



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากถ่านกัมมันต์
ของเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

Efficiency of Supercapacitor with Activated Carbon from
Tamarind seed and fruit shell

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประจำปีงบประมาณ 2566

รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากถ่านกัมมันต์
ของเมล็ดและเปลือกฝักริมมะขาม

Efficiency of Supercapacitor with Activated Carbon from
Tamarind seed and fruit shell

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ทุนอุดหนุนงานวิจัย พัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ประจำปีงบประมาณ 2566

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

(ก)

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำต่าง ๆ จากคณาจารย์ในมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และความร่วมมือช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ที่สละเวลาให้คำแนะนำคำปรึกษา รวมถึงข้อเสนอแนะต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความกรุณา ให้คำปรึกษาแนะนำ ให้แก่ผู้วิจัย โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากทุนอุดหนุนงานวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ทุนอุดหนุนงานวิจัย พัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 จึงขอขอบคุณที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์

11 ธันวาคม 2566

(ข)

ชื่องานวิจัย	ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากถ่านกัมมันต์ของเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม
	Efficiency of Supercapacitor with Activated Carbon from Tamarind seed and fruit shell
ผู้วิจัย	ศานิตย์ สุวรรณวงศ์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ปีเสร็จวิจัย 2566

บทคัดย่อ

จังหวัดเพชรบูรณ์เป็นจังหวัดที่มีมะขามหวานเป็นผลไม้ทางเศรษฐกิจที่สำคัญ แต่ด้วยเศษที่เหลือจากการรับประทานเนื้อมะขามคือเมล็ดและเปลือกฝักมะขามนั้น ซึ่งเมล็ดและเปลือกฝักมะขามสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประโยชน์ในด้านแหล่งกักเก็บพลังงานและใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขามด้วยการผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วนโดยน้ำหนักดังนี้ 1:4 2:3 1:1 3:2 และ 4:1 ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill) จากนั้นนำไปเคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด แล้วประกอบเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบ coin cell

ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์แล้วด้วยเทคนิค XRD พบโครงสร้างของคาร์บอน จากนั้นตรวจสอบขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์ BET พบว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าเปลือกฝักมะขาม แต่ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขามเป็นอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM จะเห็นได้คาร์บอนแบล็คยึดเกาะกับถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขาม เมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า มีพันธะ O-H stretch ในสัดส่วนของเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค 2:3 มีการดูดกลืนน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพแล้ว พบว่า มีค่าความหนาแน่นของพลังงานและค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าคาร์บอนแบล็ค และถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม ดังนั้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ผสมคาร์บอนแบล็คทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: ตัวเก็บประจุยิ่งยวด, ถ่านกัมมันต์, คาร์บอนแบล็ค, มะขาม

Research title Efficiency of Supercapacitor with Activated Carbon from
Tamarind seed and fruit shell

Researcher Mr. Sanit Suwanwong

Division Physics

Phetchabun Rajabhat University, Year 2023

Abstact

Phetchabun Province has sweet tamarind which is an important economic fruit. The residue left from eating the tamarind are the seeds and the fruit shell. It can be synthesized into activated carbon that is useful in energy storage and supercapacitor electrodes. In this research, the efficiency of activated carbon from tamarind seeds and fruit shells was increased by mixing with carbon black in the following proportions by weight: 1:4, 2:3, 1:1, 3:2, and 4:1 using a ball mill. Then it is coated onto aluminum foil. To be used as the electrodes of the supercapacitor and then assembled into a coin cell supercapacitor.

In examining the pore size and surface area were examined using the BET technique found that the tamarind seed activated carbon had a smaller pore size than the fruit shell. The tamarind seed has a much higher surface area than the fruit shell, which is consistent with the SEM images. Carbon black adheres better to activated carbon from tamarind seeds than to fruit shell. This is activated carbon from tamarind seeds has a higher surface area than fruit shell. The functional groups were then examined using the FT-IR technique found that the O-H stretch bond of supercapacitors from tamarind seeds mixed with carbon black at a ratio of 2:3 had the least absorption. Analysis of the efficiency of the supercapacitor found that it has a specific energy density value and the specific capacitance is higher than carbon black and tamarind fruit shells. Therefore, the supercapacitor of tamarind seed activated carbon mixed with carbon black achieves maximum efficiency.

Keywords: supercapacitor, activated carbon, carbon black, tamarind

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ	2
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 มะขามหวาน	3
2.2 ถ่านกัมมันต์และคาร์บอนแบล็ค	4
2.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	5
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	7
3.1 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม	7
3.2 การเตรียมสัณฐานของคาร์บอนแบล็คกับถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือก ฝักมะขาม	8
3.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	11
3.4 การประกอบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด	14
3.5 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค XRD	15
3.6 ตรวจสอบรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET	15
3.7 ตรวจสอบพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค SEM	16
3.8 ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของขั้วตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิค FT-IR	17
3.9 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	19
4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม	19
4.2 รูพรุนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม	20
4.3 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม	21
4.4 หมู่ฟังก์ชันของขั้วตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิค FT-IT	24
4.5 ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	26
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	29
5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	31
ประวัติผู้วิจัย	33

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค 8
3.2	ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค 8
4.1	ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม 20
4.2	ความหนาแน่นของพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด จากถ่านกัมมันต์ของเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม และคาร์บอนแบล็ค 27
4.3	ความหนาแน่นของพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด จากถ่านกัมมันต์ของเมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค 27
4.4	ความหนาแน่นของพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวด จากถ่านกัมมันต์ของเปลือกฝักมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค 27

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ก) เปลือกฝักมะขาม และ ข) เมล็ดมะขาม	3
2.2 รูปแบบของขี้ไฟฟ้าจากถ่านกัมมันต์	4
2.3 การกระจายตัวของประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด	5
3.1 ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC)	7
3.2 เครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill)	9
3.3 ก) ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค และ ข) ถ่านกัมมันต์ จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค	10
3.4 การเตรียมละลายลาว LA 133	11
3.5 สารละลายลาวของถ่านกัมมันต์และคาร์บอนแบล็ค	12
3.6 ขี้ไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	13
3.7 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบ Coin cell	14
3.8 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)	15
3.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope	16
3.10 เครื่อง FT-IR Spectrometer	17
3.11 การวัดประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเครื่อง Battery Testers system ..	18
4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม	19
4.2 ภาพถ่าย SEM จาก ก) ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม (AC_TSC) ข) ถ่านกัมมันต์ฝักมะขาม (AC_TPC) และ ค) คาร์บอนแบล็ค	21
4.3 ภาพถ่าย SEM ของ ก) ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์จาก เมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ข) 1 : 4 ค) 2 : 3 ง) 1 : 1 จ) 3 : 2 และ ฉ) 4 : 1	22
4.4 ภาพถ่าย SEM ของ ก) ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม และถ่านกัมมันต์ จากเปลือกฝักมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ข) 1 : 4 ค) 2 : 3 ง) 1 : 1 จ) 3 : 2 และ ฉ) 4 : 1	23
4.5 หมู่ฟังก์ชันของขี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค	24
4.6 หมู่ฟังก์ชันของขี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค	25

