

ความต้านทานไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์จากการเตรียมด้วยเปลือกพืชตระกูลแตงที่ใช้ตัวกระตุ้นที่แตกต่างกัน

กาญจนาพร อ่อนทรายแก้ว¹ ปรีชา ปัญญา^{2*}

Received : November 1, 2021

Revised : December 27, 2021

Accepted : December 29, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวกระตุ้นที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง จากแตงโม แคนตาลูป และแตงไทย และเพื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า โดยทำการศึกษาศักยภาพของตัวกระตุ้น ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และกรดทาร์ทาริก โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หาพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์จากสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู และทดสอบความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์แบบเข็ม ผลการศึกษา พบว่า สำหรับเปลือกแตงโม เปลือกแคนตาลูป และเปลือกแตงไทยที่ถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 139, 162 และ 110 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า สรุปได้ว่าจากลักษณะพื้นที่ผิวที่สูงและขนาดรูพรุนในถ่านกัมมันต์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้

คำสำคัญ: ความต้านทานไฟฟ้า ถ่านกัมมันต์ เปลือกพืชตระกูลแตง พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์

¹ นักศึกษา หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร อีเมล: tangkua.kanjanaporn@gmail.com

² รองศาสตราจารย์ หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร อีเมล: preecha@kpru.ac.th

* ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: preecha@kpru.ac.th

ELECTROCHEMICAL RESISTANCE OF ACTIVATED CARBONS FROM PREPARATION WITH CUCURBIT PEEL ACTIVATED BY DIFFERENT ACTIVATORS

Kanjanaporn Onsaikaew¹ Preecha Panya^{2*}

Abstract

The purpose of this research was to study appropriate activators for preparing activated carbons from peels of cucurbits, watermelon, cantaloupe and muskmelon and to prepare electrochemical resistance via chemical activation, in which zinc chloride ($ZnCl_2$), potassium hydroxide (KOH) and tartaric acid ($C_4H_6O_6$) were used as activators. The surface morphology and pore size of the activated carbon were characterized by scanning electron microscope (SEM). Langmuir isotherm of methylene blue adsorption was conducted to identify the surface area value of the activated carbon. The electrochemical resistance was tested by analog multimeter. The results showed that the activated carbon from watermelon peel, cantaloupe peel and muskmelon peel activated by $ZnCl_2$ presents the highest surface area of 139, 162 and 110 m^2/g , respectively. The results were corresponded with the electrochemical resistance values. This can be concluded that the appearance of higher surface area and pore size in activated carbon was applied for supercapacitor composition.

Keywords: Electrochemical resistance, Activated carbon, Cucurbit peel, Surface area of activated carbon, Langmuir isotherm

¹ Bachelor of Education Program in Chemistry, Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet Province, e-mail: tangkua.kanjanaporn@gmail.com

² Associate Professor in Chemistry, Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet Province, e-mail: preecha@kpru.ac.th

* Corresponding author, e-mail: preecha@kpru.ac.th

บทนำ

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (Activation process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี มีพื้นที่ผิวมากและมีความพรุน จึงมีความสามารถในการดูดซับสูง (Mahaninia et al., 2015) โดยถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบทุกชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหิน หรือวัสดุชีวมวลต่างๆ ได้แก่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม และไม้ แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้มีความพยายามหาวัสดุทางเลือกใหม่ ๆ ที่มีราคาต่ำ หาได้ง่าย หรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว เปลือกถั่วพิทาชิโอ เปลือกถั่วแมคคาเดเมีย ยางรถยนต์ หรือกากตะกอนน้ำเสีย เป็นต้น

ปัจจุบันการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้ วิธีการโดยทั่วไปจะประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การบด การอบแห้ง การทำให้เป็นเม็ด แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ (ธีระ วงศ์เนตร และปรีชา ปัญญา, 2554) ซึ่งการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) โดยการกระตุ้นทางกายภาพเป็นการกระตุ้นโดยใช้แก๊ส เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกซิเจน (O_2) หรือไอน้ำ (Steam) ที่อุณหภูมิ 800 – 1,100 °C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่พื้นผิวของคาร์บอน ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ และทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่วนการกระตุ้นทางเคมีเป็นการเติมสารเคมี สารกระตุ้น หรือตัวกระตุ้น เช่น ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น ลงไปผสมกับวัตถุดิบ แล้วนำตัวอย่างไปเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันต่อไป (ยุวรัตน์ เงินเย็น และคณะ, 2561)

