



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดที่เติมถ่าน
คาร์บอนที่ได้จากซังข้าวโพด โดยการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคสเปรย์

Optimization of the electrodes of supercapacitor
derived activated carbon from corn cob
by spray coating technique

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประจำปีงบประมาณ 2567

รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดที่เติมถ่าน
คาร์บอนที่ได้จากซังข้าวโพด โดยการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคสเปรย์

Optimization of the electrodes of supercapacitor
derived activated carbon from corn cob
by spray coating technique

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์

สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

อาทิตย์ หูเต็ม

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ทุนอุดหนุนงานวิจัย พัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ประจำปีงบประมาณ 2567

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. 2567 จึงขอขอบคุณที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์

1 พฤศจิกายน 2568

(ข)

ชื่องานวิจัย	การเพิ่มประสิทธิภาพของขั้วตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดที่เติมถ่านคาร์บอนที่ได้จากซังข้าวโพด โดยการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคสเปรย์ Optimization of the electrodes of supercapacitor derived activated carbon from corn cob by spray coating technique
ผู้วิจัย	ศานิตย์ สุวรรณวงศ์ และอาทิตย์ หุ่นเต็ม
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ปีเสร็จวิจัย 2568

บทคัดย่อ

เพชรบูรณ์เป็นจังหวัดที่มีปลูกพืชทางเศรษฐกิจที่หลากหลาย รวมทั้งการปลูกข้าวโพดซึ่งมีความสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร แต่มีสิ่งที่เหลือทิ้งคือซังข้าวโพด ซึ่งสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านคาร์บอนที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวที่สูงนำมาใช้ประโยชน์เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดด้วยเทคนิค XRD พบว่า มีโครงสร้างของคาร์บอนแบบ fullerite และ Graphite

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดโดยการเติมคาร์บอนแบล็กในสัดส่วน 1:4 2:3 1:1 3:2 และ 4:1 ด้วยเครื่องบด ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำขั้วไฟฟ้าโดยการนำถ่านคาร์บอนที่ผสมกันแล้วเคลือบฟิล์มคาร์บอนบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคสเปรย์ จากนั้นตรวจสอบพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM พบว่า มีอนุภาคของคาร์บอนแบล็กแทรกเข้าไปบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด แล้วตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของขั้วตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า สัดส่วน 4:1 มีการดูดกลืนมากที่สุดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3440 cm^{-1} มีพันธะ O-H stretch และตำแหน่งเลขคลื่น 1030 cm^{-1} มีพันธะ C-N stretch เมื่อนำมาประกอบเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell พบว่า ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ด้วยการเติมคาร์บอนแบล็ก จึงเหมาะสมในการใช้ประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อให้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานต่อไป

คำสำคัญ: ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ถ่านคาร์บอน ซังข้าวโพด

Research title Optimization of the electrodes of supercapacitor derived activated carbon from corn cob by spray coating technique

Researcher Mr. Sanit Suwanwong and Dr. Artit Hutem

Division Physics

Phetchabun Rajabhat University, Year 2025

Abstract

Phetchabun Province is known for its diverse agricultural economy, particularly in the cultivation of corn, which plays a significant role in the food industry. Corn cobs, a major agricultural waste product, can be transformed into porous activated carbon with a high surface area, making it suitable as an electrode material in supercapacitors. The crystalline structure of carbon derived from corn cobs was analyzed using X-ray diffraction (XRD), which revealed the presence of fullerite and graphite phases.

In this study, the performance of the supercapacitor was enhanced by adding carbon black to the corn cob carbon in various ratios: 1:4, 2:3, 1:1, 3:2, and 4:1. The mixture was milled in a ball mill for 24 hours. The electrodes are made by mixing carbon and coating the carbon film on the aluminum sheet using a spray technique. Surface morphology, observed through scanning electron microscopy (SEM), showed that carbon black particles were embedded on the surface of the corn cob carbon. Functional group analysis conducted by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) revealed that the 4:1 ratio exhibited the highest absorption peaks at a wavenumber of 3440 cm^{-1} (O–H stretching) and 1030 cm^{-1} (C–N stretching). When assembled into coin cell-type supercapacitors, results demonstrated that the addition of carbon black improved the electrochemical performance of the corn cob-derived carbon supercapacitor. Consequently, this material is considered suitable for use as a supercapacitor electrode in energy storage applications.

Keywords: Supercapacitor, Activated carbon, Corn cob

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 ข้าวโพด	3
2.2 ถ่านคาร์บอนจากพืช	4
2.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด	4
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	7
3.1 การสังเคราะห์ถ่านคาร์บอนจากชังข้าวโพด	7
3.2 การผสมถ่านคาร์บอนจากชังข้าวโพดกับคาร์บอนแบล็ค	8
3.3 การเตรียมฟิล์มคาร์บอนด้วยเทคนิคสเปรย์	10
3.4 การประกอบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากชังข้าวโพด	12
3.5 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนชังข้าวโพด	12
3.6 ภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากชังข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค	12
3.7 ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของถ่านคาร์บอนจากชังข้าวโพดที่ผสม กับคาร์บอนแบล็ค	14
3.8 การวัดประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	15
4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด	15
4.2 พื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด	16
4.3 หมู่ฟังก์ชันของซังข้าวโพดกับประจุไฟฟ้าที่ยาว	18
4.4 ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด	19
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	21
5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย	21
5.2 ข้อเสนอแนะ	21
บรรณานุกรม	23
ประวัติผู้วิจัย	25

(ฉ)

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็ค	9
4.1 ความหนาแน่นพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของ ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็ค.....	20

