

ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

EFFICIENCY OF SUPERCAPACITOR WITH ACTIVATED CARBON

FROM TAMARIND SEED

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์^{1*}, จิราพัชร มากคำ¹ และ อาทิตย์ หู้เต็ม²

Sanit Suwanwong^{1*}, Chirapat Markkham¹, and Artit Hutem²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

¹Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University

²Division of Science Education, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University

*corresponding author e-mail: sanit.suw@pcru.ac.th

(Received: 24 July 2024; Revised: 30 October 2024; Accepted: 10 November 2024)

บทคัดย่อ

จังหวัดเพชรบูรณ์มีมะขามหวานเป็นผลไม้ทางเศรษฐกิจที่สำคัญ เมื่อนำมารับประทานและนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จากเนื้อมะขาม ซึ่งทำให้มีเศษเหลือทิ้ง คือ เมล็ดและเปลือกฝักมะขามนั้นยังสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประโยชน์ที่หลากหลาย โดยที่ในด้านพลังงานนั้นสามารถให้ค่าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วนโดยน้ำหนัก 1.00 : 0.25 1.00 : 0.67 1.00 : 1.00 1.00 : 1.50 และ 1.00 : 4.00 แล้วนำไปเคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด Coin cell ขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller; BET พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าเปลือกฝักมะขาม และมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขามเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นได้คาร์บอนแบล็คยึดเกาะกับถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) พบว่า ที่ตำแหน่งเลขคลื่น $3,400\text{ cm}^{-1}$ เป็นพันธะ O–H stretch ในสัดส่วนของเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค 1.00 : 0.67 มีการดูดกลืนมากที่สุด และในช่วง $1,200\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่มีพันธะคาร์บอนจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คมีการดูดกลืนที่สูง การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามและผสมกับคาร์บอนแบล็ค มีค่า

ความหนาแน่นของพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าคาร์บอนแบล็ค ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามจึงเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวด

คำสำคัญ: ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ถ่านกัมมันต์ คาร์บอนแบล็ค เมล็ดมะขาม

Abstract

Phetchabun Province has sweet tamarind which is an important economic fruit. Tamarind is consumed and processed into tamarind pulp products, the remaining residue is tamarind seeds and pod shells, can be synthesized into activated carbon that has a variety of uses, including in the energy field being used to make the electrodes of supercapacitors. In this research, the efficiency of activated carbon from tamarind seeds was increased by mixing it with carbon black in the following weight ratios: 1.00 : 0.25, 1.00 : 0.67, 1.00 : 1.00, 1.00 : 1.50, and 1.00 : 4.00. The resulting mixture was then coated onto aluminum foil to be used as the electrode of a coin cell supercapacitor. The pore size and surface area were analyzed using a Brunauer–Emmett–Teller; BET analysis found that the activated carbon from tamarind seeds had a smaller pore size than the tamarind fruit shell and tamarind seeds has a much higher surface area than tamarind fruit shell. Therefore, activated carbon from tamarind seeds was chosen for use. In Scanning Electron Microscope (SEM) images, carbon black can be seen adhering to activated carbon from tamarind seeds. In examining the functional groups using the Fourier–transform infrared spectroscopy (FT–IR) technique, it was found that at the wavenumber position of $3,400\text{ cm}^{-1}$ there was an O–H stretch bond, with the ratio 1.00 : 0.67 has the highest absorption. In the range of $1,200\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ is the range with a large number of carbon bonds found that activated carbon from tamarind seeds mixed with carbon black had high adsorption. Analysis of the efficiency of supercapacitors made from tamarind seeds and mixed with carbon black found that they had a higher specific energy density value and a higher specific capacitance value compared to tamarind seeds and carbon black alone. Therefore, activated carbon from tamarind seeds is suitable for application as a supercapacitor.