พืชตระกูลแตง (Cucurbit) เป็นพืชอาหารที่มีความสำคัญของโลก แต่งที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ แตงโม แคนตาลูป แตงไทย และเมล่อน เป็นต้น มีการปลูกและใช้ประโยชน์จากพืชในตระกูลนี้มานาน พืชตระกูลแตงเป็นผักที่มีความสำคัญเนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการและการนำไปใช้ในการทำอาหาร แต่เปลือกที่ถูกทิ้งเป็นขยะของเสียทิ้งระหว่างการบริโภคและการแปรรูปอันเนื่องมาจากเป็นพืชมีเปลือกหนาและเมล็ดใหญ่ ของเสียเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นสำหรับการกำจัด เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์มากนัก (Shetty et al., 2012)

ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor) หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (Reece et al., 2019) โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญตัวหนึ่งที่ทำให้เกิดตัวเก็บประจุความจุสูงนี้ขึ้นมาได้ นั่นคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมี 2 ชั้น คือ ชั้นแอโนดและชั้นแคโทด โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กตริก ด้วยคุณสมบัติที่พิเศษของถ่านกัมมันต์ เช่น พื้นที่จำเพาะสูง ค่าการนำไฟฟ้าที่สมดุล มีโครงสร้าง

เป็นรูปทรงปริมาณมากและมีความคงตัวสูงในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้เป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับใช้ทำขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง การปรับโครงสร้างที่มีรูปทรงและการปรับเปลี่ยนพื้นผิวเป็นวิธีสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์ (Otgonbayar et al., 2021)

ที่ผ่านมา มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่างๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ยูคาลิปตัส (กนกวรรณ สิริอด และวรินรำไพ เศรษฐ์ธนบุตร, 2561) ถ่านกัมมันต์จากเปลือกกระท้อน และก้านพริก (ยุวรัตน์ เงินเย็น และคณะ, 2561) จากเปลือกมังคุด (สุภาพร รัตนพันธ์ และคณะ, 2557) จากเศษเปลือกแตงโม (Geçgel et al., 2019) และมีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Gandla et al., 2021; Elanthamilan et al., 2019; Wei et al., 2019; Sultan et al., 2019) แต่ยังไม่มีการศึกษาถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตงและนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในซูเปอร์คาปาซิเตอร์หรือตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การประยุกต์ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้แก่ อุปกรณ์สตาร์ทเครื่องยนต์ที่ต้องการกำลังสูงในเวลาอันสั้น และอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ต้องการชาร์จอย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีในแบตเตอรี่รถยนต์ไฮบริด อุปกรณ์ส่งกำลังระเบิดในเซลล์เชื้อเพลิง อุปกรณ์สำหรับประจุกัมมันต์ในเครื่องบินแอร์บัส ซึ่งแม้ว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะเก็บพลังงานได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ แต่ให้พลังงานอย่างรวดเร็วและแสดงพลังงานเฉพาะที่สูงมาก (Boulanger et al., 2021)

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ เปลือกแตงโม แคนตาลูป และแตงไทย ซึ่งสามารถหาได้ง่ายตามตลาด และร้านขายผลไม้มาเป็นวัสดุตั้งต้นที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทางเคมีที่ต่างกัน และนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า โดยเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาตัวกระตุ้นที่เหมาะสม ได้แก่ $ZnCl_2$, KOH และ $C_4H_6O_6$ ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง ได้แก่ เปลือกแตงโม แคนตาลูป และแตงไทย และหาพื้นที่ผิว วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์
2. เพื่อทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง

ล้างเปลือกแตงโม (Wm), แตงไทย (Mm) และแคนตาลูป (Cl) ด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรก นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

แล้วนำไปอบให้ละเอียดเป็นผง และร่อนด้วยตะแกรง นำไปอบต่อที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใส่ในถ้วยระเหย ผสมวัตถุดิบกับตัวกระตุ้นต่างๆ ได้แก่ $ZnCl_2$, KOH และ $C_4H_6O_6$ ในอัตราส่วนโดยมวล 1:2 ผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ล้างถ่านกัมมันต์ด้วยน้ำกลั่น จนค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านการล้างมีค่าคงที่ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นตัดฉลากกำกับและนำไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศ แล้วนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา และขนาดของรูพรุน และนำไปหาพื้นที่ผิวโดยวิธีการดูดซับสารเมทิลีนบลู

2. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง

ติดเทปคาร์บอนสองหน้าบนแท่นติดชิ้นงาน ตักตัวอย่างมาใส่ภาชนะ แล้วคว่ำแท่นติดชิ้นงานที่ติดเทปคาร์บอนสองหน้าให้ผิวหน้าของเทปคาร์บอนสองหน้าสัมผัสกับอนุภาค โดยระวังอย่าให้แท่นติดชิ้นงานกดทับอนุภาค เพราะจะทำให้อนุภาคผิดรูปและจมได้ จากนั้นใช้ลูกยางเป่าส่วนที่ไม่ติดออกไป แล้วนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT200 ประเทศญี่ปุ่น) เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง และวัดขนาดรูพรุนโดยใช้ SEM หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากทั้งหมด 5 ชิ้นงาน/ตัวอย่าง

3. การศึกษาพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง

3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู

ชั่งเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}N_8ClS \cdot 3H_2O$) มา 0.5 g (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร จากนั้นการเตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู โดยเจือจางสารละลายให้เป็น 5, 10, 20 และ 40 ppm จากนั้นนำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-1800 ประเทศญี่ปุ่น) ที่ความยาวคลื่น 660 nm. บันทึกผลเพื่อสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้นของเมทิลีนบลู (แกน X) กับค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y)

3.2 การทดลองการดูดซับเมทิลีนบลู

เตรียมสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ppm เพื่อทดลองการดูดซับเมทิลีนบลูโดยการทดลองแบบแบตช์ (Batch method) บนถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตงที่กระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นที่แตกต่างกัน ชั่งถ่านกัมมันต์ 0.05 g (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ใส่ในขวดโพลีเอทิลีนขนาด 50 mL แล้วเติมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ ที่เตรียมได้ลงในขวดที่มีถ่านกัมมันต์อยู่จำนวน 25 mL ปิดฝา แล้วนำไปผสมด้วยเครื่องหมุนแบบลูกกลิ้ง (Roller mixer ยี่ห้อ Stuart

รุ่น SRT6D ประเทศอังกฤษ) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (จากผลการทดลองเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับ) เมื่อครบกำหนดเวลา นำสารละลายทั้งหมดไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 660 nm. คำนวณปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูตามสมการ (1) (ปรีชา ปัญญา, 2557; ทิชากร สวนใจดี และปรีชา ปัญญา, 2559)

$$q = \frac{(C_i - C_{eq}) \times V}{1000 \times m} \quad (1)$$

เมื่อ q = ปริมาณการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูต่อ 1 กรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g)

C_i = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลู (mg/L)

C_{eq} = ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายเมทิลีนบลู (mg/L)

V = ปริมาตรสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ (mL)

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (g)

สูตรการคำนวณสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการ (2)

$$\frac{C_{eq}}{q} = \frac{C_{eq}}{N_M} + \frac{1}{K_L N_M} \quad (2)$$

เมื่อ q = ปริมาณการดูดซับของสารละลายเมทิลีนบลูต่อ 1 กรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g)

C_{eq} = ความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายเมทิลีนบลู (mg/L)

N_M = จำนวนเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับขึ้นเดี่ยวดต่อ 1 กรัมของถ่านกัมมันต์ (mg/g)

K_L = ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองการดูดซับเมทิลีนบลูไปพล็อตกราฟตามสมการไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ โดยให้ C_{eq}/q เป็นแกน y และ C_{eq} เป็นแกน x โดยกราฟที่ได้ค่า r^2 จะต้องมีค่าเข้าใกล้ 1 จะได้ค่าความชัน (Slope) เท่ากับ $1/N_M$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/K_L N_M$ ซึ่งสามารถคำนวณหาจำนวนเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับขึ้นเดี่ยวด (N_M) จากสมการ 3

$$N_M = \frac{1}{\text{Slope}} \quad (3)$$

3.3 การคำนวณค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกพีชตระกูลแดงจากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

จากสมการ (3) จะได้ค่า N_M แล้วนำค่า N_M ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ (4) เมื่อคำนวณออกมาจะได้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (S_{MB}) (Pashley & Karaman, 2004; Nunes & Guerreiro, 2011; ทิชากร สวนใจดี และปรีชา ปัญญา, 2559)

$$S_{MB} = \frac{N_M \cdot a_{MB} \cdot N_A}{M} \quad (4)$$

เมื่อ S_{MB} = พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ต่อ 1 กรัมของถ่านกัมมันต์ (m^2/g)

N_M = จำนวนเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับขึ้นเดียว (mg/g)

a_{MB} = ค่าพื้นที่ผิวที่ครอบครองเมทิลีนบลู 1 โมเลกุล = $197.2 \times 10^{-20} m^2$

N_A = เลขอาโวกาโดร = $6.02 \times 10^{23} (mol^{-1})$

M = มวลโมเลกุลของเมทิลีนบลู 373.9 (g/mol)