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ก) ต้นข้าวโพด และ ข) ฝักข้าวโพด	3
2.2 ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell	6
3.1 ก) ชั่งข้าวโพด และ ข) ชั่งข้าวโพดที่ถูกบดแล้ว	7
3.2 ถ่านคาร์บอนจากชั่งข้าวโพด	8
3.3 ถ่านคาร์บอนจากชั่งข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คด้วยเครื่องบด ball mill	9
3.4 ก) ยึดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ด้วยเทปกาว และ ข) เคลือบฟิล์มด้วยสเปรย์	10
3.5 ฟิล์มคาร์บอนใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด.....	11
3.6 ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell	11
3.7 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)	13
3.8 เครื่อง FT-IR Spectrometer	13
3.9 เครื่อง Battery Testers system	14
4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากชั่งข้าวโพด	15
4.2 ภาพถ่าย SEM ก) ถ่านคาร์บอนจากชั่งข้าวโพด (CC) และ ข) คาร์บอนแบล็ค (CB) ..	16
4.3 ภาพถ่าย SEM ถ่านคาร์บอนจากชั่งข้าวโพดที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ดังนี้ ก) CC1-CB4 ข) CC2-CB3 ค) CC1-CB1 ง) CC3-CB2 และ จ) CC4-CB1	17
4.4 หมู่ฟังก์ชันของขั้วตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด	18

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เพชรบูรณ์เป็นที่จังหวัดมีการเพาะปลูกพืชทางเศรษฐกิจที่หลากหลาย อย่างเช่น มะขาม อ้อย ข้าวโพด สำหรับข้าวโพดใช้เมล็ดในการรับประทานและอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ซึ่งสิ่งที่เหลือทิ้งได้แก่ เปลือกฝักข้าวโพด ชังข้าวโพด และสามารถนำชังข้าวโพดมาสังเคราะห์เป็นถ่านคาร์บอน (activated carbon) ซึ่งมีรูพรุนสูงมีพื้นที่ผิวมากเมื่อนำวัสดุบางชนิดมาเติมลงในถ่านคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้จากพืช จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมพลังงานได้ สามารถเสริมประสิทธิภาพทางไฟฟ้า (Xiong, W., et al., 2011) ให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ขึ้นอยู่ความต้องการใช้งาน เช่น ตัวต้านทาน ทรานซิสเตอร์ แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เป็นต้น ในการวิจัยทางด้านแหล่งกักเก็บพลังงานนั้น โดยการศึกษาคุณสมบัติและโครงสร้างของวัสดุในการพัฒนาแหล่งกักเก็บพลังงาน อย่างเช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด สำหรับแบตเตอรี่นั้นใช้เวลาในการอัดประจุไฟฟ้านานและมีรอบอัดประจุต่ำ และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถอัดประจุไฟฟ้าได้รวดเร็วแต่มีการเก็บประจุไฟฟ้าได้ต่ำกว่า คายประจุไฟฟ้าเร็วมาก จึงได้มีการประดิษฐ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งสามารถอัดประจุไฟฟ้าได้รวดเร็วมาก เก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าตัวเก็บประจุมาก อีกทั้งยังคายประจุไฟฟ้าได้นานเป็นอย่างมาก (Simon, P., & Gogotsi, Y., 2008)

ดังนั้นการประดิษฐ์ตัวของตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยทั่วไป จะใช้ถ่านคาร์บอนที่มีรูพรุนสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ชังข้าวโพดในการสังเคราะห์เป็นถ่านคาร์บอน เนื่องจากข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดเพชรบูรณ์ อีกทั้งชังข้าวโพดยังเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการรับประทานเมล็ดข้าวโพดและอุตสาหกรรมผลิตอาหาร ซึ่งสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นถ่านคาร์บอนที่มีรูพรุนสูง (Liu, D. et al., 2020) ทำให้มีพื้นที่ผิวสูง จึงเหมาะกับการใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด แต่ด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มทำขั้วของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้วิธีการพาดบนแผ่นอะลูมิเนียมแล้วทำการอบร้อน ซึ่งจะต้องใช้เวลานานในการเตรียมขั้วไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นวิธีเตรียมขั้วที่ประหยัดเวลาและขั้นตอนในการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคสเปรย์ จึงเป็นทางเลือกที่สะดวกและเหมาะสมในการเตรียมขั้วที่เป็นชั้นๆ ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งช่วยให้เกิดความสะดวกในการเตรียมขั้วและแก้ปัญหาของแหล่งกักเก็บพลังงานที่ได้จากแหล่งผลิตไฟฟ้า เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม เครื่องปั่นไฟ เป็นต้น และในแง่การผลิตและอุตสาหกรรมเป็นการเพิ่มความสะดวกในการผลิตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด
- 1.2.2 เพื่อสร้างต้นแบบของสเปรย์ที่ใช้เตรียมขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
- 1.2.3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 ขอบเขตเรื่องประชากร คือ ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด และตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
- 1.3.2 ขอบเขตเรื่องเนื้อหา ถ่านคาร์บอน ความหนาแน่นพลังงานจำเพาะ และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

Activated carbon คือ ถ่านคาร์บอน

Carbon black คือ คาร์บอนแบล็ค

Supercapacitor คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

Specific energy density, E_D คือ ความหนาแน่นพลังงานจำเพาะ

Specific capacitance, C_S คือ ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1.5.1 ด้านวิชาการ ผู้ได้รับประโยชน์ คือ ชุมชน นักเรียน นักศึกษา ครู อาจารย์ และผู้วิจัย
 - พัฒนาแหล่งกักเก็บพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
 - พัฒนานักวิจัย นักศึกษา นักเรียน
- 1.5.2 ด้านเศรษฐกิจ สังคมและชุมชน
 - ได้แหล่งกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง
- 1.5.3 เผยแพร่ในวารสารวิชาการ
 - เรื่องประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวโพด

ข้าวโพด (ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* L.) มีถิ่นกำเนิดจากทวีปอเมริกา เป็นพืชเศรษฐกิจของโลก นำมาใช้ประโยชน์ในรูปอาหารคน อาหารสัตว์ ในทางอุตสาหกรรมแปรรูปใช้เป็นน้ำมัน แป้ง พลาสติก เชื้อเพลิง (เอทานอล) เป็นต้น ข้าวโพดเป็นพืชไร่ มีลำต้นสูง 1-4 เมตร ให้ผลผลิตเป็นฝักรูปแกนทรงกระบอก มีเมล็ดติดแน่นบนขั้วเรียงเป็นแถวดังภาพที่ 2.1 ข้าวโพดมีหลายชนิดตามลักษณะเมล็ดและการนำมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดข้าวเหนียว ข้าวโพดป๊อปคอร์น และข้าวโพดฝักอ่อน



ภาพที่ 2.1 ก) ต้นข้าวโพด และ ข) ฝักข้าวโพด

2.2 ถ่านคาร์บอนจากพืช

ถ่านคาร์บอน (Activated Carbon) เป็นวัสดุคาร์บอนที่แปรรูปมาจากชีวมวล เช่น กิ่งไม้ เศษพืช เปลือกมะพร้าว แกลบ ไม้ไผ่ โดยผ่านกระบวนการ carbonization และทำการกระตุ้นด้วยสาร KOH ทำให้เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูงสามารถเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างของวัสดุได้ มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ มีค่านำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีเหมาะสำหรับนำไปใช้งานด้านไฟฟ้าและพลังงาน (Dubey, P., et al, 2020) เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

จากงานวิจัยของ Wang, Q. et al. (2018) และ Priya D.S. et al. (2023) พบว่าคาร์บอนจากเปลือกกล้วยที่มีคาร์บอนรูพรุนสูงสามารถใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดได้ความจุไฟฟ้าสูง

จากงานวิจัยของ Liu, D. et al. (2020) สังเคราะห์ถ่านคาร์บอนที่ได้จากซังข้าวโพดผ่านการกระตุ้นด้วย KOH มีโครงสร้างที่มีรูพรุนแบบไมโครและเมโซ เพื่อใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

ในการเพิ่มสมบัติของถ่านคาร์บอนจากพืชทำได้หลายวิธี เช่น ในการกระตุ้นทางเคมีด้วยสาร KOH HCl รวมทั้งการผสมกับวัสดุคาร์บอนประเภทอื่น เช่น กราฟีน นาโนคาร์บอน คาร์บอนแบล็ค เพื่อเพิ่มความสามารถทางปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนผิวของขั้วไฟฟ้า (pseudocapacitance) และลดความต้านทานภายใน (Li et al., 2024)

2.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Supercapacitor) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สามารถอัดและคายประจุไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน (Simon, P., & Gogotsi, Y., 2008) โดยอาศัยหลักการสะสมประจุไฟฟ้าที่ผิวของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด (Electric Double-Layer Capacitor, EDLC) และการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด (Pseudocapacitor)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดที่เคลือบเป็นฟิล์มบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยสารคาร์บอน เช่น กราฟีน ถ่านคาร์บอน คาร์บอนแบล็ค เป็นต้น ซึ่งเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง (Xiong, W., et al., 2011) มีสารอิเล็กโทรไลต์ และแผ่นคั่นระหว่างกลางของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งประกอบเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Frackowiak, E., 2007)

จากงานวิจัยของ Xu, M. et al., 2021 ได้ประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดจากถ่านคาร์บอนที่ได้จากซังข้าวโพด ซึ่งเห็นได้ชัดว่าถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดนั้นสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีประสิทธิภาพสูง

ในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell ดังภาพที่ 2.2 โดยใช้วัสดุจากซิงค์ข้าวโพดสังเคราะห์เป็นถ่านคาร์บอนแล้วเคลือบเป็นฟิล์มคาร์บอนบนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ด้วยเทคนิคสเปรย์ โดยใช้แรงดันอากาศในการพ่นสารละลายกาวที่ผสมกับถ่านคาร์บอนจากซิงค์ข้าวโพดบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อให้ฟิล์มมีความบางและกระจายตัวได้ดี ช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอบนพื้นผิวของฟิล์มและเพิ่มประสิทธิภาพในนำไฟฟ้าและการเก็บประจุไฟฟ้าได้ ซึ่งวิธีนี้มีความสะดวก รวดเร็ว สามารถควบคุมความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มได้ (Say, M.G. et al., 2020)

ในการประเมินประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ใช้เครื่อง Battery Testers system (ยี่ห้อ NEWARE รุ่น BTS3000) พิจารณาจากสมการที่ 2.1 ค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy density, E_D) เพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance, C_S) จากสมการ 2.2 (Sahin, M.E., et al., 2020)

$$E_D = \frac{1}{2} C_S (\Delta V)^2 \quad (2.1)$$

$$C_S = \frac{2 E_D}{(\Delta V)^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ E_D คือ ความหนาแน่นพลังงาน (mWh/g)

C_S คือ ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F/g)

ΔV คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

m คือ มวลของถ่านคาร์บอน (g)



ภาพที่ 2.2 ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การสังเคราะห์ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

นำซังข้าวโพดมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ดังภาพที่ 3.1 แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น (DI water) จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำซังข้าวโพดที่อบให้แห้งแล้ว มาบดให้ละเอียด แล้วนำมาทำกระบวนการ before activation corn cob carbon (BA-CC) โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ขั้นตอนต่อมา นำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ละลายกับน้ำกลั่น DI ให้มีความเข้มข้น 3M จะได้สารละลาย KOH แล้วเทลงใน BA-CC ไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C เพื่อทำการกระตุ้น จะได้ CC-KOH สุดท้ายนำ CC-KOH มาล้างด้วยน้ำกลั่น DI สลับกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จนมีค่า pH เป็น 7 แล้วนำซังข้าวโพดที่ล้างให้เป็นกลางแล้วไปอบให้แห้ง จะได้ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ถูกกระตุ้นแล้ว (AC-CC) ดังภาพที่ 3.2 เรียกสารตัวอย่างนี้ว่า CC