Keywords: Supercapacitor, Activated carbon, Carbon black, Tamarind seed

บทนำ

เพชรบูรณ์เป็นจังหวัดที่มีมะขามหวานเป็นผลไม้ที่สำคัญทางเศรษฐกิจ เมื่อนำเนื้อมะขามมารับประทานและนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จากเนื้อมะขามทำให้มีเศษเหลือทิ้ง คือ เมล็ดและเปลือกฝักมะขาม ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงและสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและเปลือกฝักมะขามได้

นอกจากนี้ในการประยุกต์ใช้ทางด้านไฟฟ้าสามารถนำถ่านกัมมันต์ (Endo et al., 2021) มาใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าของแหล่งกักเก็บพลังงานอย่างเช่นแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ (Dubey et al., 2020) อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาจากเศษขยะเหลือทิ้งจากการนำมะขามมาแปรรูปได้ เมื่อนำเมล็ดและเปลือกฝักมะขามมาสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ได้ ซึ่งมีรูพรุนสูง (Frackowiak, 2007; Yeh, 2015) แล้วเมื่อนำมาเติมลงไปในคาร์บอนแบล็ค (Kossyrev, 2012) จะเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บสะสมประจุไฟฟ้า และยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้

ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านแหล่งกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดนั้น (Lin et al., 2018) พบว่า แบตเตอรี่ใช้เวลาในการอัดประจุไฟฟ้าเป็นเวลานาน แต่มีรอบในการใช้งานต่ำ ส่วนตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีการอัดประจุไฟฟ้าได้เร็วแต่เก็บประจุไฟฟ้าได้น้อยกว่าในระดับไมโครฟารัด รวมทั้งคายประจุไฟฟ้าได้รวดเร็ว จึงได้มีการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งสามารถอัดประจุไฟฟ้าได้รวดเร็วเพียง 5–10 วินาที แต่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงในระดับฟารัด และยังสามารถคายประจุไฟฟ้าได้นานกว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าทั่วไป

งานวิจัยครั้งนี้คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงการพัฒนาวิธีเตรียมขั้วไฟฟ้า โดยเลือกใช้การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์เมล็ดและเปลือกฝักมะขาม เพื่อตรวจสอบขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของอนุภาคด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller; BET แล้วเลือกถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูงมาเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยการผสมผสมกับคาร์บอนแบล็คตามสัดส่วนโดยน้ำหนักด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล Ball mill แล้วตรวจสอบด้วยภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านกัมมันต์และที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นนำมาเคลือบลงบนแผ่นอะลูมิเนียมได้เป็นขั้วไฟฟ้าไปตรวจสอบหุ้มฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FT-IR) สุดท้ายนำมาประกอบเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด Coin cell แล้วหาประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ (Battery Testers system) ดังนั้น ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามจึงช่วยแก้ปัญหาเศษขยะเหลือทิ้ง อีกทั้งยังนำมาลดรายจ่ายให้กับอุตสาหกรรมพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อใช้ทำเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานที่ได้จากแหล่งผลิตไฟฟ้า เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม เครื่องปั่นไฟ เป็นต้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามโดยเริ่มจากการนำเมล็ดมะขามมวล 800 กรัม มาบดให้แตกละเอียดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศ เหลือมวล 78 กรัม (เรียกว่า BA-TSC) จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยการนำไปเทกับสารละลาย KOH 3M ในน้ำ DI ที่มีมวลเป็น 3 เท่าของ BA-TSC แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศ ในขั้นตอนสุดท้ายนำเมล็ดมะขามไปล้างด้วยน้ำ DI และกรด HCl จนมีค่า pH เป็นกลาง แล้วอบให้แห้ง จะได้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) เหลือมวล 30 กรัม คิดเป็นร้อยละ 3.75 เมื่อเทียบกับมวลก่อนเผา และเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) ใช้การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์แบบเดียวกับเมล็ดมะขาม โดยก่อนเผาเปลือกฝักมะขามมีมวล 800 กรัม เมื่อสังเคราะห์เสร็จแล้วเหลือมวล 42 กรัม คิดเป็นร้อยละ 5.25 เมื่อเทียบกับมวลก่อนเผา แล้วนำมาตรวจสอบขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของอนุภาคด้วยเทคนิค BET ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น 3Flex

2. การเตรียมสัดส่วนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามกับคาร์บอนแบล็ค

นำถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) ที่สังเคราะห์แล้ว และคาร์บอนแบล็ค (CB) จากบริษัท Linyi Gelon LIB Co., LTD. ซึ่งมีพื้นที่ผิวสูง $45\text{ m}^2/\text{g}$ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บประจุไฟฟ้า มาผสมกันตามสัดส่วนโดยน้ำหนักด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล ball mill ดังตารางที่ 1 จะได้ถ่านกัมมันต์และคาร์บอนแบล็คที่ผสมกันโดยมีมวลรวมกัน 2.50 กรัมตามสัดส่วน แล้วตรวจสอบด้วยภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามและที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คด้วยเครื่อง SEM (ยี่ห้อ Thermo SCIENTIFIC รุ่น Phenom XL)