4. การเตรียมขั้วไฟฟ้าและการทดสอบค่าความต้านทาน

นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตงผสมกับแกรไฟต์ และโพลีเตตระฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) ในอัตราส่วนโดยมวล 85:10:5 จากนั้นเติมอะซิโตน ปริมาณ 90 mL แล้วผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 35 °C โดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร แล้วนำสารละลายที่ได้มาเคลือบลงบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตัดขั้วไฟฟ้าให้ได้ขนาด 1 cm^2 จากนั้นเตรียมเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังภาพที่ 1 โดยใช้ 6.0 M KOH เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยหยดลงในระหว่างชั้นของถ่านกัมมันต์ นำไปทดสอบค่าความต้านทานด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์แบบเข็ม (Analog multimeter ยี่ห้อ SPA รุ่น YX-360TRE-B ประเทศจีน) (Sultan et al, 2019)



ภาพที่ 1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าจากถ่านกัมมันต์เพื่อทดสอบค่าความต้านทาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

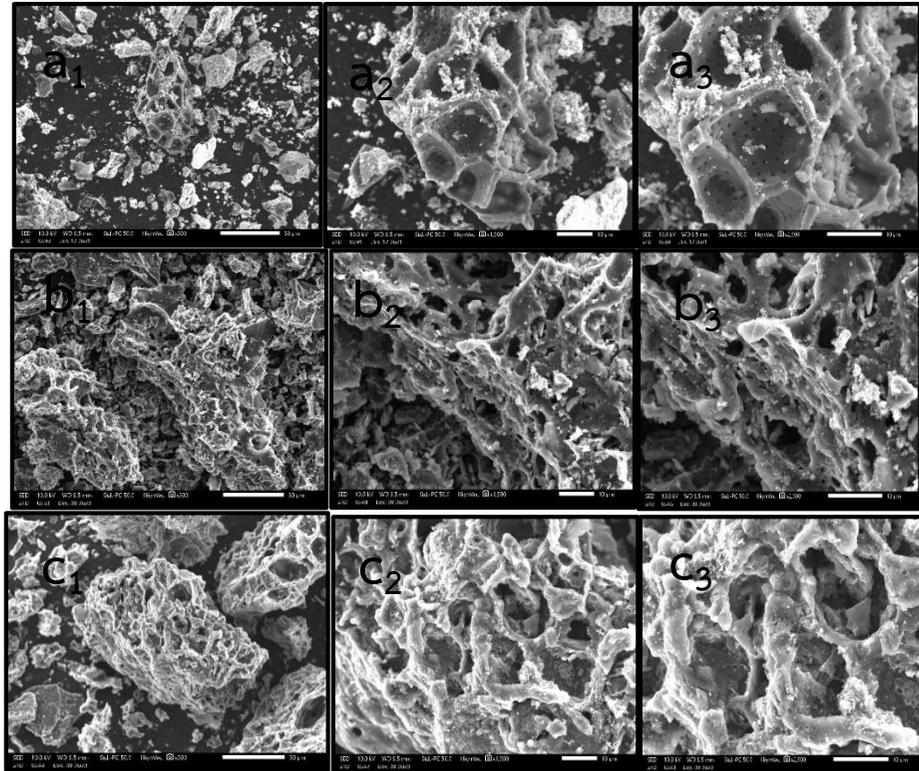
1. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการนำตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตงไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500, 1500 และ 2500 เท่า ได้ผลดังภาพที่ 2 – 4

500 เท่า

1500 เท่า

2500 เท่า



ภาพที่ 2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์จากเปลือกแตงโม (Wm) ได้แก่ (a₁ - a₃) Wm-ZnCl₂, (b₁ - b₃) Wm-KOH และ (c₁ - c₃) และ Wm-C₄H₄O₆

จากภาพที่ 2 a₁ - a₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Wm-ZnCl₂ ที่มีขนาดรูพรุนที่เล็กจำนวนมาก โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.63 μm (ตารางที่ 1) รูป b₁ - b₃ และ c₁ - c₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Wm-KOH และ Wm-C₄H₄O₆ ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.44 และ 2.74 μm ตามลำดับ

