



การศึกษาชีวไฟฟ้าคาร์บอนกัมมันต์จากชีวมวลสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด

นาย มณฑล ภูเวียงแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การศึกษาชีวไฟฟ้าคาร์บอนกัมมันต์จากชีวมวลสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาชีวไฟฟ้าคาร์บอนกัมมันต์จากชีวมวลสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด

โดย นาย มณฑล ภูเวียงแก้ว

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทรวีวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา โสทธิพิณฑะ)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัสนี โสมดี)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรางคณา วรรณภพ)

ชื่อ : มณฑล ภูเวียงแก้ว
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาชีวไฟฟ้าคาร์บอนกัมมันต์จากชีวมวลสำหรับ
 ประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.อสนี โสมดี
 ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

ภาวะโลกร้อนเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไขในปัจจุบัน การใช้วัสดุชีวมวลเป็น อิเล็กโทรดคาร์บอนถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ซึ่งช่วยลดการใช้ พลังงานที่ผลิตจากแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่วัสดุอิเล็กโทรดคาร์บอนที่ทำ จาก เปลือกเมล็ดยางพารา การศึกษานี้สังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และ กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ปราศจากออกซิเจน (Pyrolysis) ภายใต้ บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (N₂) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง และประกอบเป็น ชีวไฟฟ้ากึ่งเซลล์ (Coin cell) RE2 Cell #A, RE2 Cell #B, และ RE2 Cell #C การวิเคราะห์ คุณสมบัติของวัสดุนี้สำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ เซลล์กึ่งเซลล์ (Coin cell) ที่ผลิตได้แสดงค่าความจุ ไฟฟ้าจำเพาะ (specific capacitance) 193.44 F g⁻¹, 282.07 F g⁻¹, และ 334.63 F g⁻¹ ที่อัตราการ สแกน 10 mV s⁻¹ ตามลำดับ เซลล์ทำงานได้ดีเป็นเวลาประมาณ 1,000 รอบโดยมีค่าความจุไฟฟ้า จำเพาะ (specific capacitance) เพิ่มขึ้นเป็น 327.88 F g⁻¹, 443.23 F g⁻¹, และ 464.96 F g⁻¹ ตามลำดับ เซลล์สองเซลล์ที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมสามารถส่องแสงสว่าง LED ขนาด 3.0 V สีแดงได้ เป็นเวลาประมาณ 14 นาที ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งชี้ถึงศักยภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีซูเปอร์คาปาซิเตอร์ จากวัสดุเปลือกเมล็ดยางพารา เพื่อสร้างวัสดุอิเล็กโทรดประสิทธิภาพสูงสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : วัสดุชีวมวล, ซูเปอร์คาปาซิเตอร์, อิเล็กโทรดคาร์บอน, ความจุไฟฟ้าจำเพาะ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : MONTON POOWIANGKAEW
Thesis Title : A Study of activated carbon electrodes from biomass materials
for supercapacitor application
Major Field : Energy Technology and Management
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor DoctorASANEE SOMDEE
Academic Year : 2024

Abstract

Global warming necessitates urgent attention, with biomass-derived carbon electrodes emerging as a promising solution for supercapacitor development to reduce greenhouse gas emissions. This research investigates carbon electrodes synthesized from rubber seed shells through hydrothermal carbonization, KOH activation, and pyrolysis under N₂ atmosphere at 900°C for 4 hours. The material was fabricated into coin cell electrodes RE2 Cell #A, #B, and #C. The cells exhibited specific capacitance values of 193.44, 282.07, and 334.63 F g⁻¹ at 10 mV s⁻¹ scan rate, respectively. After 1,000 cycles, these values increased to 327.88, 443.23, and 464.96 F g⁻¹. Two series-connected cells successfully powered a 3.0 V red LED for 14 minutes, demonstrating the potential of rubber seed shell-derived materials for developing sustainable, high-performance supercapacitor electrodes.