ภาพที่ 3.1 ก) ซังข้าวโพด และ ข) ซังข้าวโพดที่ถูกบดแล้ว



ภาพที่ 3.2 ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด (CC)

3.2 การผสมถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดกับคาร์บอนแบล็ค

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดนั้น โดยการนำถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด (CC) ผสมกับคาร์บอนแบล็ค (CB) โดยน้ำหนักตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.1 ทำการผสมตามสัดส่วนด้วยเครื่องบด ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค (CC-CB) แล้วดังภาพที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็ค

สัดส่วน	น้ำหนัก (กรัม)	
	ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด	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

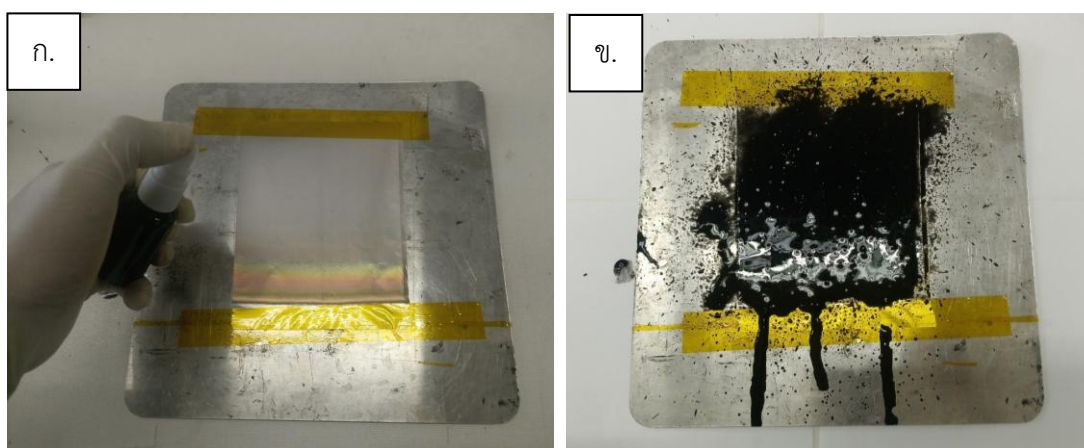


ภาพที่ 3.3 ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คด้วยเครื่องบด ball mill

3.3 การเตรียมฟิล์มคาร์บอนด้วยเทคนิคสเปรย์

ในการเตรียมฟิล์มคาร์บอนจากถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายกาว โดยนำกาว LA 133 (บริษัท Linyi Gelon LIB Co., Ltd.) 10 กรัม ลงในน้ำกลั่น DI 20 ml แล้วคนให้เข้ากัน ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายกาว LA 133 จากนั้นเทถ่านคาร์บอนที่เตรียมไว้แล้ว 5 กรัม ตามตารางที่ 3.1 ลงในสารละลายกาว LA 133 แล้วคนต่ออีก 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C จะได้สารละลายกาวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด และที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คแล้ว จากนั้นนำสารละลายกาวเทลงกระบอกสเปรย์

ขั้นตอนต่อมาตัดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ขนาด 20 x 25 cm แล้วยึดกับเทปกาวดังภาพที่ 3.4 ก) และทำการเคลือบฟิล์มคาร์บอนด้วยการพ่นสเปรย์ของสารละลายกาวบนแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ดังภาพที่ 3.3 ข) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C ใช้เวลา 30 นาที จะได้ฟิล์มคาร์บอนด้วยเทคนิคสเปรย์เพื่อทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.4 ก) ยึดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ด้วยเทปกาว และ ข) เคลือบฟิล์มด้วยสเปรย์



ภาพที่ 3.5 ฟิล์มคาร์บอนใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด



ภาพที่ 3.6 ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell

3.4 การประกอบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

ในการประกอบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell มีส่วนประกอบที่จะต้องวางเรียงลำดับดังนี้

- 1) Coin cell base
- 2) ขั้วไฟฟ้าจากฟิล์มคาร์บอนจากซังข้าวโพด
- 3) สารละลายอิเล็กโทรไลต์
- 4) แผ่นคั่นกลาง
- 5) สารละลายอิเล็กโทรไลต์
- 6) ขั้วไฟฟ้าจากฟิล์มคาร์บอนจากซังข้าวโพด
- 7) Spacer, Spring
- 8) Coin cell lid

เริ่มด้วยตัดแผ่นฟิล์มคาร์บอนจากถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดให้เป็นวงกลมจำนวน 2 แผ่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร จากนั้นเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยนำสาร Tetraethylammonium tetrafluoroborate แบบผงละลายในสาร Acetonitrile 40 ml ที่ความเข้มข้น 1 M คนให้เข้ากัน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ สุดท้ายนำฟิล์มคาร์บอนและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ประกอบเข้าตามตำแหน่งแบบ coin cell และใช้เครื่องอัดไฮโดรลิกด้วยแรงกด 0.3 ตัน เป็นเวลา 5 นาที จะได้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ coin cell ดังภาพที่ 3.6

3.5 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น AERIS ดังภาพที่ 3.7 โดยวัดใช้ช่วงวัดที่ $20-80^{\circ}$ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกและระนาบ

3.6 ภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ thermo SCIENTIFIC รุ่น Phenom XL เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของอนุภาคของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด



ภาพที่ 3.7 เครื่อง X-ray diffraction (XRD)



ภาพที่ 3.8 เครื่อง FT-IR Spectrometer

3.7 ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค

ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารโดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ด้วยเครื่อง FT-IR Spectrometer ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum Two ดังภาพที่ 3.8 เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

3.8 การวัดประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

การวัดประสิทธิภาพตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ Coin cell ด้วยใช้เครื่อง Battery Testers system ยี่ห้อ NEWARE รุ่น BTS 3000 ดังภาพที่ 3.9 โดยหาค่าความหนาแน่นของพลังงานจำเพาะ (Specific energy density, E_D) เพื่อนำมาหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance, C_S) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดและที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค



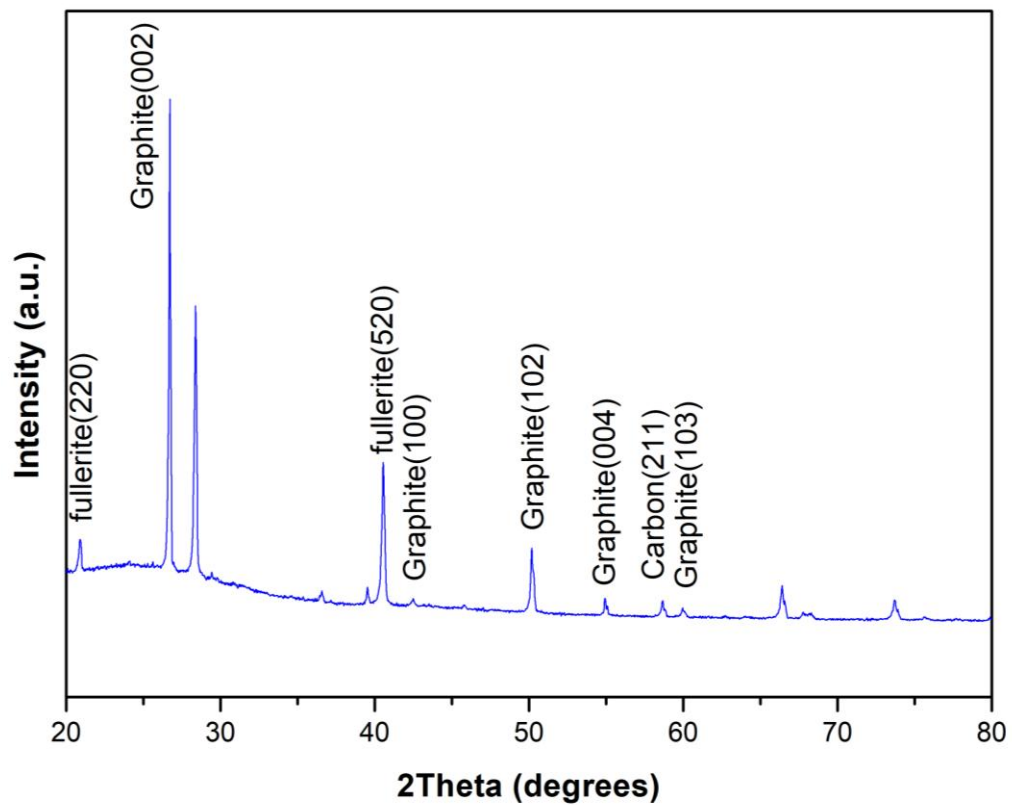
ภาพที่ 3.9 เครื่อง Battery Testers system

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

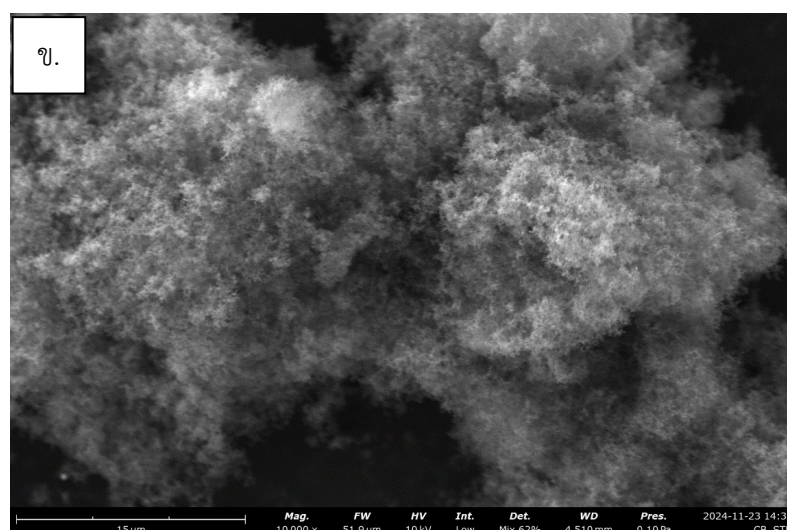
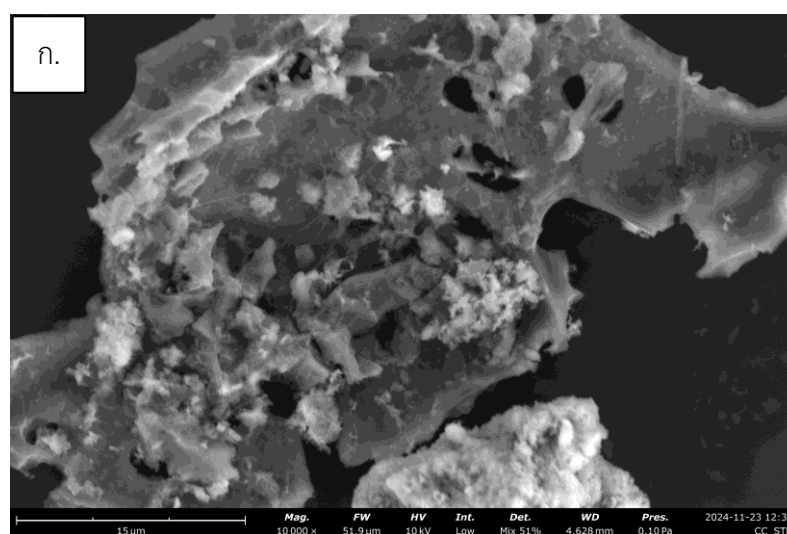
การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น AERIS โดยวัดใช้ช่วง $20-80^{\circ}$ ดังภาพที่ 4.1 พบว่า ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด มีโครงสร้างผลึกแบบ fullerite มีระนาบ 220 และ 520 (reference code 00-049-1720) และแบบ Graphite มีระนาบ 002 100 102 004 103 (reference code 00-025-0284)