ตารางที่ 1 สัดส่วนของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค

สารตัวอย่าง	สัดส่วน	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม (กรัม)	คาร์บอนแบล็ค (กรัม)
AC-TSC	1.00 : 0.00	2.50	0.00
TSC1-CB4	1.00 : 4.00	0.50	2.00
TSC2-CB3	1.00 : 1.50	1.00	1.50
TSC1-CB1	1.00 : 1.00	1.25	1.25
TSC3-CB2	1.00 : 0.67	1.50	1.00
TSC4-CB1	1.00 : 0.25	2.00	0.50

3. การเตรียมขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

เริ่มด้วยการนำกาวยา LA133 (บริษัท Linyi Gelon LIB Co., Ltd.) 10 กรัม ผสมน้ำ DI 20 ml กวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายกาวยา LA133 จากนั้นนำถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมวล 2.50 กรัม เทลงในสารละลายกาวยาแล้วกวนต่ออีก 2 ชั่วโมง จะได้สารละลายกาวยาของถ่านกัมมันต์ จากนั้นทำแบบเดียวกับสารละลายกาวยาโดยเทถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วนต่างๆ ที่มีมวลรวม 2.50 กรัม จะได้สารละลายกาวยาของถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค แล้วเทสารละลายที่ผสมแล้วลงบนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ให้มีขนาด 10x20 cm² จากนั้นใช้แท่งแก้วปาดให้เรียบแล้วนำเข้าเตาอบที่ 100 °C เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คแล้วตัดให้เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.60 cm จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าไปตรวจสอบห่อฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum Two ขั้นตอนต่อมาเตรียมสารอิเล็กโทรไลต์ นำสาร Tetraethylammonium tetrafluoroborate (ยี่ห้อ Sigma Aldrich) ที่ความเข้มข้น 1 M ในสาร Acetonitrile 40 ml (ยี่ห้อ Sigma Aldrich) แล้วกวนให้เข้ากันใช้เวลา 2 ชั่วโมง สุดท้ายทำการประกอบตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด Coin cell โดยวางตามลำดับชั้นจากล่างขึ้นบนดังนี้ Coin cell base ขั้วไฟฟ้าจากถ่านกัมมันต์ สารอิเล็กโทรไลต์ แผ่นคั่นกลางที่ทำจาก PP หยดสารอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าจากถ่านกัมมันต์ Spacer Spring และ Coin cell lid แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก ด้วยแรงกด 0.20 ตัน เป็นเวลา 5 นาที จะได้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิด Coin cell

4. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ในการหาประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Sahin, Blaabjerg & Sangwongwanich, 2020) ด้วยเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ (Battery Testers system) ยี่ห้อ NEWARE รุ่น BTS 3000 ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของพลังงาน (Specific energy density; ED) มีหน่วยเป็น mWh/g แล้วนำมาหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance; C_S) มีหน่วยเป็น F/g และค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance, C) มีหน่วยเป็น F จากสมการที่ 1 เมื่อ ΔV คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V และ m คือ มวลของถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คที่ใช้ทำขั้วทั้ง 2 ด้าน มีหน่วยเป็น g

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

ผลการวิจัย

1. การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดและฝักมะขามโดยใช้เมล็ดมะขามมวล 800 กรัม จะได้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) เป็นมวล 30 กรัม คิดเป็นร้อยละ 3.75

เมื่อเทียบกับมวลก่อนถูกเผา และเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) ก่อนเผา 800 กรัม ได้เป็นถ่านกัมมันต์มีมวลเป็น 42 กรัม คิดเป็นร้อยละ 5.25 เมื่อเทียบกับมวลก่อนถูกเผา แล้วนำมาตรวจสอบขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของอนุภาค พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีขนาดรูพรุนที่ 6.8841 nm มีพื้นที่ผิว 3.5006 m²/g และถ่านกัมมันต์จากเปลือกฝักมะขามมีขนาดรูพรุนที่ 7.3902 nm มีพื้นที่ผิว 0.8605 m²/g ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าเปลือกฝักมะขาม แต่เมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขาม ดังนั้นจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

2. พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ใช้ระบบสเกลเป็นไมโครเมตร ดังภาพที่ 1 ของ ก) ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม แสดงพื้นที่ผิวที่มีรูพรุนสูงจากเทคนิค BET พบว่า ขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยที่ 6.8841 nm มีพื้นที่ผิว 3.5006 m²/g และ ข) คาร์บอนแบล็ค ซึ่งมีรูพรุนสูงและมีพื้นที่ผิวสูงมากถึง 45 m²/g และภาพที่ 2 ก) ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค ในสัดส่วน ข) 1.00 : 4.00 ค) 1.00 : 1.50 ง) 1.00 : 1.00 จ) 1.00 : 0.67 และ ฉ) 1.00 : 0.25 มีอนุภาคของคาร์บอนแบล็คเกาะบนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามลดลง ตามลำดับ

3. หมู่ฟังก์ชันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามด้วยเทคนิค FT-IR

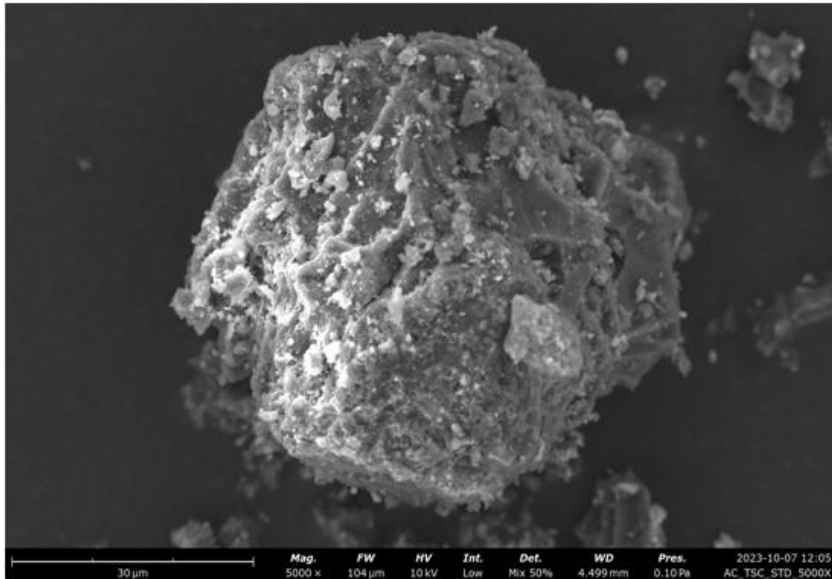
ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็ค ด้วยเทคนิค FT-IR ดังภาพที่ 3 พบว่า ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3,400 cm⁻¹ มีพันธะ O-H stretch มีหมู่ไฮดรอกซิล เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ในสัดส่วนของ 1.00 : 0.67 (TSC3-CB2) มีการดูดกลืนมากที่สุด รองลงมา 1.00 : 1.50 (TSC2-CB3) ถัดมา 1.00 : 0.25 (TSC4-CB1) ถัดมา 1.00 : 4.00 (TSC1-CB4) และ 1.00 : 1.00 (TSC1-CB1) และในช่วง 1,200–500 cm⁻¹ ซึ่งเป็นช่วงที่มีพันธะคาร์บอนจำนวนมาก พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คมีการดูดกลืนที่สูง เมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็ค ซึ่งมีการดูดกลืนต่ำสุด

4. ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

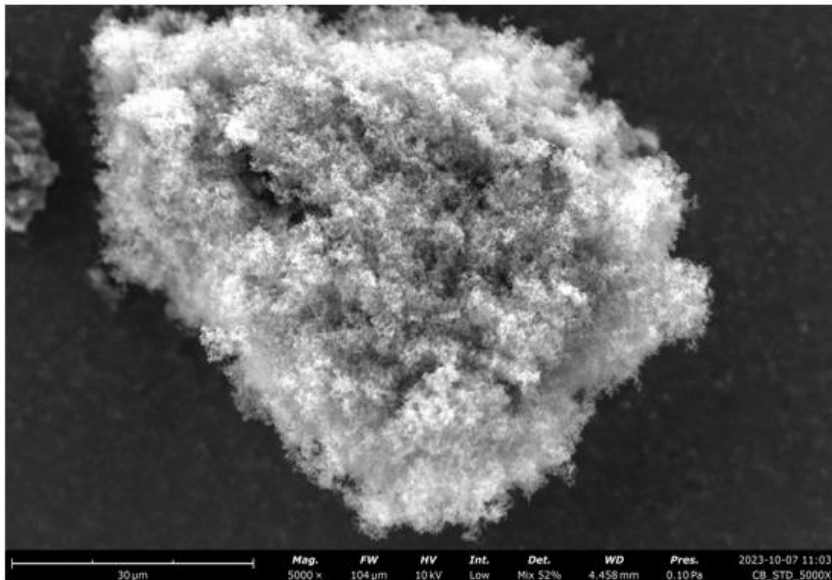
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค ดังตารางที่ 2 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม มีค่าความหนาแน่นของพลังงานเป็น 0.5568 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 0.7919 F/g ซึ่งสูงกว่าคาร์บอนแบล็คที่มีค่าความหนาแน่นของพลังงานเป็น 0.3759 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 0.5346 F/g เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม ด้วยการผสมคาร์บอนแบล็คในสัดส่วนต่างๆ พบว่า TSC2-CB3 (สัดส่วน 1.00 : 1.50) มีค่าความหนาแน่นของพลังงานเป็น 1.2539 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 1.7833 F/g ซึ่งมีค่าสูงที่สุด รองลงมา 1.00 : 0.67 1.00 : 0.00 1.00 : 1.00 1.00 : 0.25 และ 1.00 : 4.00 ตามลำดับ

จะเห็นว่าเมื่อผสมคาร์บอนแบล็คที่สัดส่วน 1 : 1.50 และ 1 : 0.67 ส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้ผสมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนแบล็ค ตามลำดับ

ก)

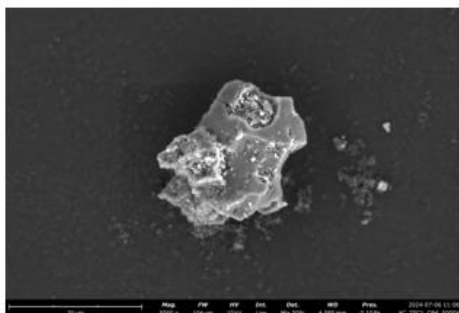
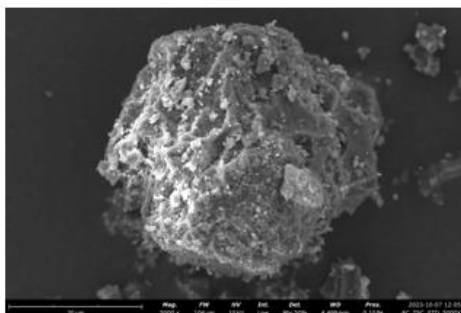


ข)

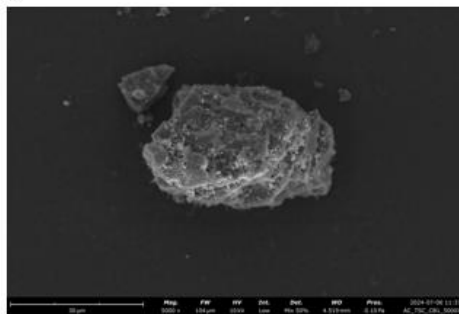
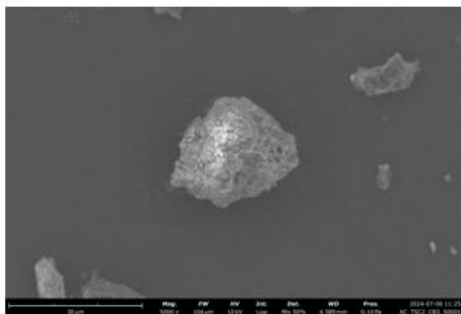


ภาพที่ 1 ภาพถ่ายพื้นผิวของ ก) ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และ ข) คาร์บอนแบล็ค