Keyword : Biomass, Supercapacitor, Carbon electrodes, Specific capacitance

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาและการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อัสนี โสมดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ซึ่งได้ให้คำแนะนำอันมีค่า ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตาและความทุ่มเทของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แต่คุณอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทุกท่าน รวมถึงขอแสดงความกตัญญูตเวทิตาแต่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทั้งหลาย หากมีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานวิจัยให้ดียิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ คุณเอกวัฒน์ วิทูรปรกรณ์ ประธานกรรมการ บริษัท แอร์โรคลาส จำกัด ผู้สนับสนุนทุนการศึกษาอันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

มณฑล ภูเวียงแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 วิธีการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ของการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors)	4
2.2 การจำแนกประเภทของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและกลไกการกักเก็บพลังงาน (Classification of supercapacitors and their energy storage mechanism)	4
2.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electric double layer capacitors).....	6
2.4 ซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitors).....	6
2.5 ตัวเก็บประจุแบบผสม (Hybrid capacitors).....	7
2.6 ข้อดีของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Advantages of supercapacitors)	7
2.7 ข้อเสียของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Disadvantages of supercapacitors).....	8

2.8 การประยุกต์ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Application of supercapacitor)	9
2.9 ชีวมวล (Biomass)	10
2.10 ประโยชน์และความสำคัญของชีวมวล (Benefits and Importance of Biomass)	14
2.11 ยางพารา (Para rubber tree).....	14
2.12 กระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis).....	15
2.13 กระบวนการสลายตัวทางความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท.....	16
2.14 ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis)	17
2.15 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization).....	19
2.16 ปัจจัยและตัวแปร ของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน.....	19
2.17 กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน	20
2.18 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon).....	21
2.19 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)	23
2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	27
3.1 สารตั้งต้น, สารเคมี และอุปกรณ์.....	27
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์	28
3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์.....	30
3.4 การประจุไฟฟ้า.....	31
3.5 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	32
3.6 การประกอบเซลล์ไฟฟ้าต้นแบบ (Prototype coin cell).....	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	34
4.1 ผลตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD.....	34
4.2 ผลตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM.....	35

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค CV EIS และ GCD	36
4.4 เปรียบเทียบผลการศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค CV อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ	43
4.5 การประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้า.....	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	47
5.1 ลักษณะโครงสร้างผลึก (XRD).....	47
5.2 ลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM).....	47
5.3 สมบัติทางเคมีไฟฟ้า	47
5.4 การประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้า.....	48
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ประวัติผู้เขียน	59

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4-1 ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ($F \text{ g}^{-1}$) ที่อัตราสแกน 10 mV s^{-1} ที่ 1 และ 1,000 รอบ.....	44
ตารางที่ 4-2 สรุปค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ($F \text{ g}^{-1}$) ที่อัตราสแกน 10 mV s^{-1} ที่จำนวนรอบต่างๆ	45
ตารางที่ 5-1 ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุคาร์บอน จากชีวมวลชนิดต่างๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมา เปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้.....	49



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 ภาพความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานประเภทต่างๆ.....	4
ภาพที่ 2-2 การจำแนกประเภทของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	5
ภาพที่ 2-3 กลไกการกักเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดประเภทต่างๆ	5
ภาพที่ 2-4 โครงสร้างผนังเซลล์ฟิช.....	11
ภาพที่ 2-5 สูตรโครงสร้างของเซลล์ลูโลส.....	11
ภาพที่ 2-6 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลล์ลูโลส.....	12
ภาพที่ 2-7 สูตรโครงสร้างของลิทินิน.....	13
ภาพที่ 2-8 การแยกกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจากเฟสของน้ำ.....	19
ภาพที่ 2-9 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC.....	23
ภาพที่ 3-1 แผนภาพวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา	29
ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการเตรียมผงถ่านชาร์ จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา	30
ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการเตรียมผงถ่านกัมมันต์จาก วัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา.....	31
ภาพที่ 3-4 แผ่นนิกเกิลโพลีเมอร์ชุบไฟฟ้า (RE2, RE4, และ RE6) หลังอบแห้ง.....	31
ภาพที่ 3-5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ CR2032.....	32
ภาพที่ 3-6 ขั้นตอนในการประกอบเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 ต้นแบบ	33
ภาพที่ 4-1 รูปแบบ XRD ของวัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพารา.....	34
ภาพที่ 4-2 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่าง RE Pure (a) และ RE2 (b) ที่กำลังขยาย 3,000X.....	35
ภาพที่ 4-3 (a) เส้นโค้ง CV ตัวอย่างเซลล์ (RE2) (b) เส้นโค้ง CV ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C (c) เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C.....	38
ภาพที่ 4-4 กราฟ Nyquist ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C ก่อนศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้า.....	39