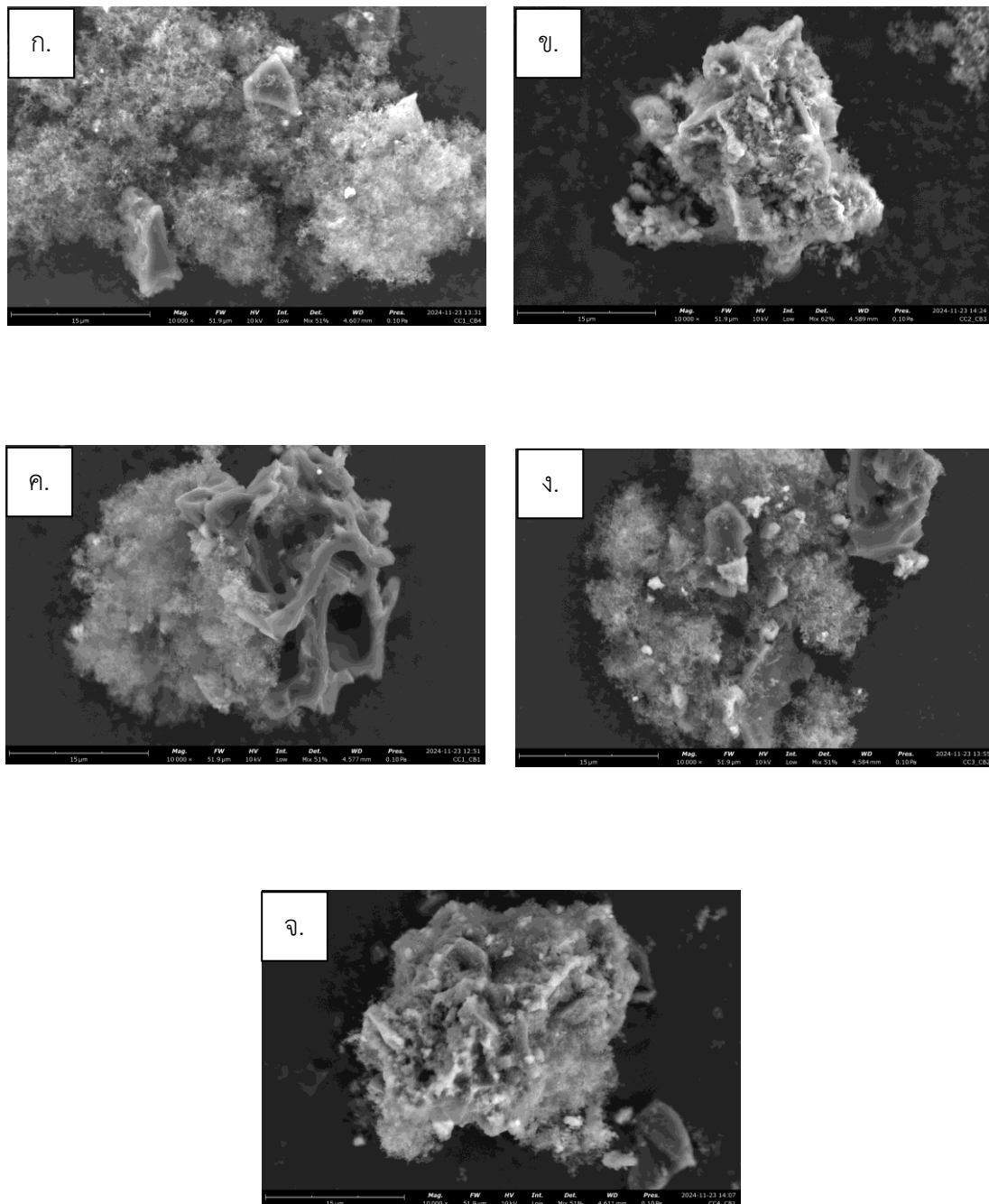
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

4.2 พื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

ภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านคาร์บอนด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังภาพที่ 4.2 ก) พื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด และ ข) พื้นผิวของคาร์บอนแบล็ค เมื่อต้องการเพิ่มพื้นที่ผิวรูพรุนให้สูงขึ้นของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดโดยการเติมคาร์บอนแบล็ค ดังภาพที่ 4.3 ในสัดส่วน ก) CC1-CB4 ข) CC2-CB3 ค) CC1-CB1 ง) CC3-CB2 และ จ) CC4-CB1 พบว่าอนุภาคของคาร์บอนแบล็คแทรกเข้าไปบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด



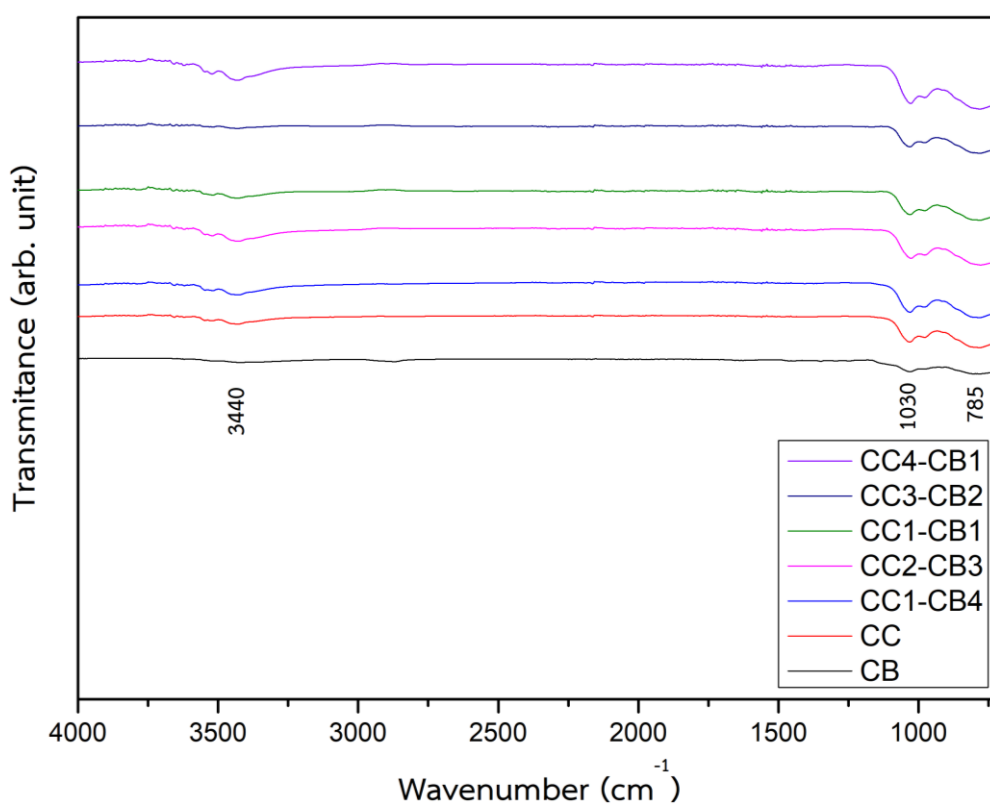
ภาพที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ก) ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด (CC) และ ข) คาร์บอนแบล็ค (CB)