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จังหวัดเพชรบูรณ์มีผลไม้ที่สำคัญทางเศรษฐกิจที่สำคัญคือมะขามหวาน มะขามหวานสามารถรับประทานได้เฉพาะเนื้อที่อยู่ในฝักมะขาม ทำให้เหลือส่วนที่รับประทานไม่ได้คือส่วนที่เป็นเมล็ดและเปลือกมะขาม ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงและสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์ (ถ่านคาร์บอน) จากเมล็ดและเปลือกมะขาม ในทางไฟฟ้าสามารถนำถ่านกัมมันต์มาใช้เป็นส่วนผสมเพื่อใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาจากเศษขยะเหลือทิ้งที่นำมาขามาแปรรูปได้ และยังสามารถระบายให้กับอุตสาหกรรมพลังงานได้ เมื่อนำเปลือกและเมล็ดมะขามมาสังเคราะห์เป็นสารนาโนคาร์บอน (Perathoner, S., 2017) และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ได้ ซึ่งมีรูปทรงสูง เมื่อนำมาเติมลงไปในตัววัสดุบางชนิดจะเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บสะสมประจุไฟฟ้า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวต้านทาน ทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุ แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เป็นต้น ในอุตสาหกรรมทางด้านแหล่งกักเก็บพลังงานอย่างเช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นนิยมใช้ร่วมกับถ่านกัมมันต์ผสมรวมกับสารคาร์บอนบางชนิดเพื่อลดต้นทุนในการผลิตขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

การพัฒนาทางด้านพลังงานและแหล่งกักเก็บพลังงานในปัจจุบัน เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด พบว่า แบตเตอรี่ต้องใช้เวลาในการอัดประจุไฟฟ้าเป็นเวลานาน แต่มีรอบในการอัดประจุและการใช้งานค่อนข้างต่ำ ส่วนตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีการอัดประจุไฟฟ้าได้รวดเร็ว แต่เก็บประจุไฟฟ้าได้น้อยกว่า คาปาซิเตอร์ประจุไฟฟ้าได้เร็วมาก ในปัจจุบันได้มีการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งมีการอัดประจุไฟฟ้าได้รวดเร็วมาก ใช้เวลาภายใน 10 วินาที และสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้ถึง 1,000 เท่าของตัวเก็บประจุแบบปกติ และยังสามารถคายประจุไฟฟ้าได้นานมาก

ดังนั้นในการพัฒนาแหล่งกักเก็บพลังงานด้วยการประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ด้วยการผสมคาร์บอนแบล็คร่วมกับถ่านกัมมันต์แล้วเคลือบลงบนแผ่นอะลูมิเนียม ก็จะได้ขั้วของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นวิธีเตรียมขั้วที่ประหยัดค่าใช้จ่าย จึงเลือกใช้การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์เมล็ดและเปลือกมะขาม ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหนึ่งในจังหวัดเพชรบูรณ์ และช่วยแก้ปัญหาเศษขยะเหลือทิ้ง อีกทั้งยังนำมามาลดรายจ่ายให้กับอุตสาหกรรมพลังงาน อย่างเช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อใช้ทำเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานที่ได้จากแหล่งผลิตไฟฟ้า เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม เครื่องปั่นไฟ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกมะขาม

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ไม่เติมและเติมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ขอบเขตเรื่องประชากร คือ ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกมะขาม และตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.3.2 ขอบเขตเรื่องเนื้อหา ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ความหนาแน่นพลังงาน และประสิทธิภาพการอัดและคายประจุ

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

Activated carbon คือ ถ่านกัมมันต์

Carbon black คือ คาร์บอนแบล็ค

Supercapacitor คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

1.5.1 ด้านวิชาการ ผู้ได้รับประโยชน์ คือ ชุมชน นักเรียน นักศึกษา ครู อาจารย์ และผู้วิจัย

- พัฒนาประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน
- พัฒนานักวิจัย นักศึกษา นักเรียน ในการศึกษาครั้งนี้

1.5.2 ด้านเศรษฐกิจ สังคมและชุมชน

- ได้แหล่งกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง

1.5.3 เผยแพร่ในวารสารวิชาการ

- เรื่องประสิทธิภาพของเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดจากถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเมล็ดและฝักมะขาม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะขามหวาน

มะขามหวาน (sweet tamarind) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Tamarind indica* L. มีถิ่นกำเนิดที่เอเชียใต้และแอฟริกาตะวันออก เป็นไม้ยืนต้น ลำต้นมีสีเทาดำ มีความสูงประมาณ 10 – 25 เมตร มีใบย่อย 24 – 32 คู่ ผลเป็นฝักยาวมีหลายเมล็ด ฝักแก่มีสีน้ำตาล เมล็ดสีน้ำตาลแดงรูปสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 2.1 มีหลายพันธุ์ ได้แก่ หมื่นจง สีทอง ศรีชมพู ชันดี



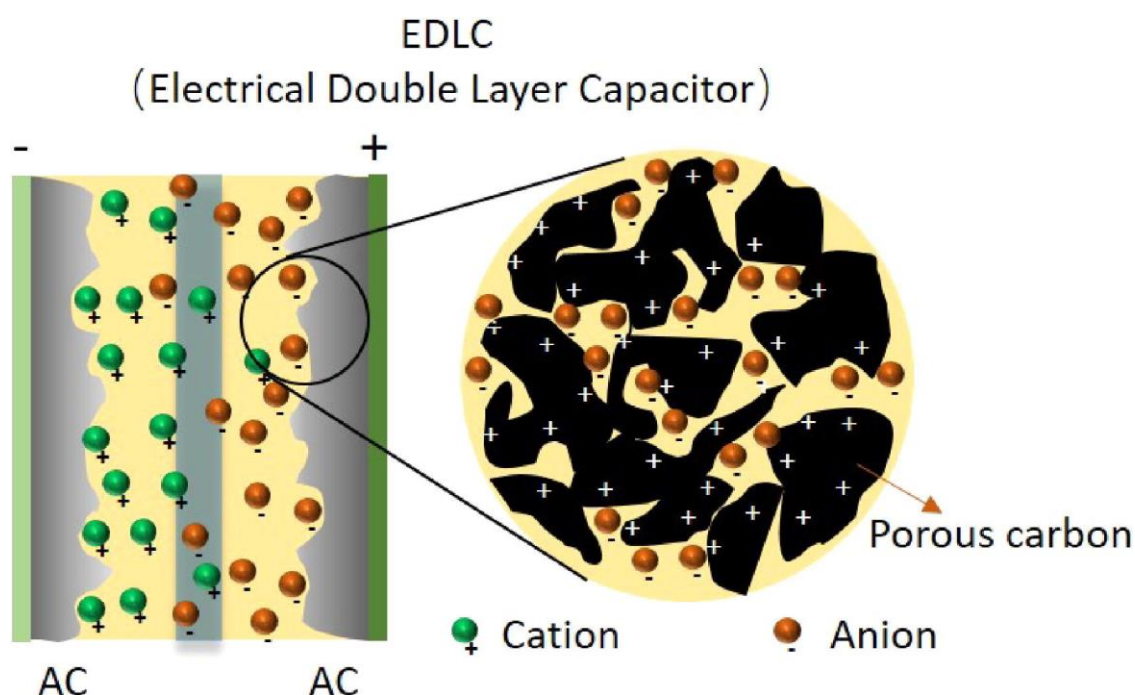
ภาพที่ 2.1 ก) เปลือกฝักมะขาม และ ข) เมล็ดมะขาม

