tunneling in Iron Porphyrin (FeP) Molecular Junction", Howard-Columbia Collaboration Meeting, Columbia University, New York City, NY, USA, May. 2019. (Poster presentation)
4. P. Nawarat (Presenter), Z. Li, D. Frey, G.-C. Wang, and K. M. Lewis, "Characterization of the Metallic Property of Vanadium Disulfide (VS₂)", American Vacuum Society Spring, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, Jun. 2017. (Poster presentation)
5. P. Nawarat (Presenter), "15 Degrees Celsius in 15 Minutes: Optimal Temperature for Boost Laser", Summer symposium, Middlebury College, Middlebury, VT, USA, Aug. 2013. (Poster presentation)

ชื่อ : นายไพศาล การถาง
ที่ทำงาน : สาขาวิชาเทคโนโลยีสุขภาพ เครื่องสำอางและการชะลอวัย
 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
โทรศัพท์ : 02-836-3000 ต่อ 4194 , 4155
อีเมล : pk_quantum2000@yahoo.com, pkanthang@gmail.com

ประวัติการศึกษา

2552 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยมหิดล
 2548 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยมหิดล
 2543 วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยนเรศวร

วารสารวิชาการ

1. Wangdi D, Precharattana M, Kanthang P. A Guided Inquiry laboratory to enhance students' understanding of the Law of Mechanical Energy Conservation. International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education. 2020;28(1):29-43.
2. Wangdi D, Kanthang P, Precharattana M. Development of a hands-on model embedded with guided inquiry laboratory to enhance students' understanding of law of mechanical energy conservation. Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching. 2017;18: 1-27.
3. Nicomrat D, Kanthang P, Chamutpong S. The Relationships among Microorganisms in Paddy Soil of Rice Varieties at Sanamchaikate, Chachoengsao. Applied Mechanics and Materials. 2017; 866: 144-147.
4. Kanthang P. The Flour Processing Machine for Musa sapientum Linn. Applied Mechanics and Materials. 2017; 866: 85-87.
5. Kanthang P. The Study and Screening of Bacteria for Silver Nanoparticle Biosynthesis. Applied Mechanics and Materials. 2017; 866: 45-47.
6. Kanthang P. Image Enhancement for Characterization of MinD Protein Oscillation in Escherichia coli. Applied Mechanics and Materials. 2017; 866: 41-44.

7. Nicomrat D, Tharajak J, Kanthang P. Pesticides Contaminated in Rice Paddy Soil Affecting on Cultivated Microorganism Community. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; 848:135-138.
8. Nicomrat D, Tharajak J, Kanthang P. Microbial Comparison in Synthesizing Gold Nanoparticles for Harvesting Gold in Wastewater System. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; 848:52-55.
9. Saengpayab Y., Kanthang P., Schreier S., Modchang C., Nuttavut N., Triampo D., Triampo W. Biophysical approach to investigate temperature effects on protein dynamics. *EPJAP*. 2015; 71: 31201. (Impact Factor 0.774)
10. Vuttivorakulchai K, Kanthang P, Saiz Rivera A. The physics aspect of price index changes: Super- diffusive approach. *IJPS*. 2011; 6: 5850–5856. (Impact Factor 0.554)
11. Aroonnuat S, Ngamsaad W, Kanthang P, Nuttavut N, Triampo W, Triampo D, Krittanai C. Spatial distributions and energy landscape of MinE protein dynamics via the biophysical spot tracking technique. *IJPS*. 2011; 6: 3795–3806. (Impact Factor 0.554)
12. Kanthang P, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo W, Triampo D, Krittanai C. Biophysical approach for studying the MinD protein dynamics and energy landscape: a novel use of the spot tracking technique. *EPJAP*. 2011; 55: 11201. (Impact Factor 0.899)
13. Chadsuthi S., Triampo W., Modchang C., Kanthang P., Triampo D., Nuttavut N. Stochastic modeling and combined spatial pattern analysis of epidemic spreading. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 51: 1048-1055.
14. Ngamsaad W, Kanthang P, Modchang C, Sriyab S, Triampo W. The effect of boundary conditions on the mesoscopic lattice Boltzmann method: Case study of a reaction–diffusion based model for Min-protein oscillation. *Applied Mathematics and Computation*. 2010; 217:2339-47. (Impact Factor 1.124)
15. Yojina J, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo D, Lenbury Y, Kanthang P, Sriyab S, Triampo W. Investigating flow patterns in a channel with complex obstacles using the lattice Boltzmann method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010;24(10):2025-34. (Impact Factor 0.258)