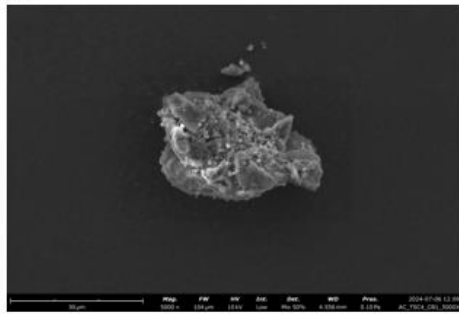
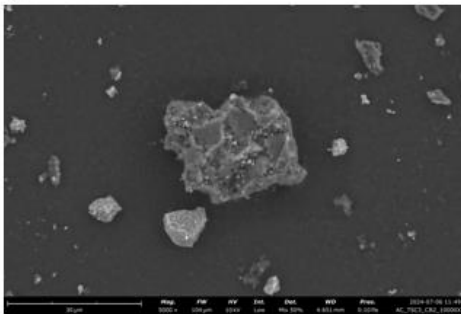
๒)

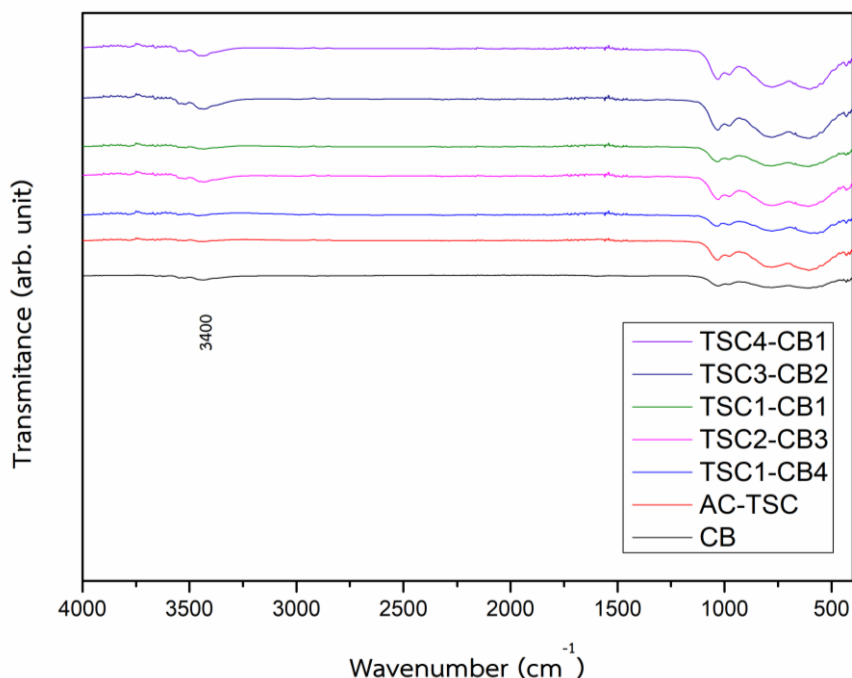


၅)



၁၈)





ภาพที่ 3 พูเรียทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามและผสมกับคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน 1.00 : 0.25 1.00 : 0.67 1.00 : 1.00 1.00 : 1.50 และ 1.00 : 4.00 ซึ่งย่อเป็น TSC4-CB1 TSC3-CB2 TSC1-CB1 TSC2-CB3 และ TSC1-CB4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากถ่านกัมมันต์ของเมล็ดมะขามที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค

สารตัวอย่าง	สัดส่วน	ความหนาแน่นของพลังงาน (mWh/g)	ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F/g)
Carbon black (CB)	–	0.3759	0.5346
AC-TSC	1.00 : 0.00	0.5568	0.7919
TSC1-CB4	1.00 : 4.00	0.3589	0.5104
TSC2-CB3	1.00 : 1.50	1.2539	1.7833
TSC1-CB1	1.00 : 1.00	0.5460	0.7765
TSC3-CB2	1.00 : 0.67	0.9675	1.3760
TSC4-CB1	1.00 : 0.25	0.4102	0.5834