ภาพที่ 4-5 เปรียบเทียบกราฟ Nyquist ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C ก่อน และหลังทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่อง จำนวน 1,000 รอบ.....	40
ภาพที่ 4-6 กราฟเส้นโค้ง GCD ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C จำนวน 1 รอบ.....	41
ภาพที่ 4-7 กราฟเส้นโค้ง GCD ตัวอย่างเซลล์ (a) RE2 Cell#A, (b) RE2 Cell#B และ (c) RE2 Cell#C ก่อน และหลังทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) จำนวน 1,000 รอบ.....	43
ภาพที่ 4-8 เส้นโค้ง CV ของ (a) RE2 Cell#A, (b) RE2 Cell#B, (c) RE2 Cell#C (d) เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ก่อน และหลังทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) จำนวน 1,000 รอบ..	44
ภาพที่ 4-9 การทดสอบนำไปประยุกต์ใช้งานจริงของเซลล์ไฟฟ้า ในการเปิดหลอด LED ขนาด 3 (V)	46



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีเพิ่มมากขึ้นสำหรับใช้ในการขับเคลื่อนภารกิจต่างๆ เช่น ยานพาหนะไฟฟ้า, อุปกรณ์เคลื่อนที่ดิจิทัล, ไฟฟ้าสำรองในระบบโทรคมนาคม เป็นต้น เพื่อให้มีความต่อเนื่องโดยไม่หยุดชะงัด อุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำรองที่มีขนาดกะทัดรัด, มีความหนาแน่นพลังงานสูง, ต้นทุนต่ำ, สามารถใช้งานหมุนเวียนได้, และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่ต้องการอย่างมาก

การเพิ่มปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลกนำไปสู่ความจำเป็นต่อการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถกักเก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงที่พลังงานหมุนเวียนและพลังงานที่สามารถรวบรวมได้จากแหล่งที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และลม

การลดต้นทุนของเทคโนโลยีพลังงานทดแทนและการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานส่งผลให้เราสามารถใช้พลังงานที่มีต้นทุนต่ำได้

การลดการใช้พลังงานจากแหล่งที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการลดการใช้พลังงานที่ได้จากแหล่งที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญมาก

ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด (Supercapacitor) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีค่าความจุต่อน้ำหนัก (Specific capacitance) สูงและมีอายุการใช้งาน (Cycle life) ที่ยาวนานสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้หลายประเภท เช่น อุปกรณ์สำรองไฟในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ วัสดุที่ทำขั้วตัวเก็บประจุแบบกลุ่มวัสดุคาร์บอน เช่นกลุ่ม คาร์บอนจากแอคติเวทคาร์บอน (Activated carbon) ได้ค่าความจุประมาณ 113 F/g^{-1} (Taer et al., 2020) แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ที่ต้องการพลังงานสูงยัง ต้องการพัฒนาค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ที่สูงอยู่มาก จึงต้องศึกษาวัสดุที่ให้ค่าความจุสูงต่อไป

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ชนิดแรกคือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electric double-layer capacitors, EDLC) ที่ใช้คาร์บอนเป็นวัสดุขั้วไฟฟ้า ชนิดที่สองคือ ซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitors, PDC) ที่ใช้โลหะออกไซด์เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้า และชนิดที่สามคือ ไฮบริดคาปาซิเตอร์ (Hybrid capacitors) ที่เป็นการผสมระหว่าง EDLC และ PDC

คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon, AC) เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับใช้ เป็นขั้วไฟฟ้าของ EDLC เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง การนำไฟฟ้าค่อนข้างดีและมีเสถียรภาพทางเคมี

สูง (Li et al., 2010) การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ต้องผ่านขั้นตอนการเตรียม ได้แก่ การอบให้แห้ง จากนั้นนำมาทำให้เป็นถ่านชาร์ (Char) ขั้นตอนนี้เรียกว่าการคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) เป็นการไพโรไลซิสแบบหนึ่ง ก่อให้นำไปเข้าขั้นตอนการกระตุ้น ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีคือ การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ที่เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุด้วยการกระตุ้นโดยใช้สารเคมี วัสดุที่นำมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์จะเป็นชีวมวล ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการลดต้นทุนการผลิต แต่ยังมีชีวมวลเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นของคาร์บอนกัมมันต์สำหรับใช้เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าของ EDLC เช่น ต้นไผ่ (Chen et al., 2015) ถั่วเหลือง (Long et al., 2015) กะลามะพร้าว (Sun et al., 2013) ผักตบชวา (Zheng et al., 2017) ฯลฯ ดังนั้นจึงมีการค้นหาชีวมวลตั้งต้นชนิดใหม่ที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายในท้องถิ่น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากชีวมวล เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (N₂) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าสำหรับศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของตัวอย่าง ให้มีประสิทธิภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาศักยภาพการใช้วัสดุชีวมวล เป็นวัสดุอิเล็กโทรดสำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น, สัณฐานวิทยาของพื้นผิว, และโครงสร้างผลึก ของอิเล็กโทรดจากวัสดุชีวมวล
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเก็บและปล่อยประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด จากวัสดุชีวมวล

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล
- 1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น, สัณฐานวิทยาของพื้นผิว, และโครงสร้างผลึก ของอิเล็กโทรดจากวัสดุชีวมวล
- 1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติการเก็บและปล่อยประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด จากวัสดุชีวมวล

1.4 วิธีการวิจัย

- 1.4.1 ทบทวนวรรณกรรม และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากสิ่งตีพิมพ์ วารสาร บทความ
- 1.4.2 เก็บรวบรวมวัสดุชีวมวล และจัดเตรียมเครื่องมือในงานวิจัย
- 1.4.3 สังเคราะห์คาร์บอนจากวัสดุชีวมวล ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pre-carbonization pyrolysis) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300°C ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- 1.4.4 สังเคราะห์คาร์บอนจากวัสดุชีวมวล ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน (Hydrothermal carbonization) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
- 1.4.5 สังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (N₂) ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง
- 1.4.6 เตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล และประกอบขั้วไฟฟ้ากึ่งเซลล์ (Coin cell)
- 1.4.7 ศึกษาคุณสมบัติขั้วไฟฟ้าคาร์บอนกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล
- 1.4.8 สรุป และวิจารณ์ผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ของการวิจัย

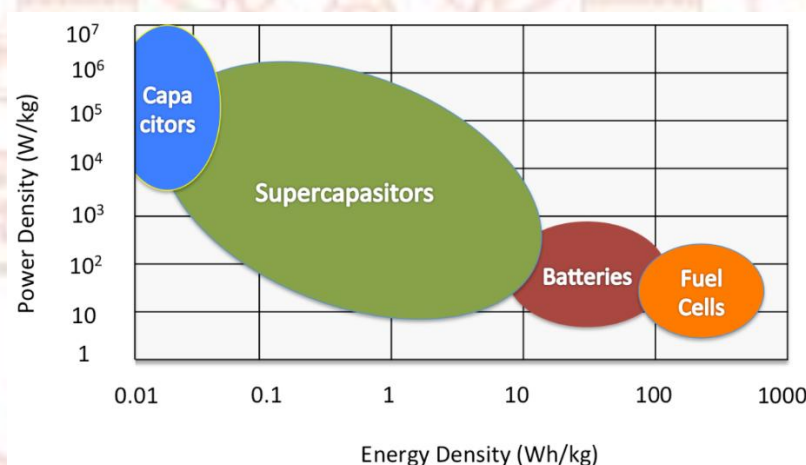
ทราบถึงวัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพ เป็นคาร์บอนกัมมันต์ทำเป็นอิเล็กโทรด สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ที่สามารถนำไปพัฒนาทำตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เพื่อตอบสนองความต้องการอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีต้นทุนต่ำ ใช้วัสดุที่หาได้ในประเทศ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors)