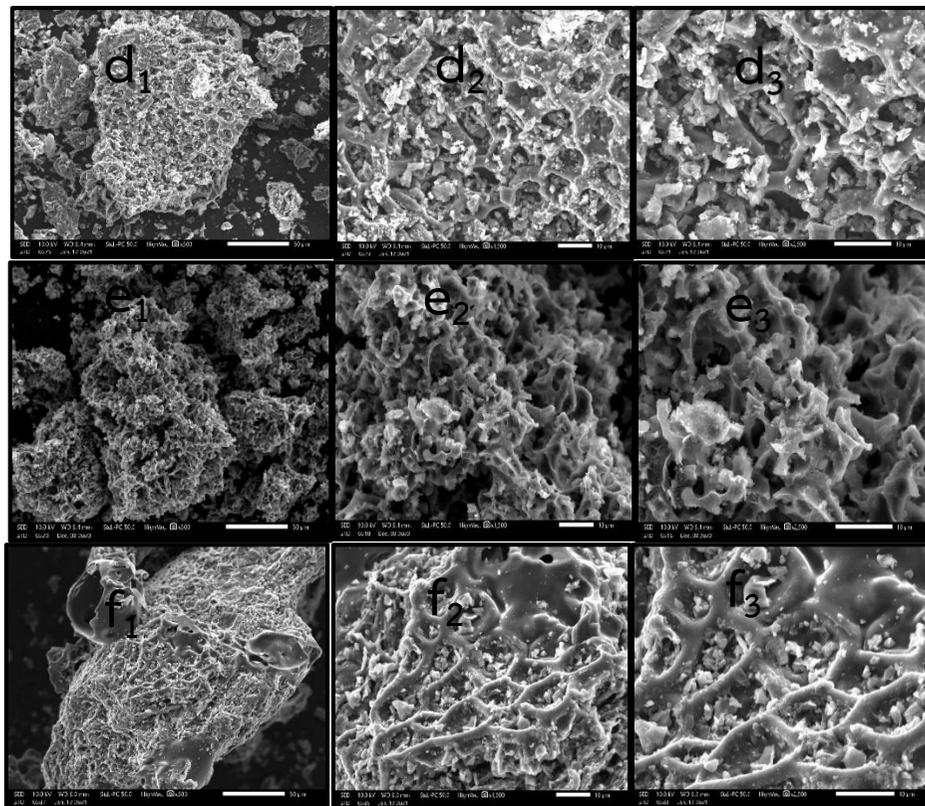
จากภาพที่ 3 d₁ - d₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Cl-ZnCl₂ ที่มีขนาดรูพรุนที่เล็ก โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.81 μm รูป e₁ - e₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Cl-KOH ที่มีลักษณะคล้ายกับรังผึ้ง รูป f₁ - f₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Cl-C₄H₄O₆ ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าและมีการปรากฏค่อนข้างน้อย

จากภาพที่ 4 g₁ - g₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Mm-ZnCl₂ มีขนาดรูพรุนที่เล็กเฉลี่ยเท่ากับ 0.40 μm (ตารางที่ 1) รูป h₁ - h₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Mm-KOH ที่มีลักษณะคล้ายกับรังผึ้ง และรูพรุนที่มีลักษณะกลมซ้อนกันหลายๆ ชั้น รูป i₁ - i₃ แสดงให้เห็นพื้นผิวของ Mm-C₄H₄O₆ ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า

500 เท่า

1500 เท่า

2500 เท่า



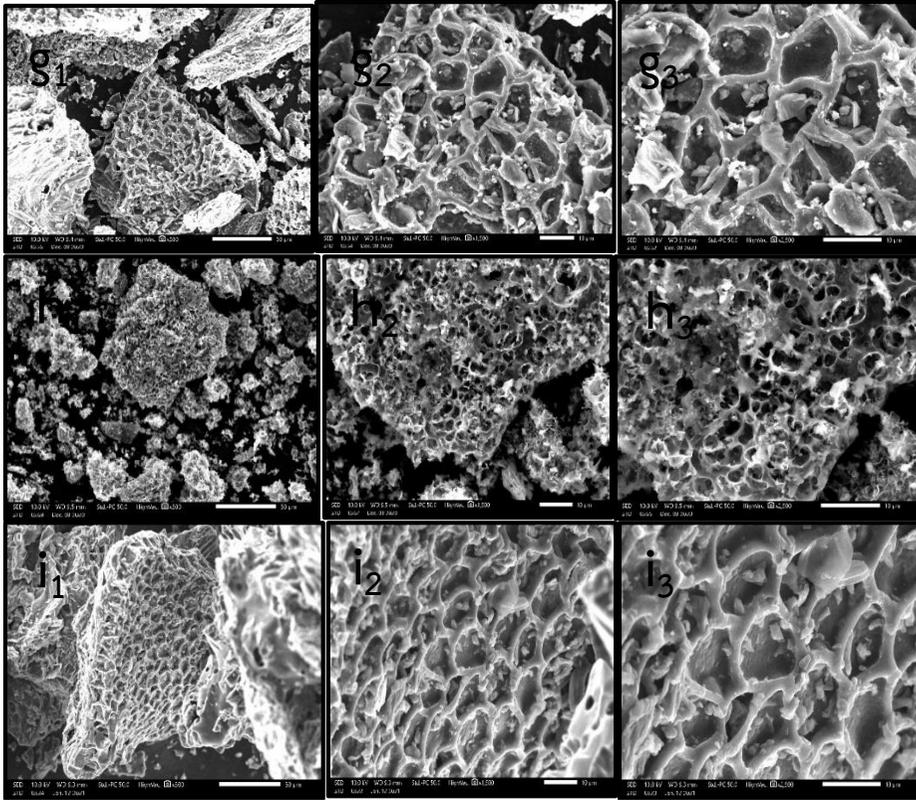
ภาพที่ 3 รูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์จากเปลือกแคนตาลูป (Cl) ได้แก่ (d₁ - d₃) Cl-ZnCl₂, (e₁ - e₃) Cl-KOH และ (f₁ - f₃) Cl-C₄H₄O₆