อภิปรายผล

ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (AC-TSC) และเปลือกฝักมะขาม (AC-TPC) แล้วนำมาตรวจสอบด้วยเทคนิค BET พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าเปลือกฝักมะขาม แต่ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามมีพื้นที่ผิวสูงกว่าเปลือกฝักมะขามเป็นอย่างมากทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามเนื่องด้วยมีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง (Arjuman Banu, Nagarani & Kirubha, 2016) มีการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าได้มาก ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะที่สูง และพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ดังภาพที่ 1 และภาพที่ 2 ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และคาร์บอนแบล็ค จะเห็นได้พื้นผิวมีรูพรุนสูง Ramesh et al. (2018) ได้ศึกษาถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแบบปล่อยสนาม (FESEM) พบความพรุนสูงของโครงสร้างคาร์บอนเนื่องจากการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ KOH จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์สามารถเข้าไปในพื้นผิวรูพรุนของคาร์บอนแบล็คได้สูง อีกทั้งในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของขั้วตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็คจาก FT-IR ดังภาพที่ 3 พบว่า ในสัดส่วนของ 1.00 : 0.67 (TSC3-CB2) มีพันธะ O-H stretch เป็นหมู่ไฮดรอกซิลเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้นและมีการดูดกลืนมากที่สุด รองลงมา 1.00 : 1.50 (TSC2-CB3) ซึ่งสอดคล้องกับ Mopoung et al. (2015) ได้ศึกษาถ่านกัมมันต์ของเมล็ดมะขามจากกระตุ้นทางเคมีโดยใช้ KOH มีการดูดกลืนสูง ที่ตำแหน่ง 3334 cm^{-1} และในช่วง $1,200\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่มีพันธะคาร์บอนจำนวนมาก พบว่า คาร์บอนแบล็คซึ่งมีการดูดกลืนต่ำสุดเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามและที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม มีประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสูงกว่าคาร์บอนแบล็คและเมื่อเติมคาร์บอนแบล็ค ในสัดส่วน 1.00 : 1.50 (TSC2-CB3) และ ของ 1.00 : 0.67 (TSC3-CB2) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้เติมคาร์บอนแบล็ค และคาร์บอนแบล็คและที่สัดส่วน 1.00 : 4.00 (TSC1-CB4) มีประสิทธิภาพต่ำสุด ดังนั้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และที่ผสมคาร์บอนแบล็คที่สัดส่วน 1.00 : 1.50 มีค่าสูงสุดรองลงมาเป็น 1.00 : 0.67 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเติมคาร์บอนแบล็คลงในถ่านกัมมันต์ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Sivachidambaram et al., 2019) จึงเหมาะกับการนำมาประดิษฐ์และเสริมประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

สรุปผลการวิจัย

ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากมะขาม พบว่า เมล็ดมะขามเหมาะสำหรับการใช้ทำขั้วไฟฟ้ามากกว่าเปลือกฝักมะขาม เนื่องจากมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวสูงกว่า และเมื่อถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามผสมกับคาร์บอนแบล็คที่สัดส่วน 1.00 : 1.50 มีค่าความจุไฟฟ้า

จำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสูงที่สุดเป็น 1.7833 F/g ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ผสมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนแบล็ค จึงเหมาะกับการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาฟิสิกส์ งานศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัย พัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

เอกสารอ้างอิง

- Arjuman, B.S., Nagarani, S., & Kirubha, M. (2016). Preparation of Low Cost Activated Carbon Adsorbents from Natural Sources. **International Journal of Engineering Technology Science and Research**, 3(4), 43–46.
- 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, A910.
- 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.
- Mopoung, S., Moonsri, P., Palas, W., & Khumpai, S. (2015). Characterization and Properties of Activated Carbon Prepared from Tamarind Seeds by KOH Activation for Fe(III) Adsorption from Aqueous Solution. **The Scientific World Journal**, 2015(1), 415961.
- Ramesh, T., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K.S., & Ram Gopal Reddy, L. (2018). Hierarchical Porous Carbon Microfibers Derived from Tamarind Seed Coat for High-Energy Supercapacitor Application. **ACS Omega**, 3(10), 12832–12840.
- Sahin, M.E., Blaabjerg, F., & Sangwongwanich, A. (2020). A review on supercapacitor materials and developments. **Turkish Journal of Materials**, 5(2), 10–24.

- Sivachidambaram, M., Vijaya, J.J., Niketha, K., Kennedy, L.J., Elanthamilan, E., & Merlin, J.P. (2019). Electrochemical Studies on Tamarindus indica Fruit Shell Bio-Waste Derived Nanoporous Activated Carbons for Supercapacitor Applications. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, **19**(6), 3388–3397.
- 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.