2.2 ถ่านกัมมันต์และคาร์บอนแบล็ค

ธาตุคาร์บอน (C) พบได้มากที่สุดสิ่งมีชีวิตในรูปแบบของเพชร แกรไฟท์ ท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น (อภิชาติ ด้านวิทยากุล, 2553) สำหรับเพชรมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์แบบเพชเชนเตอร์ ที่มีความแข็งแรงมาก ส่วนแกรไฟท์มีโครงสร้างพันธะเดี่ยวและคู่สลับกัน เกิดจากการซ้อนทับกันของแผ่นกราฟีน ส่วนท่อนาโนคาร์บอน มีค่าการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนได้เป็นอย่างดี เป็นได้ทั้งตัวนำหรือกึ่งตัวนำ (Perathoner, S., et al, 2017) สร้างความแข็งแรงต่อโครงสร้างของวัสดุที่ถูกเติมลงไป อีกทั้งยังมีรูปทรงสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้เราจะใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นวัสดุที่ได้จากพืชที่มีองค์ประกอบหลักเป็นสารคาร์บอน มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวที่มีรูปทรงสูง และมีคุณสมบัติในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี (Yeh, C-L., 2015) เหมาะกับการใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับแหล่งกักเก็บพลังงาน (Dubey, P., et al, 2020) ในงานแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Endo, M., et al, 2001)



ภาพที่ 2.2 รูปแบบของขั้วไฟฟ้าจากถ่านกัมมันต์ (Lin, Z., et al, 2018)

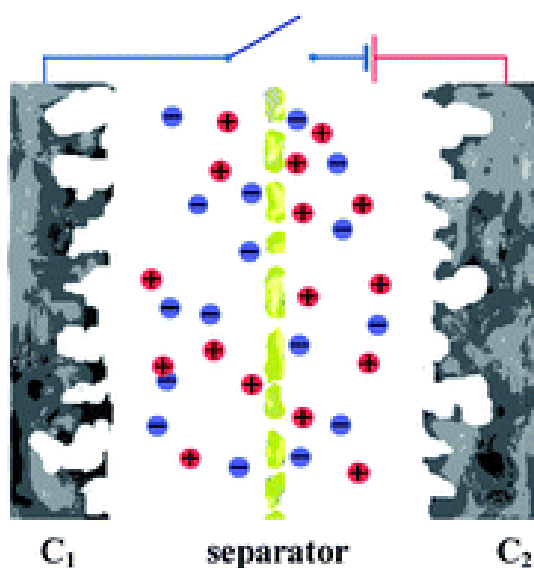
2.2.2 คาร์บอนแบล็ค

คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) เป็นสารคาร์บอน ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำละเอียด มีรูปทรงสูง เกิดจากการกระบวนการทางความร้อนของสารจำพวก น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน ใช้งานในด้านอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ย้อมสี ใช้เป็นสื่อนำไฟฟ้า และใช้ทำขั้วไฟฟ้าของแหล่งกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Kossyrev, P., 2012)

2.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นอุปกรณ์แหล่งกักเก็บพลังงาน ที่มีความสามารถในการอัดประจุไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 10 วินาที และสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าได้ถึง 10,000 ฟารัด ส่งผลให้มีการเก็บประจุไฟฟ้าได้นาน (วรวิศ กอปรศิริพัฒน์, 2014) ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้จากการทำขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่ใช้สารคาร์บอน (Xiong, W., et al., 2011) ได้แก่ กราฟีน นาโนคาร์บอน ถ่านกัมมันต์ และคาร์บอนแบล็ค ซึ่งมีรูปทรงสูงมาก มีสารออร์แกนิกอิเล็กโทรไลต์เป็นไอออน และมีแผ่นคั่นกลางระหว่างขั้ว (separator) ซึ่งยอมให้อิออนผ่านไปได้

ในการใช้ถ่านกัมมันต์ประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วที่อยู่ระหว่างแผ่นคั่นกลางระหว่างขั้วของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ทำหน้าเกิดเป็นชั้นในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Electrical Double Layer, EDL) พร้อมกับรูปทรงที่มีมากของถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดมีการเก็บประจุได้เพิ่มขึ้น (Frackowiak, E., 2007) ในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มสัดส่วนของถ่านกัมมันต์กับคาร์บอนแบล็ค เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด



ภาพที่ 2.3 การกระจายตัวของประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Frackowiak, E., 2007)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Battery Testers system ยี่ห้อ NEWARE รุ่น BTS3000 ใช้การหาประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Sahin, M.E., et al., 2020) โดยเริ่มจากการหาค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Specific energy density, ED) จากสมการที่ 2.1 เพื่อนำมาหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance, C_s) ซึ่งหาได้จาก

$$ED = \frac{1}{2} C_s (\Delta V)^2 = \frac{1}{2} \frac{C}{m} (\Delta V)^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ ED คือ ความหนาแน่นของพลังงาน (หน่วยเป็น mWh/g)

C_s คือ ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (หน่วยเป็น F/g)

ΔV คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (หน่วยเป็น V)

m คือ มวลของถ่านคาร์บอนที่ใช้ทำขั้วทั้ง 2 ด้าน (หน่วยเป็น g)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม

- 1) นำเปลือกฝักมะขามมาล้างด้วยน้ำ DI จากนั้นนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำเปลือกฝักมะขามมาบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 400°C เรียกกระบวนการนี้ว่า before activation tamarind pod carbon (BA-TPC)
- 3) จากนั้นเตรียมสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 3M ในน้ำ DI
- 4) นำ BA-TPC ไปเผาที่อุณหภูมิ 400°C จะได้สารที่ถูกกระตุ้นแล้ว (TSC-KOH)
- 5) แล้วนำมาล้างด้วยน้ำ DI สลับกับกรด HCl จนมีค่า pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้ง จะได้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC)

ตอนที่ 2 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

นำเมล็ดมะขามมาทำตามขั้นตอนเดียวกับตอนที่ 1 ได้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC)

3.2 การเตรียมสัดส่วนของคาร์บอนแบล็คกับถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

นำถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) และคาร์บอนแบล็ค (CB) มาผสมกันโดยน้ำหนัก ตามสัดส่วนโดยน้ำหนักดังตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล ball mill ดังภาพที่ 3.2 จากนั้นนำถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) และคาร์บอนแบล็ค (CB) มาผสมกันโดยน้ำหนัก ตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill) ดังภาพที่ 3.2 จะได้ถ่านกัมมันต์และคาร์บอนแบล็คที่ผสมกันแล้วดังภาพที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

สัดส่วน	น้ำหนัก (กรัม)	
	เปลือกฝักมะขาม	คาร์บอนแบล็ค
1 : 0	1	0
1 : 4	1	4
2 : 3	2	3
1 : 1	2.5	2.5
3 : 2	3	2
4 : 1	4	1

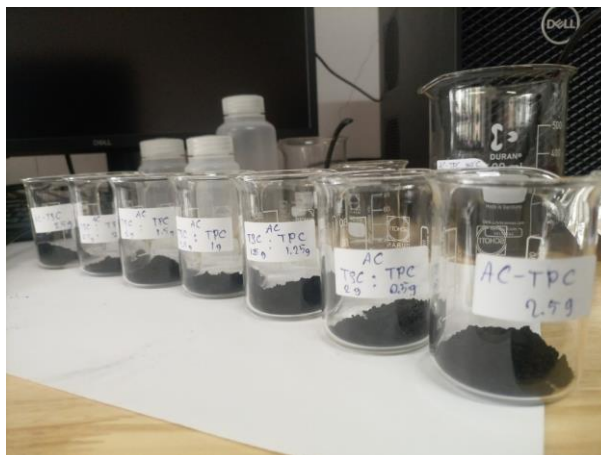
ตารางที่ 3.2 ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

สัดส่วน	น้ำหนัก (กรัม)	
	เมล็ดมะขาม	คาร์บอนแบล็ค
1 : 0	1	0
1 : 4	1	4
2 : 3	2	3
1 : 1	2.5	2.5
3 : 2	3	2
4 : 1	4	1