สำหรับขนาดรูพรุนที่ได้ตามตารางที่ 1 มีขนาดใกล้เคียงกับการศึกษาที่ผ่านมา โดย Rahmah et al. (2017) ได้รายงานขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วย NaOH อยู่ในช่วง 5-17 µm. สำหรับวัสดุชีวมวลชนิดเดียวกัน การใช้สภาวะในการกระตุ้นต่างกัน จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติรูพรุนต่างกัน ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของสุโรชนี สกุลดวงดี (2545) และสุนีย์ คุ่ยเสงี่ยม (2544) ใช้วัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือ กะลาปาล์มเหมือนกัน แต่ใช้สภาวะในการกระตุ้นต่างกัน ได้แก่ ชนิดของสารกระตุ้น อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้น ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติรูพรุนต่างกัน การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ สอดคล้องกับงานวิจัยของภิเชกรุ่งโรจน์ชัยพร (2554) ที่รายงานว่าลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนของวัสดุรูพรุนมีผลต่อพื้นที่ผิว โดยขนาดรูพรุนของวัสดุมีขนาดกลางจนถึงขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อขนาดของรูพรุนมีขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่พื้นที่ผิวจะมีค่าต่ำ

500 เท่า

1500 เท่า

2500 เท่า



ภาพที่ 4 รูปที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์จากเปลือกแตงไทย (Mm) ได้แก่ (s₁ - s₃) Mm-ZnCl₂, (h₁ - h₃) Mm-KOH และ (i₁ - i₃) Mm-C₄H₄O₆

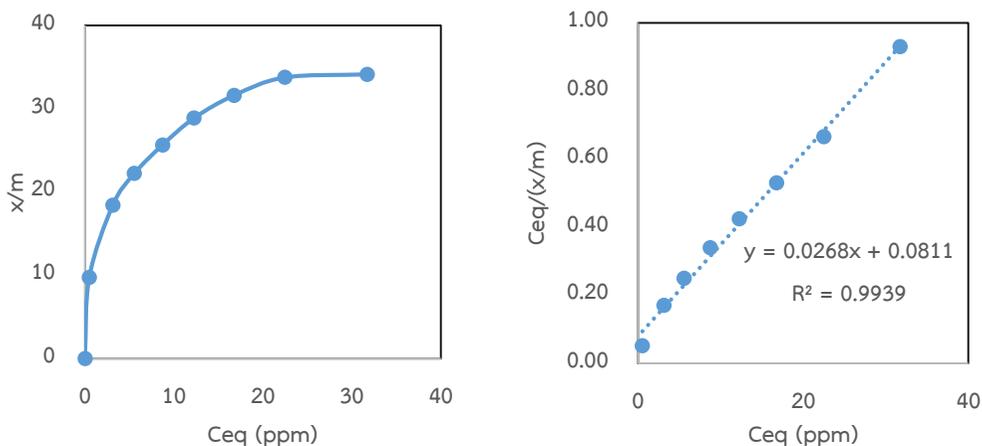
2. ผลการศึกษาพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง

จากการศึกษาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตงโดยใช้วิธีการการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ในการคำนวณค่าพื้นที่ผิว มีตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 5

จากภาพที่ 5 ตัวอย่างไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลีนบลู และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกแคนตาลูปที่กระตุ้นด้วยกรดทาร์ทริก มีค่าความเป็นเส้นตรง ($R^2 = 0.9939$) และมีความชัน = 0.0268 นำไปแทนในสมการที่ 3 จะได้ N_M ดังนี้

$$\text{Slope} = 0.0268 \quad \text{g/mg}$$

$$N_M = 1/(0.0268) = 37.3134 \text{ mg/g} = 37.3134 \times 10^{-3} \text{ g/g}$$



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับเมทิลสเตียเรต (ชาย) และไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (ขวา) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกแคนตาลูปที่เตรียมได้จากตัวกระตุ้น $C_4H_6O_6$