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็คในสัดส่วน ดังนี้
 ก) CC1-CB4 ข) CC2-CB3 ค) CC1-CB1 ง) CC3-CB2 และ จ) CC4-CB1

4.3 หมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุไฟฟ้าที่ยาว

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุไฟฟ้าที่ยาวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด (CC) และที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค (CC-CB) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยคลื่นรังสีอินฟราเรด (FT-IR) ดังภาพที่ 4.4 พบว่า สัดส่วน 4:1 (CC4-CB) มีการดูดกลืนมากที่สุด ตำแหน่งเลขคลื่น 3440 cm^{-1} มีพันธะ O-H stretch และตำแหน่งเลขคลื่น 1030 cm^{-1} มีพันธะ C-N stretch รองลงมา 2:3 (CC2-CB3) ถัดมา 1:4 (CC1-CB4) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันของข้าวตั่วเก็บประจุไฟฟ้าที่ยาวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

4.4 ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบ Coin cell โดยใช้เครื่อง Battery Testers system ได้ค่าความหนาแน่นของพลังงานจำเพาะ (Specific energy density, E_D) เพื่อนำมาหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance, C_S) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดและที่ผสมกับคาร์บอนแบล็ค จากตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด (CC) มีค่าความหนาแน่นของพลังงานจำเพาะ 0.0107 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 0.0152 F/g และพบว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของคาร์บอนแบล็ค (CB) มีค่าความหนาแน่นของพลังงานจำเพาะ 0.0857 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 0.1219 F/g ซึ่งจะเห็นได้ว่าคาร์บอนแบล็คมีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะมากกว่าถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดถึง 8 เท่า

ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด ด้วยการเติมคาร์บอนแบล็ค ตามสัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 1:4 (CC1-CB4), 2:3 (CC2-CB3), 1:1 (CC1-CB1), 3:2 (CC3-CB2) และ 4:1 (CC4-CB1) ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ที่สัดส่วน 1:4 (CC1-CB4) มีค่าความหนาแน่นของพลังงานจำเพาะ 0.8348 mWh/g และค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 1.1873 F/g ซึ่งมีค่าสูงที่สุดถึง 78 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมคาร์บอนแบล็ค ซึ่งมากกว่าทุกสัดส่วนและมากกว่าคาร์บอนแบล็คเพียงอย่างเดียว สำหรับสัดส่วน 2:3 (CC2-CB3), 1:4 (CC1-CB4) และ 1:1 (CC1-CB1) ตามลำดับมีความจุไฟฟ้าจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมคาร์บอนแบล็ค แต่ยังมีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะน้อยกว่าคาร์บอนแบล็ค ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของซังข้าวโพดจากถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ด้วยการเติมคาร์บอนแบล็ค จึงเหมาะสมในการใช้ประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานต่อไป

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นพลังงาน และความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่เติมด้วยคาร์บอนแบล็ค

ลำดับ	สารตัวอย่าง	สัดส่วน	ความหนาแน่นของพลังงาน (mWh/g)	ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F/g)
1	CB	0:1	0.0857	0.1219
2	CC	1:0	0.0107	0.0152
3	CC1-CB4	1:4	0.0159	0.0226
4	CC2-CB3	2:3	0.019	0.0270
5	CC1-CB1	1:1	0.0129	0.0183
6	CC3-CB2	3:2	0.0089	0.0127
7	CC4-CB1	4:1	0.8348	1.1873

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดด้วยเทคนิค XRD พบว่า ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด มีโครงสร้างผลึกแบบ fullerite มีระนาบ 220 และ 520 และแบบ Graphite มีระนาบ 002 100 102 004 103

5.1.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของถ่านคาร์บอนด้วยเทคนิค SEM พบว่า อนุภาคของคาร์บอนแบล็คแทรกเข้าไปบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด

5.1.3 ถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ผสมกับคาร์บอนแบล็คที่สัดส่วน 4:1 (CC4-CB) มีการดูดกลืนมากที่สุด ตำแหน่งเลขคลื่น 3440 cm^{-1} มีพันธะ O-H stretch และตำแหน่งเลขคลื่น 1030 cm^{-1} มีพันธะ C-N stretch

5.1.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพด ด้วยการเติมคาร์บอนแบล็คที่สัดส่วน 1:4 (CC1-CB4) มีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงที่สุดถึง 78 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่ยังไม่ได้เติมคาร์บอนแบล็ค ซึ่งมากกว่าทุกสัดส่วนและมากกว่าคาร์บอนแบล็คเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดของซังข้าวโพดจากถ่านคาร์บอนจากซังข้าวโพดที่สามารถเคลือบซังข้าวโพดด้วยเทคนิคสเปรย์ได้ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ด้วยการเติมคาร์บอนแบล็ค จึงเหมาะสมในการใช้ประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยทำการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด โดยจะพัฒนาต่อไปด้วยการเติมกราฟีนในการพัฒนาซังข้าวโพดต่อไป