ภาพที่ 3.2 เครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill)

ก)



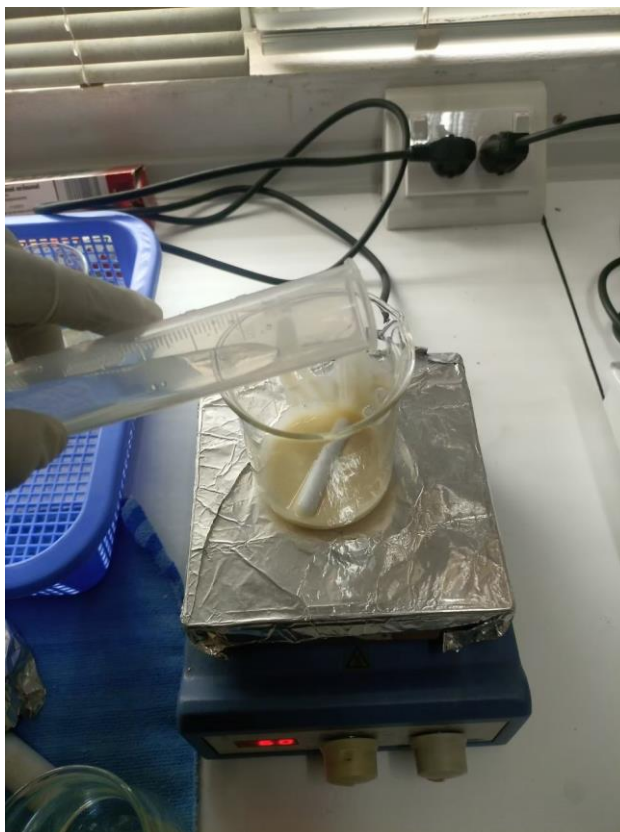
ข)



ภาพที่ 3.3 ก) ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค
และ ข) ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

3.3 การเตรียมขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1) เตรียมสารละลายการ โดยการผสมกาว LA 133 (บริษัท Linyi Gelon LIB Co., Ltd.) 20 กรัม ลงในน้ำ DI 40 ml แล้วกวนให้เข้ากัน ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายการ LA 133 ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การเตรียมละลายการ LA 133

2) จากนั้นเทถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คแล้ว 2 กรัม ที่ได้จากตารางที่ 3.1 และ 3.2 ลงในสารละลายกาว LA 133 แล้วกวนต่ออีก 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C จะได้สารละลายกาวของถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 สารละลายกาวของถ่านกัมมันต์และคาร์บอนแบล็ค

3) ตัดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ ให้มีขนาด 10 x 20 cm แล้วเทสารละลายกาวที่ผสมไว้แล้ว ลงบนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ แล้วใช้แท่งแก้วปาดให้เป็นแผ่นเรียบ แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที จะได้ฟิล์มคาร์บอนที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

3.4 การประกอบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

- 1) นำฟิล์มคาร์บอนที่เคลือบบนอะลูมิเนียมฟอยล์ มาตัดเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เพื่อใช้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด 1 อัน
- 2) เตรียมสารอิเล็กโทรไลต์ โดยนำสารTetraethylammonium tetrafluoroborate ที่ความเข้มข้น 1 M ในสาร Acetonitrile 20 ml แล้วกวนให้เข้ากัน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) ทำการประกอบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell โดยเรียงลำดับชั้นดังนี้ Coin cell base, ขั้วจากฟิล์มคาร์บอน, หยดสารอิเล็กโทรไลต์, แผ่นคั่นกลาง, หยดสารอิเล็กโทรไลต์, ขั้วจากฟิล์มคาร์บอน, Spacer, Spring, และ Coin cell lid
- 4) นำตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบ coin cell ที่ประกอบเสร็จแล้ว เข้าเครื่องอัดไฮโดรลิคด้วยแรงกด 0.25 ตัน เป็นเวลา 2 นาที จะได้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบ coin cell ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบ Coin cell

3.5 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค XRD

ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น AERIS ดังภาพที่ 3.8 โดยใช้ช่วงวัดที่ $20-80^{\circ}$



ภาพที่ 3.8 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

3.6 ตรวจสอบรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค BET

ตรวจสอบรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่และความพรุนของอนุภาค ด้วยเครื่อง High-Performance Adsorption Analyzer (BET : 3Flex) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น 3Flex เพื่อหาพื้นที่ผิว (BET Surface Area) และขนาดของรูพรุน (Pore Size)

3.7 ตรวจสอบพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค SEM

ตรวจสอบพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (ยี่ห้อ thermo SCIENTIFIC รุ่น Phenom XL) ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่อง Scanning Electron Microscope

3.8 ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจักษ์ด้วยเทคนิค FT-IR

ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจักษ์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ด้วยเครื่อง FT-IR Spectrometer (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum Two)



ภาพที่ 3.10 เครื่อง FT-IR Spectrometer

3.9 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบ Coin cell โดยใช้เครื่อง Battery Testers system ยี่ห้อ NEWARE รุ่น BTS 3000 ดังภาพที่ 3.11 โดยหาค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Specific energy density, ED) จากสมการที่ 2.1 เพื่อนำมาหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance, C_s)



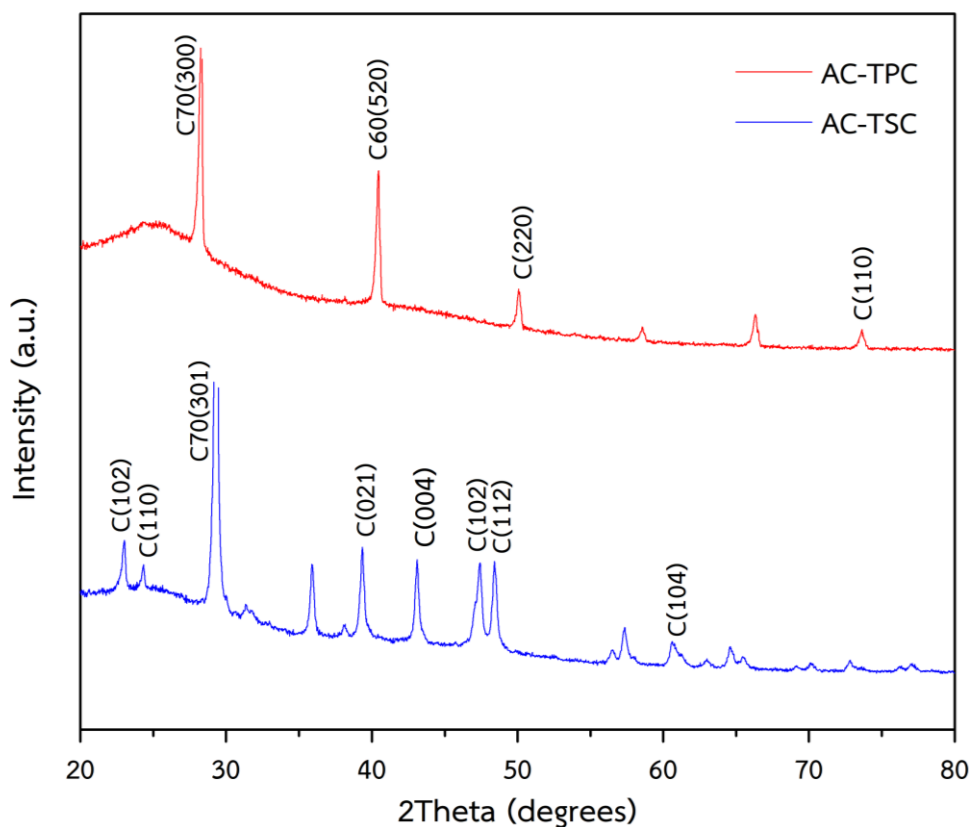
ภาพที่ 3.11 การวัดประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเครื่อง Battery Testers system