แล้วนำค่า N_M ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ (4) เมื่อคำนวณออกมาจะได้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (S_{MB}) จากเปลือกแคนตาลูปที่เตรียมได้จากตัวกระตุ้น $C_4H_6O_6$ ดังนี้

$$\begin{aligned} S_{MB} &= (37.3134 \times 10^{-3} \text{ g/g} \times 197.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \times 6.02 \times 10^{-23} \text{ mol}^{-1}) / 373.9 \text{ g/mol} \\ &= 118.47 \text{ m}^2/\text{g} \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ตัวอื่น ๆ ได้ผลดังตารางที่ 1 สำหรับเปลือกแตงโม เปลือกแคนตาลูป และเปลือกแตงไทย พบว่าซิงค์คลอไรด์สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุด โดยมีพื้นที่ผิว 139, 162 และ 110 m^2/g ตามลำดับ รองลงมาได้แก่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และกรดทาร์ทาริก ตามลำดับ พบว่าผลที่ได้อาจแตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมา (Geçgel et al., 2019) เนื่องจากผลของตัวแปรอื่น ๆ ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เช่น ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น อุณหภูมิและเวลาในการคาร์บอนไนซ์ และวิธีการหาพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และสอดคล้องกับงานวิจัยของยุวรัตน์ เงินเย็น และชนิษฐา คำวิไลศักดิ์ (2556) ที่รายงานไว้ว่าวัสดุชีวมวลมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยชีวมวลแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบเหล่านี้ต่างกัน ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีสมบัติรูพรุนต่างกัน เช่น งานวิจัยของสุจนีย์ คุ่ยเสียม (2544) ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์ม โดยมีสภาวะการเตรียมเหมือนกัน พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลามะพร้าวมีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม และค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลาปาล์ม

3. ผลการวัดค่าความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่เตรียมด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง

จากการนำตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตงที่เตรียมได้ไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ และนำไปทดสอบความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์แบบเข็ม ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และค่าความต้านทานไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์จากเปลือกพืชตระกูลแตง

ตัวอย่าง	S_{MB} (m^2/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (μm)	R (Ω)
Wm-ZnCl ₂	139.26±0.61	0.63±0.14	<0.10
Wm-KOH	127.51±0.52	2.44±0.21	<0.20
Wm-C ₄ H ₄ O ₆	126.00±0.50	2.74±0.30	12500
Cl-ZnCl ₂	162.00±0.83	0.81±0.15	<0.10
Cl-KOH	140.13±3.63	1.09±0.16	<0.10
Cl-C ₄ H ₄ O ₆	118.47±0.45	2.66±0.67	30000
Mm-ZnCl ₂	110.63±0.39	0.40±0.46	<0.10
Mm-KOH	109.86±0.38	1.87±0.25	<0.10
Mm-C ₄ H ₄ O ₆	91.24±0.26	4.34±0.34	32000

จากตารางที่ 1 พบว่า พบว่าขั้วไฟฟ้าจากถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมด้วยเปลือกพืชตระกูลแตงโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงสุด จึงเหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้ เนื่องจากมีความต้านทานที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยการกระตุ้นด้วยกรดทาร์ทาริก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Balbasi & Sahin (2015) ที่รายงานว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ต้องมีค่าความต้านทานน้อยกว่า 1 Ω และเมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนจะพบว่า ขนาดที่เล็กกว่าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวสูงกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei et al., (2019) ที่รายงานว่าขนาดรูพรุนที่เล็กของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถลดความต้านทานได้

สรุป

1. ถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมด้วยเปลือกพืชตระกูลแตง ได้แก่ เปลือกแตงโม เปลือกแคนตาลูป และเปลือกแตงไทย โดยผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด โดยมีพื้นที่ผิว 139, 162 และ 110 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ รองลงมาได้แก่ การกระตุ้นด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และกรดทาร์ทาริก ตามลำดับ
2. ลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนของวัสดุรูพรุนมีผลต่อพื้นที่ผิว โดยรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และกรดทาร์ทาริก กล่าวได้ว่าเมื่อขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ผิวจะมีค่าสูงกว่า
3. ขั้วไฟฟ้าจากถ่านกัมมันต์ที่ถูกเตรียมด้วยเปลือกพืชตระกูลแตงโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงที่สุดเนื่องจากมีความต้านทานที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยการกระตุ้นด้วยกรดทาร์ทาริก ขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่าขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า

ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เช่น ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้กระตุ้น อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และควรใช้วิธีการศึกษาหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์โดยวิธีอื่นเพื่อเปรียบเทียบ ได้แก่ วิธีบีอีที (BET) ที่ใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจน และควรใช้เครื่องมือที่สามารถทดสอบค่าความจุของเซลล์ไฟฟ้าที่เตรียมจากถ่านกัมมันต์

เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ สীরอด, และวรินรำไพ เศรษฐ์ธมบุตร. (2561). สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น. *วารสารวิจัย มข.*, 19(3), 13-27.
- ทิชากร สอนใจดี, และปรีชา ปัญญา. (2559). การกำจัดฟีนอลโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงด้วยเซทิลพริดีเนียมคลอไรด์. *สัททอง : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.)*, 3(2), 69-76.
- ธีระ วงศ์เนตร, และปรีชา ปัญญา. (2554). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลัง. *สัททอง วารสารการวิจัย*, 17, 13-20.
- ปรีชา ปัญญา. (2557). *เคมีพื้นผิว*. กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.
- ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. (2554). วัสดุรูพรุนคืออะไร. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 20(1), 60-69.