16. Yojina J, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo D, Lenbury Y, Triampo W, Kanthang P and Sriyab S. More Realistic Model for Simulating Min Protein Dynamics: Lattice Boltzmann Method Incorporating the Role of Nucleoids. *International Journal of Computational and Mathematic Sciences*. 2010;4(3): 177-182.
17. Ngamsaad W, Yojina J, Kanthang P, Modchang C, Krittanai C, Triampo D, Nuttavut N, Triampo W. Quantitative approach of Min protein researches and applications: Experiments, mathematical modeling and computer simulations. *African Journal of Biotechnology*. 2009;8(25):7350-7362. (Impact Factor 0.547)
18. Sriyab S, Yojina J, Ngamsaad W, Kanthang P, Modchang C, Nuttavut N, Lenbury Y, Krittanai C, Triampo W. Mesoscale modeling technique for studying the dynamics oscillation of Min protein: Pattern formation analysis with lattice Boltzmann method. *Computers in biology and medicine* 2009; 39: 412-424. (Impact factor 1.170)
19. Unai S, Kanthang P, Junthon U, Ngamsaad W, Triampo W, Modchang C, Krittanai C. Quantitative analysis of time-series fluorescence microscopy using a spot tracking method: application to Min protein dynamics. *Biologia* 2009; 64: 27-42. (Impact factor 0.207)
20. Junthorn U, Unai S, Kanthang P, Ngamsaad W, Modchang C, Triampo W, Krittanai C, Triampo D, Lenbury Y. Single-Particle Tracking Method for Quantitative Tracking and Biophysical Studies of the MinE Protein. *Journal of the Korean physical society* 2008; 52: 639-48. (Impact factor 1.204)
21. Modchang C, Triampo W, Kanthang P, Junthorn U, Unai S, Ngamsaad W, Nuttavut N, Triampo D, Lenbury Y. Stochastic Modeling of External Electric Field Effect on Escherichia coli Min Protein Dynamics. *Journal of the Korean physical society* 2008; 53: 851-62. (Impact factor 1.204)
22. Ngamsaad W, Triampo W, Kanthang P, Modchang C, Nuttavut N, Tang IM, Lenbury Y. A lattice Boltzmann method for modeling the dynamic pole-to-pole oscillations of Min proteins for determining the position of the mid-cell division plane. *Journal of the Korean physical society* 2005; 46: 1025-30. (Impact factor 0.828)
23. Modchang C, Kanthang P, Triampo W, Ngamsaad W, Nuttavut N, Tang IM, Lenbury Y. Modeling of the Dynamic Pole-to-Pole Oscillations of the Min Proteins in Bacterial Cell

Division: The Effect of an External Field. Journal of the Korean physical society 2005; 46: 1031-6. (Impact factor 0.828)

รายงานการประชุมวิชาการ

1. Yodyingyong S., Triampo D., Triampo W., Kanthang P. A Cost-Effective Synthesis of Silica Aerogel by Ambient Pressure Drying Route. International Seminar on AEROGELS – 2014 on 6- 7 October 2014, Hamburg, Germany.
2. Yodyingyong S., Triampo D., Triampo W., Kanthang P. Rapid synthesis of Silica Aerogel by Ambient Pressure Drying Route, 2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, April 21-25, 2014, San Francisco, California, USA.
3. Charoenbhakdi S., Kanthang P. Quantitative Spatio-Temporal Dynamics Research Of Gfp-Min Proteins By Using Spot Tracking Technique. 38th Congresson Science and Technology of Thailand (STT.38), October 11-19, 2012, Chiang Mai University, Thailand.
4. Nicomrat D., Chadathorn P., Kanthang P., Ritthong W. A PCR machine prototype using liquid heat transfer system. 38th Congresson Science and Technology of Thailand (STT.38), October 11-19, 2012, Chiang Mai University, Thailand.
5. Seeha P., Rooraksa A., Pramaingam S., Waiyawut W., Kanthang P. The pneumatic mechanical tools for classification of five commercial rice varieties. The First ASEAN Plus