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) โดยใช้ช่วงวัดที่ $20-80^{\circ}$ ดังภาพที่ 4.1 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) มีโครงสร้างผลึกตามระนาบดังต่อไปนี้ C70(301) และ C มีระนาบเป็น 102 110 021 004 102 112 104 สำหรับถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) มีระนาบดังต่อไปนี้ C70(300) C60(520) และ C มีระนาบเป็น 220 110



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

4.2 รูพรุนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

ในการตรวจสอบขนาดรูพรุน (Pore size) และพื้นที่ผิว (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ด้วยเครื่องวิเคราะห์ BET ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) มีขนาดรูพรุนเป็น 6.8841 nm และพื้นที่ผิว 3.5006 m²/g และสำหรับถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) มีขนาดรูพรุนเป็น 7.3902 nm และพื้นที่ผิว 0.8605 m²/g ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าเปลือกฝักมะขาม แต่ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขามเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 4.1 ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

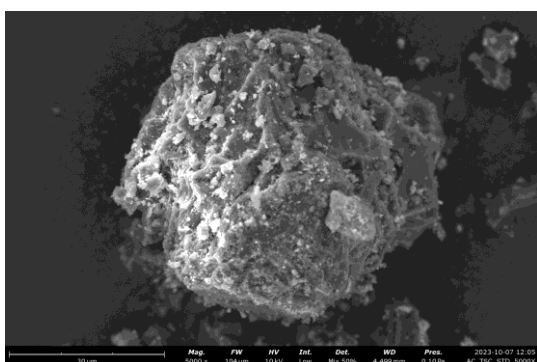
ลำดับ	สารตัวอย่าง	ขนาดรูพรุน (nm)	พื้นที่ผิว (m ² /g)
1	ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC)	6.8841	3.5006
2	ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC)	7.3902	0.8605

4.3 พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม

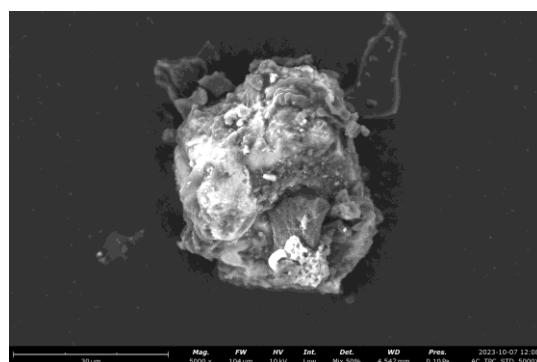
4.3.1 ภาพถ่าย SEM ของจากเมล็ดและเปลือกฝักมะขามก่อนผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ในการตรวจสอบพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม และคาร์บอนแบล็คก่อนทำการผสมดังภาพที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง BET พบว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขาม

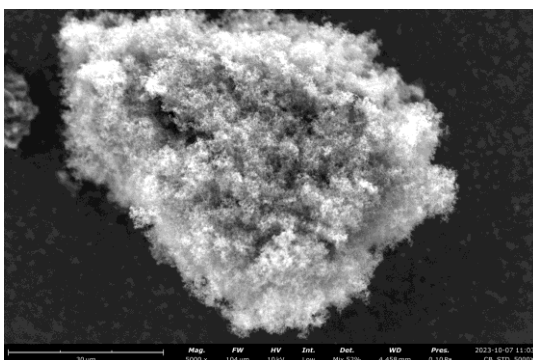
ก)



ข)



ค)

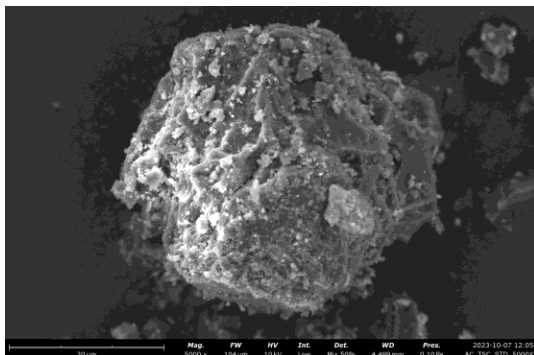


ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM จาก ก) ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม (AC_TSC)
ข) ถ่านกัมมันต์เปลือกมะขาม (AC_TPC) และ ค) คาร์บอนแบล็ค

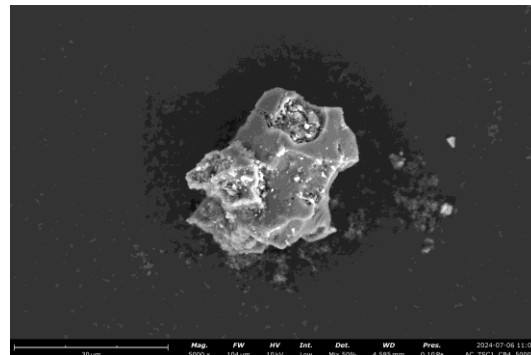
4.3.2 ภาพถ่าย SEM ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ภาพถ่าย SEM ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ข) 1 : 4 ค) 2 : 3 ง) 1 : 1 จ) 3 : 2 และ ฉ) 4 : 1 ดังภาพที่ 4.3

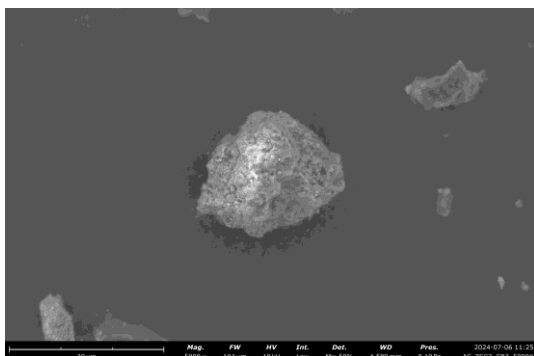
ก)



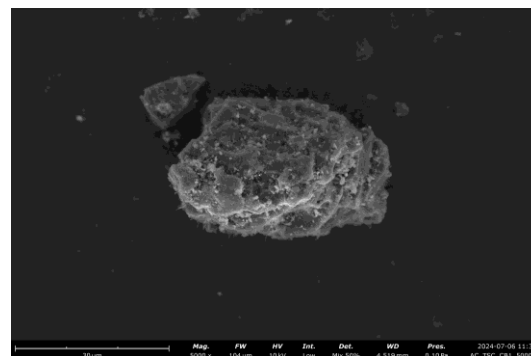
ข)



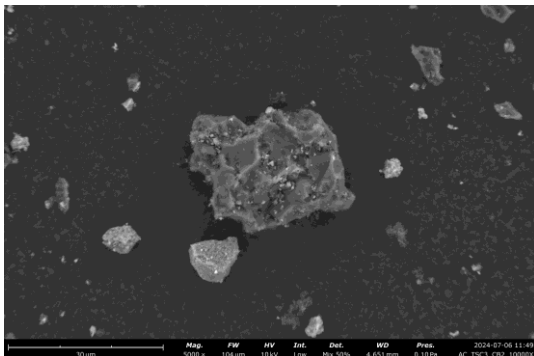
ค)