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าเคมีประเภทต่างๆ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors) ซึ่งเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานรูปแบบใหม่ ได้รับความสนใจอย่างใกล้ชิดจากสังคม เนื่องจากมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density) ที่โดดเด่น หลังจากการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงมาหลายทศวรรษ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในหลากหลายด้านของชีวิตจริง สะท้อนให้เห็นถึงคุณค่าทั้งในเชิงพาณิชย์และการใช้งานจริงที่สำคัญ ดังภาพที่ 2-1 เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และสามารถกักเก็บและปล่อยประจุได้ในทันที ทำให้กลายเป็นจุดสนใจในยุคพลังงานใหม่ (Electronics, 2023)

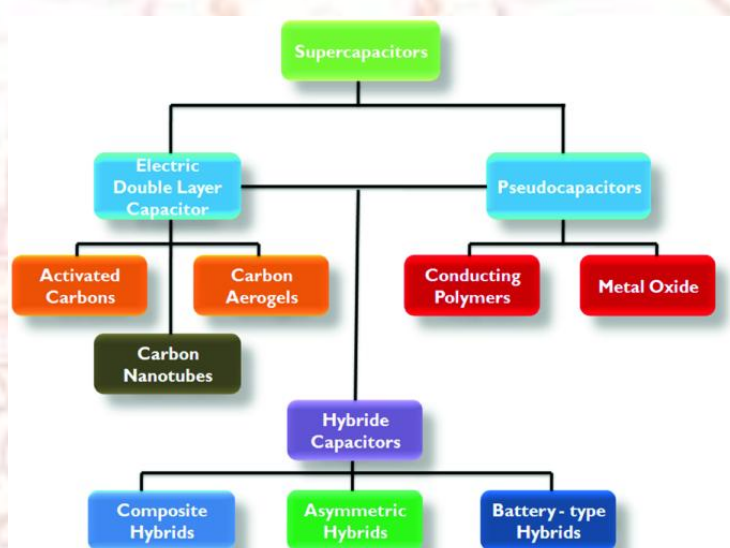


ภาพที่ 2-1 ภาพความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานประเภทต่างๆ (Yadav, 2020)

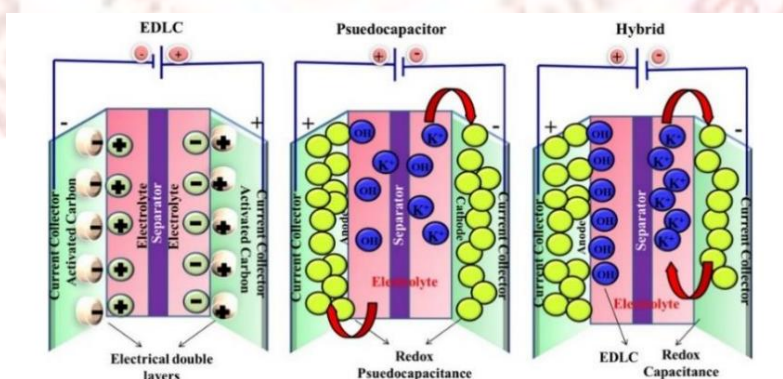
2.2 การจำแนกประเภทของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและกลไกการกักเก็บพลังงาน (Classification of supercapacitors and their energy storage mechanism)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า อิเล็กโทรไลต์ และแผ่นกั้น การจัดวางขั้วไฟฟ้าทั้งสองให้หันหน้าเข้าหากันสามารถลดระยะทางการเคลื่อนที่ของไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยให้วัสดุขั้วไฟฟ้าแสดงประสิทธิภาพได้อย่างเต็มที่ โดยมีแผ่นกั้น