บรรณานุกรม

- 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.
- Frackowiak, E. (2007). **Carbon materials for supercapacitor application**, Physical Chemistry Chemical Physics, 9, 1774-1785.
- Li, Y., Zhao, Z., Zhang, J., Chen, Z., Liu, X., Wang, K., Sobolev, A.V., Savilov, S.V., Chen, M. (2024). **High pseudocapacitance electrode enabled by heterovalent doping and surface coating for rapid charge storage**, Surface and Coatings Technology, 476, 130169.
- Liu, D., Wang, Y., Jia, B., Wei, J., Liu, C., Zhu, J., Tang, S., Wu, Z., Chen, G. (2020). **Microwave-assisted hydrothermal preparation of corn straw hydrochar as supercapacitor electrode materials**, ACS Omega 2020, 5, 26084–26093.
- Priya, D.S., Kennedy, L.J., Anand, G.T. (2023). **Effective conversion of waste banana bract into porous carbon electrode for supercapacitor energy storage applications**, 10, 100096.
- Sahin, M.E., Blaabjerg, F., Sangwongwanich, A. (2020). **A review on supercapacitor materials and developments**, Turkish Journal of Materials, 5(2), 10-24.
- Say, M.G., Brooke, R., Edberg, J., Grimoldi, A., Belaineh, D., Engquist, I., Berggren, M. (2020). **Spray-coated paper supercapacitors**, npj Flexible Electronics, 4(14), 1-7.
- Simon, P., Gogotsi, Y. (2008). **Materials for electrochemical capacitors**, Nature materials, 7, 845–854.
- Wang, Q., Zhou, M., Zhang, Y., Liu, M., Xiong, W., Liu, S. (2018). **Large surface area porous carbon materials synthesized by direct carbonization of banana peel and citrate salts for use as high-performance supercapacitors**, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29, 4294–4300.
- 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.

Xu, M., Huang, Q., Lu, J., Niu, J. (2021). Green synthesis of high-performance supercapacitor electrode materials from agricultural corncob waste by mild potassium hydroxide soaking and a one-step carbonization, 161, 113215.

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@pcru.ac.th
5. ประวัติการศึกษา
วท.ม. (ฟิสิกส์)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศษ.บ. (ฟิสิกส์-คณิตศาสตร์)
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์
วัสดุศาสตร์ทางแสงและไฟฟ้า
ไดอิเล็กทริก
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่
ศานิตย์ สุวรรณวงศ์, กฤษณะ สีใส และอาทิตย์ หู้เต็ม. (2565). เซนเซอร์แสงของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบ, 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.
- ศานิตย์ สุวรรณวงศ์, จิราพัชร มากคำ และอาทิตย์ หู้เต็ม (2025). **ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม**, PSRU Journal of Science and Technology 10(2), 29-40.

ประวัติผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล นายอาทิตย์ หู้เต็ม
Mr. Artit Hutem
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3620400302046
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์ 67000
โทรศัพท์ 056-717100, 086-9909536
E-mail: artithutem@pcru.ac.th
5. ประวัติการศึกษา
ปร.ด. (ฟิสิกส์)
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วท.ม. (ฟิสิกส์)
มหาวิทยาลัยนเรศวร
วท.บ. (ฟิสิกส์)
มหาวิทยาลัยนเรศวร
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ
ฟิสิกส์, คณิตศาสตร์ฟิสิกส์
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่
ผลงานทางวิชาการ ที่ไม่ใช่ส่วนหนึ่งของการศึกษาเพื่อรับปริญญา และเป็นผลงานทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ตามหลักเกณฑ์ ที่กำหนดในการพิจารณาแต่งตั้งให้บุคคลดำรงตำแหน่งทางวิชาการอย่างน้อย 3 รายการในรอบ 5 ปีย้อนหลัง

Moonsri, P., Yakaw, P., and Hutem, A. (2020). Creation Model of Time-Dependent Lowering Operator and Raising Operator Time-Dependent External Damping Force Simple Harmonic Oscillator. PSRU Journal of Science and Technology. 5 (3), 51-59.

- Charoenpakdee, J., Hutem, A., Boonchui, S. (2020). Transmission of charge ion in Single-walled Carbon Nanotube, Journal IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Volume 773, Issue1, Pages 012030.
- Masoongnoen, N., Moonsri, P., Ellis, T., Suwanwong, S. and Hutem, A. (2021). Calculation of Electric Field from Continuous Charge Distribution on Linear Charge Density of Sine Function for Damped-Oscillatory Motion, Journal of Earth Science, Astronomy and Space, Vol. 4 No. 1, Pages 58-69.
- Rattanaporn Rattanawichai, Piyaat Moonsri, and Artit Hutem. (2021). Evaluation of time-dependent performance for the 10,000-meter mini marathon runner via Newton's second law of motion. Life Sciences and Environment Journal. 22 (2), 332-345.
- Hutem, A., Suwanwong, S., Ellis, T., and Masoongnoen, N. (2021). Determination of the Time-Dependent Velocity for Charged Particle via Cosine Electrostatic Function, Journal of Earth Science, Astronomy and Space, Vol. 4 No. 1, Pages 46-57.
- Changkham, J., Moonsri, P., and Hutem, A. 2022, Modelling the projectile motion under a time-dependent external force. VRU Research and Development Journal Science and Technology, 17(2), 45-59.
- Moonsri, P., Pakamwang, J., and Hutem, A. 2022, Calculation of Electric charge, electric field, and electric potential of spherical conductors containing volume charge density of the sine function. VRU Research and Development Journal Science and Technology, 17(3), 61-74.
- Jampakaew, Y., Moonsri, P., Pakamwang, J., and Hutem, A. 2022, Kinetic model of 4-wheel machanum automation vehicle. VRU Research and Development Journal Science and Technology, 17(3), 97-112.