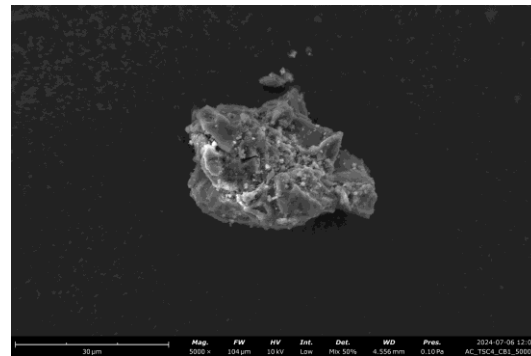
ง)



จ)



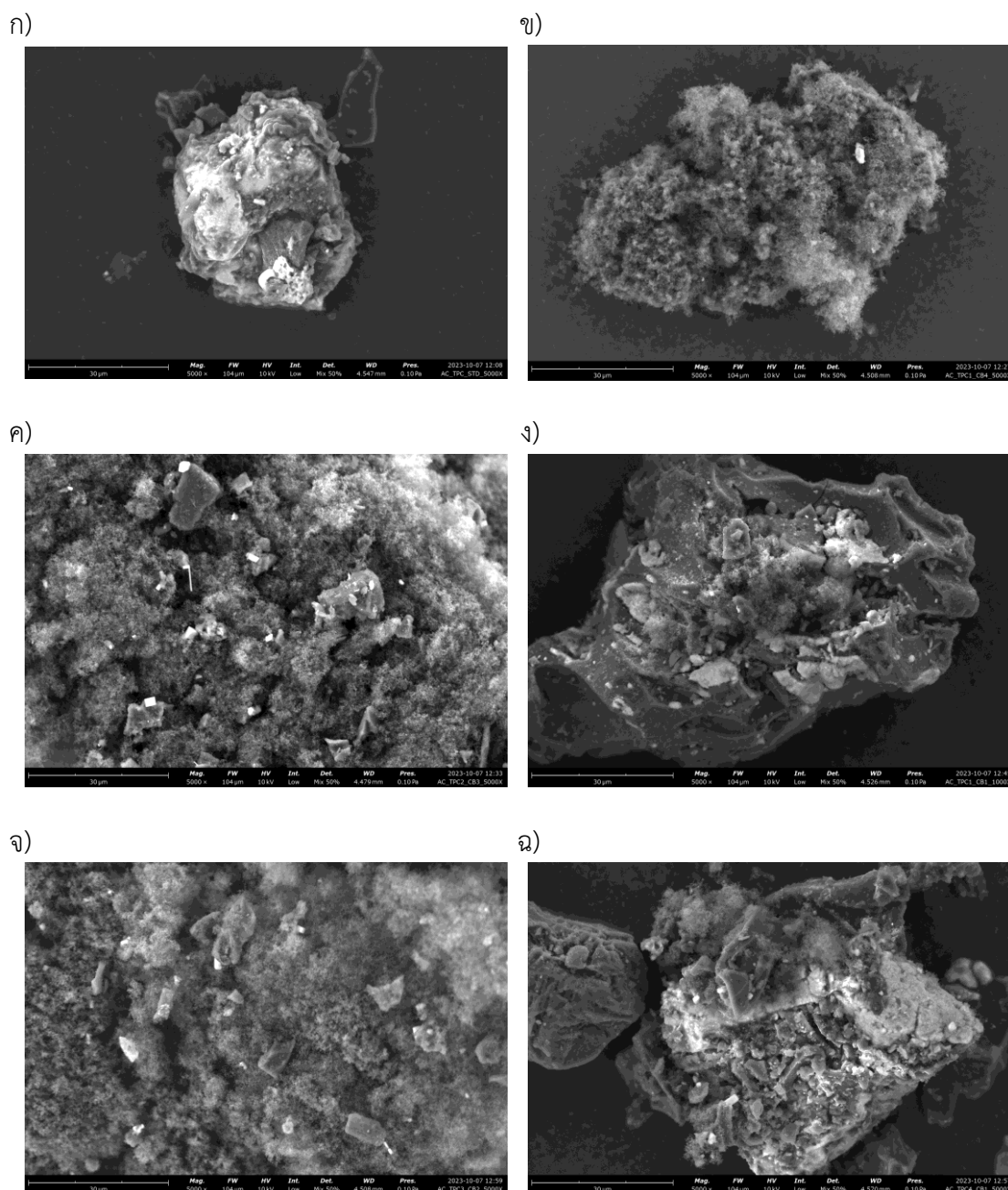
ฉ)



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของ ก) ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ข) 1 : 4 ค) 2 : 3 ง) 1 : 1 จ) 3 : 2 และ ฉ) 4 : 1

4.3.3 ภาพถ่าย SEM ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ภาพถ่าย SEM ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม และถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ข) 1 : 4 ค) 2 : 3 ง) 1 : 1 จ) 3 : 2 และ ฉ) 4 : 1 ดังภาพที่ 4.4

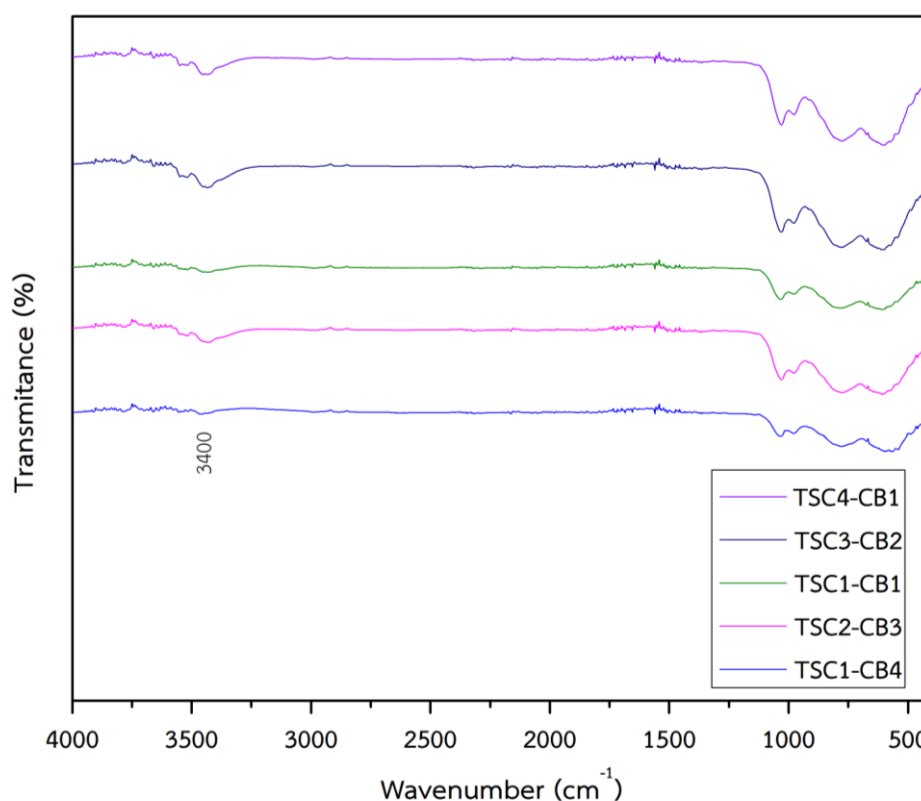


ภาพที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของ ก) ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม และถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ข) 1 : 4 ค) 2 : 3 ง) 1 : 1 จ) 3 : 2 และ ฉ) 4 : 1