- ยุวรัตน์ เงินเย็น, และชนิษฐา คำวิสัยศักดิ์. (2556). ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลของประเทศไทย: การทบทวนวรรณกรรม. *วิศวกรรมสาร มข.*, 40(2), 267-283.
- ยุวรัตน์ เงินเย็น, วีรวิทย์ ผิวเรืองนนท์, และรัชพล อณาชัย. (2561). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกกระท้อนและก้านพริก. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 4(2), 98-107.
- สุจนีย์ คู่ยเสงี่ยม. (2544). การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาพร รัตนพันธ์, เพ็ญภา เพ็งแจ่ม, และพนิตา กังซุ่น. (2557). การเตรียมและลักษณะจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด. พัทลุง: มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- สุโรชนี สุกุลดวงดี. (2545). การเตรียมถ่านกัมมันต์และการทดสอบความชอบในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ในการกระตุ้น. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Balbasi, M., & Sahin, A. (2015). Symmetrical supercapacitor application with low activated carbon content. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4), 683-692.
- Boulanger, N., Skrypnichuk, V., Nordenström, A., Moreno-Fernández, G., Granados-Moreno, M., Carriazo, D., Mysyk, R., Bracciale, G., Bondavalli, P., & Talyzin, A.V. (2021). Spray deposition of supercapacitor electrodes using environmentally friendly aqueous activated graphene and activated carbon dispersions for industrial implementation. *ChemElectroChem*, 8, 1349–1361.
- Elanthamilan, E., Rajkumar, S., Yesuraj, J., Premkumar, D., Kumaresan, M., Karthikeyan, K. & Princy, M.J. (2019). Low cost activated carbon derived from Cucumis melo fruit peel for electrochemical supercapacitor application. *Applied Surface Science*, 486, 527-538.
- Gandla, D., Wu, X., Zhang, F., Wu, C., & Tan, D.Q. (2021). High-performance and high-voltage supercapacitors based on N-doped mesoporous activated carbon derived from dragon fruit peels. *ACS Omega*, 6, 7615–7625.
- Geçgel, O., Ünal, G., & Yüksel, B. (2019). Preparation and characterization of mesoporous activated carbons from waste watermelon rind by using the chemical activation method with zinc chloride. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 3621-3627.

- Mahaninia M., Rahimian, P., & Kaghazchi, T. (2015). Modified activated carbons with amino groups and their copper adsorption properties in aqueous solution. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 23, 50–56.
- Nunes, C.A., & Guerreiro, M.C. (2011). Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers. **Química Nova**, 34(3), 472-476.
- Otgonbayar, Z., Yang, S., Kim, I.J., & Oh, W.C. (2021). Surface modification effect and electrochemical performance of LiOH-high surface activated carbon as a cathode material in EDLC. **Molecules**, 26, 2187-2015.
- Pashley, R. M., & Karaman, M. E. (2004). **Applied colloid and surface chemistry**. Chichester: John Wiley & Sons.
- Rahmah, A., Zainollah, A., Fitriani, O.A., Ramadhan, D.S., Cahayo, M., & Masruroh. (2017). EDLC type supercapacitor electrode based on banana peels activated carbon. **Indonesian Journal of Applied Physics**, 7 (1), 46-51.
- Reece, R., Lekakou, C., & Smith, P.A. (2019). A structural supercapacitor based on activated carbon fabric and a solid electrolyte. **Materials Science and Technology**, 35 (3), 368–375.
- Shetty, A.A., Rana, R., Buckseth, T., & Preetham, S.P. (2012). Waste utilization in cucurbits: A review. **Waste Biomass Valor**, 3, 363–368.
- Sultan, A., Ahsan, A., & Rafat, M. (2019). Supercapacitor performance of activated carbon derived from rotten carrot in aqueous, organic and ionic liquid based electrolytes. **Journal of Saudi Chemical Society**, 22, 993-1002.
- Wei, Q., Chen, Z., Cheng, Y., Wang, X., Yang, X., & Wang, Z. (2019). Preparation and electrochemical performance of orange peel based-activated carbons activated by different activators. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 574, 221-227.