4.4 หมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิค FT-IT

4.4.1 หมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

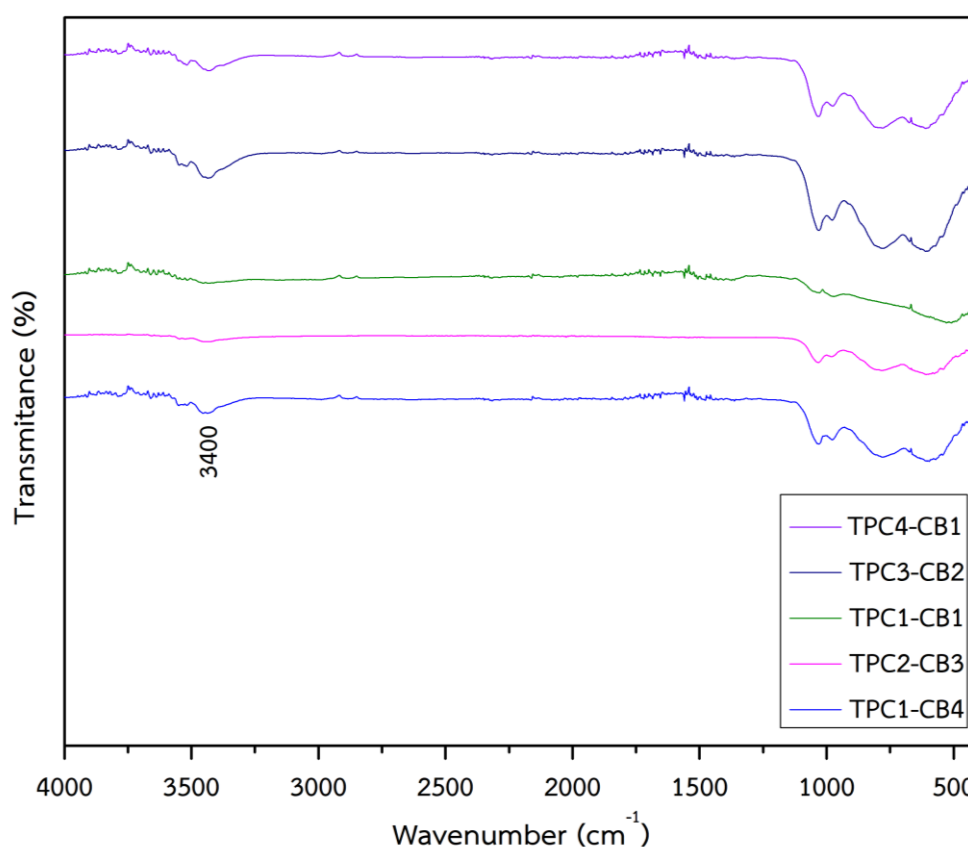
ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3400 cm^{-1} มีพันธะ O-H stretch ในสัดส่วนของ 3:2 (TSC3-CB2) มีการดูดกลืนมากที่สุด รองลงมา 4:1 (TSC4-CB1) ถัดมา 2:3 (TSC2-CB3) ถัดมา 1:4 (TSC1-CB4) และ 1:1 (TSC1-CB1) ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 หมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

4.4.2 หมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุยิ่งยวดจากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุยิ่งยวดจากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3400 cm^{-1} มีพันธะ O-H stretch ในสัดส่วนของ 3:2 (TPC3-CB2) มีการดูดกลืนมากที่สุด รองลงมา 1:4 (TPC1-CB4) ถัดมา 4:1 (TPC4-CB1) ถัดมา 1:1 (TPC1-CB1) และ 2:3 (TPC2-CB3) ดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 หมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุยิ่งยวดจากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

4.5 ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขามและคาร์บอนแบล็ก โดยการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Specific energy density, ED) เพื่อนำมาหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance, C_s) ด้วยเครื่อง Battery Testers system ยี่ห้อ NEWARE รุ่น BTS 3000 ดังตารางที่ 4.2 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม มีค่าความหนาแน่นของพลังงานเป็น 0.5568 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 0.7919 F/g ซึ่งสูงกว่าคาร์บอนแบล็ก และถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม ตามลำดับ

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามด้วยการผสมคาร์บอนแบล็กในสัดส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 4.3 พบว่า TSC2-CB3 (สัดส่วน 2:3) มีค่าความหนาแน่นของพลังงานเป็น 1.2539 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 1.7833 F/g ซึ่งมีค่าสูงที่สุด รองลงมา 3:2 1:0 1:1 4:1 และ 1:4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กที่สัดส่วน 2:3 และ 3:2 ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานและค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้ผสมคาร์บอนแบล็ก และคาร์บอนแบล็ก ตามลำดับ

สำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามที่ผสมคาร์บอนแบล็กในสัดส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 4.4 พบว่า TPC-CB1 (สัดส่วน 4:1) มีค่าความหนาแน่นของพลังงานเป็น 0.5703 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 0.8111 F/g ซึ่งมีค่าสูงที่สุด รองลงมา 2:3 3:2 1:1 1:4 และ 1:0 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กที่สัดส่วน 4:1 และ 2:3 ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานและค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าคาร์บอนแบล็ก และถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้ผสมคาร์บอนแบล็ก ตามลำดับ

ดังนั้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ผสมคาร์บอนแบล็กที่สัดส่วน 2:3 (TSC2-CB3) ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานและค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการเติมคาร์บอนแบล็กเพื่อทำขั้วของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมา TSC3-CB2 TPC4-CB1 ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้ผสมคาร์บอนแบล็ก

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นของพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจาก ถ่านกัมมันต์ของเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม และคาร์บอนแบล็ค

ลำดับ	สารตัวอย่าง	ความหนาแน่นของพลังงาน (mWh/g)	ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F/g)
1	ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC)	0.5568	0.7919
2	ถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝัก มะขาม (AC-TPC)	0.1621	0.2305
3	คาร์บอนแบล็ค (CB)	0.3759	0.5346

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจาก ถ่านกัมมันต์ของเมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ลำดับ	สารตัวอย่าง	สัดส่วน	ความหนาแน่นของพลังงาน (mWh/g)	ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F/g)
1	AC-TSC	1:0	0.5568	0.7919
2	TSC1-CB4	1:4	0.3589	0.5104
3	TSC2-CB3	2:3	1.2539	1.7833
4	TSC1-CB1	1:1	0.546	0.7765
5	TSC3-CB2	3:2	0.9675	1.3760
6	TSC4-CB1	4:1	0.4102	0.5834

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นของพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจาก ถ่านกัมมันต์ของเปลือกฝักมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ลำดับ	สารตัวอย่าง	สัดส่วน	ความหนาแน่นของพลังงาน (mWh/g)	ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F/g)
1	AC-TPC	1:0	0.1621	0.2305
2	TPC1-CB4	1:4	0.2019	0.2871
3	TPC2-CB3	2:3	0.3902	0.5549
4	TPC1-CB1	1:1	0.234	0.3328
5	TPC3-CB2	3:2	0.266	0.3783
6	TPC4-CB1	4:1	0.5703	0.8111

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ด้วยเทคนิค XRD พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) มีระนาบ ดังนี้ C70(301) และ C มีระนาบเป็น 102 110 021 004 102 112 104 สำหรับถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) มีระนาบดังต่อไปนี้ C70(300) C60(520) และ C มีระนาบเป็น 220 110

5.1.2 การตรวจสอบขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ด้วยเครื่องวิเคราะห์ BET พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าเปลือกฝักมะขาม แต่ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขามเป็นอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM จะเห็นได้คาร์บอนแบล็คยึดเกาะกับถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขาม

5.1.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3400 cm^{-1} มีพันธะ O-H stretch ในสัดส่วนของ 3:2 (TSC3-CB2) มีการดูดกลืนมากที่สุด และ 2:3 มีการดูดกลืนน้อยที่สุด สำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเปลือกฝักมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค พบว่าสัดส่วนของ 3:2 (TPC3-CB2) มีการดูดกลืนมากที่สุด และ 2:3 (TPC2-CB3)

5.1.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขามและคาร์บอนแบล็ค พบว่า ตัวเก็บประจุของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม มีค่าความหนาแน่นของพลังงาน และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าคาร์บอนแบล็ค และถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขาม ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมาผสมกับคาร์บอนแบล็ค พบว่า TSC2-CB3 (สัดส่วน 2:3) มีค่าความหนาแน่นของพลังงานและค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะมีค่าสูงที่สุด รองลงมา TSC3-CB2 (สัดส่วน 3:2) ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้ผสมคาร์บอนแบล็ค รวมทั้งสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากฝักมะขามทั้งหมดอีกด้วย สำหรับตัวเก็บประจุจากถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คแล้ว จะมีค่าความหนาแน่นของพลังงานและค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามที่ยังไม่ได้ผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ดังนั้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ผสมคาร์บอนแบล็คที่สัดส่วน 2:3 (TSC2-CB3) ให้ค่าความหนาแน่นของพลังงานและค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการเติมคาร์บอนแบล็คเพื่อทำซ้ำของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมา TSC3-CB2 TPC4-CB1 ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้ผสมคาร์บอนแบล็ค

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยทำการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยจะทำการวิจัยและพัฒนาต่อไปด้วยการเติมสารนาโนคาร์บอนหรือกราฟีนในการพัฒนาขั้วของตัวเก็บประจุยิ่งยวดต่อไป

บรรณานุกรม

- วรวิศ กอปรสิริพัฒน์. (2014). **ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors): อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังมาแรง**, TEMCA magazine 2, 21, AUGUST - OCTOBER, 75 – 78.
- อภิชาติ ด้านวิทยากุล, **ท่อนาโนคาร์บอน: วัสดุในอนาคต**, วารสาร M.T.E.C, ตุลาคม – ธันวาคม 2553.
- Dubey, P., Shrivastav, V., Maheshwari, P.H., Sundriyal, S. (2020). **Recent advances in biomass derived activated carbon electrodes for hybrid electrochemical capacitor applications: Challenges and opportunities**, Carbon, 170, 1-29.
- Endo, M., Maeda, T., Takeda, T., Kim, Y. J., Koshiba, K., Hara, H., Dresselhaus, M. S. (2021). **Capacitance and Pore-Size Distribution in Aqueous and Nonaqueous Electrolytes Using Various Activated Carbon Electrodes**, Journal of The Electrochemical Society, 148, 8.
- Frackowiak, E. (2007). **Carbon materials for supercapacitor application**, Physical Chemistry Chemical Physics, 9, 1774-1785.
- Kossyrev, P. (2012). **Carbon black supercapacitors employing thin electrodes**, Journal of Power Sources, 201, 347-352.
- Lin, Z., Goikolea, E., Balducci, A., Naoi, K., Taberna, P.L., Salanne, M., Yushin, G., Simon, P. (2018). **Materials for supercapacitors: When Li-ion battery power is not enough**, materialstoday, 21(4), 419-436.
- Perathoner, S., Ampelli, C., Chen, S., Passalacqua, R., Su, D. and Centi, G. (2017). **Photoactive materials based on semiconducting nanocarbons – A challenge opening new possibilities for photocatalysis**, Journal of Energy Chemistry, 26, 207-218.
- Sahin, M.E., Blaabjerg, F., Sangwongwanich, A. (2020). **A review on supercapacitor materials and developments**, Turkish Journal of Materials, 5(2), 10-24.
- Xiong, W., Liu, M., Gan, L., Lv, Y., Yang, L., Yang, L. Xu, Z., Hao, Z., Liu, H., and Chen, L. (2011). **A novel synthesis of mesoporous carbon microspheres for supercapacitor electrodes**, Journal of Power Sources, 196, 10461-10464.

- Yan, J., Liu, J., Fan, Z., Wei, T., and Zhang, L. (2012). High-performance supercapacitor electrodes based on highly corrugated graphene sheets, *Carbon*, 50, 2179-2188.
- Yeh, C.L., Hsi, H.C., Li, K.C., Hou, C.H. (2015). Improved performance in capacitive deionization of activated carbon electrodes with a tunable mesopore and micropore ratio, *Desalination*, 367, 60-68.

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล นายศานิตย์ สุวรรณวงศ์
Mr. Sanit Suwanwong
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3100800542286
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ 67000
โทรศัพท์ 056-717100, 087-0115315
E-mail: sanit.suw@gmail.com
5. ประวัติการศึกษา
วท.ม. (ฟิสิกส์)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศษ.บ. (ฟิสิกส์-คณิตศาสตร์)
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์
วัสดุศาสตร์ทางแสงและไฟฟ้า
ไดอิเล็กทริกและตัวเก็บประจุยิ่งยวด
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่
ศานิตย์ สุวรรณวงศ์, กฤษณะ สีใส และอาทิตย์ หูใต้้ม. (2565). เซนเซอร์แสงของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่เตรียมด้วยแผ่นนิกสาร, Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, 6(1), 29 – 38.
Sanit Suwanwong and Artit Hutem. (2018). **Structural and Dielectric Properties of Zn_2TiO_4 Ceramic from Sol-Gel Method.** URU International Conference on Science and Technology 2018, 2 – 3 August, 2016.

- Jaiban, P., Suwanwong, S., Namsar, O., and Watcharapasorn, A. (2015). **Simultaneous tuning of the dielectric property and photo- induced conductivity in ferroelectric $\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{TiO}_3$ via La doping**, Materials Letters, 147, 29 – 33.
- Suwanwong, S., Eknapakul, T., Rattanachai, Y., Masingboon, C., Rattanasuporn, S., Phatthanakun, R., Nakajima, H., King, P.D.C., Hodak, S.K. and Meewasana, W. (2015). **The dynamics of ultraviolet-induced oxygen vacancy at the surface of insulating SrTiO_3 (001)**. Applied Surface Science, 355, 210 – 212.
- Suwanwong, S., Kullapapinyokul, J., Eknapakul, T., Buaphet, P., Phatthanakun, R. and Meewasana, W. (2015). **Resistivity change in SrTiO_3 upon irradiation and its application in light sensing**. Suranaree Journal of Science and Technology, 22(1), 93 – 98.
- Masingboon, C., Eknapakul, T., Suwanwong, S., Buaphet, P., Nakajima, H., Mo, S.-K., Thongbai, P., King, P.D.C., Maensili, S. and Meewasana, W. (2013). **Anomalous change in dielectric constant of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ under violet-to-ultraviolet irradiation**, Applied Physics Letters, 102, 202903.
- Suwanwong, S., Hutem, A. (2021). **EFFICIENCY OF CAPACITOR IN CCTO CERAMICS WITH ACTIVATED CARBON DERIVED FROM TAMARIND FRUIT SHELLS**, PSRU Journal of Science and Technology 6(2), 1-12.
- Suwanwong, S., Yuenyao, C., Hutem, A. (2022). **Efficiency of supercapacitor with CaTiO_3 -filled polysulfone separators**, Journal of Physics: Conference Series, 2145, 012041.
- Rodkate, N., Suwanwong, S., Srisawat, K., Timsorn, K. (2023). **Graphene quantum dots based fluorescent biosensor for nitrogen detection of urea fertilizer**, Journal of Physics: Conference Series, 2653, 012071.