คั่นกลางเพื่อป้องกันการลัดวงจรที่อาจเกิดจากการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ จากนั้นจึงแช่ในอิเล็กโทรไลต์ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของวัสดุขั้วไฟฟ้า ได้แก่ 1. ตัวเก็บประจุแบบสมมาตร (Symmetrical capacitors) และ 2. ตัวเก็บประจุแบบอสมมาตร (Asymmetrical capacitors) ดังภาพที่ 2-2 นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามกลไกการกักเก็บพลังงานได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electric double layer capacitors) 2. ซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitors) และ 3. ตัวเก็บประจุแบบผสม (Hybrid capacitors) ดังภาพที่ 2-3 (Electronics, 2023)



ภาพที่ 2-2 การจำแนกประเภทของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Tamilarasan et al., 2021)



ภาพที่ 2-3 กลไกการกักเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดประเภทต่างๆ (Electronics, 2023)

2.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electric double layer capacitors)

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นอาศัยหลักการกักเก็บพลังงานด้วยการสะสมของประจุที่บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างสนามไฟฟ้าภายนอกและการดูดซับทางกายภาพที่พื้นผิวขั้วไฟฟ้า โดยมีผลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบในอิเล็กโทรไลต์ ในระหว่างกระบวนการชาร์จ ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก ไอออนลบและไอออนบวกจะเคลื่อนที่แยกไปยังขั้วไฟฟ้าบวกและลบตามลำดับ และเกิดการจัดเรียงตัวอย่างมีทิศทางที่พื้นผิวขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ในช่วงการคายประจุ อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนบวกและลบ ทำให้ไอออนเคลื่อนที่กลับเข้าสู่อิเล็กโทรไลต์ จึงเป็นการสิ้นสุดวงจรการชาร์จและคายประจุทั้งหมด

กระบวนการกักเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นนี้เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของแรงทางกายภาพระหว่างประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ใช่แบบฟาราเดย์ ด้วยเหตุนี้ ในระหว่างกระบวนการชาร์จและคายประจุ วัสดุขั้วไฟฟ้าชั้นคู่จึงไม่เกิดการขยายตัวของปริมาตร ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับไม่ได้ หรือกระบวนการอื่นๆ จึงแสดงให้เห็นถึงความเสถียรในการใช้งานแบบวัฏจักรที่ยืดเยื้อ เช่น ในกรณีของวัสดุคาร์บอน อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของตัวเก็บประจุชนิดนี้คือมีความจุไฟฟ้าต่ำและยากที่จะได้รับความหนาแน่นพลังงานที่สูงขึ้น (Electronics, 2023)

2.4 ชูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitors)

ตัวเก็บประจุแบบชูโดคาปาซิเตอร์สามารถสร้างความจุที่สูงขึ้นผ่านกระบวนการดูดซับและคายซับแบบผันกลับได้ หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ที่พื้นผิวขั้วไฟฟ้า โดยวัสดุขั้วไฟฟ้าหลักที่ใช้ได้แก่ ออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน ไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าชั้นคู่ ตัวเก็บประจุแบบชูโดคาปาซิเตอร์มีความหนาแน่นพลังงานที่สูงกว่า แต่มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่า สาเหตุหลักเนื่องมาจากวัสดุเหล่านี้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำ และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าในระหว่างปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเมื่อเทียบกับกระบวนการทางกายภาพล้วนๆ ซึ่งไม่สามารถเทียบเท่ากับกระบวนการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของอิเล็กตรอนในวงจรรภายนอก

นอกจากนี้ ปฏิกิริยารีดอกซ์ ยังมาพร้อมกับการแทรกตัวเข้า/ออกของไอออน ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของปริมาตรและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำงานแบบวัฏจักรที่ค่อนข้างต่ำ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของออกไซด์ที่มีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกลาง กระบวนการแทรกตัวเข้าและออกของไอออนทำให้วัสดุขั้วไฟฟ้าเกิดการขยายตัวและแตกหัก ไม่สามารถรักษารูปร่างระดับจุลภาคดั้งเดิมไว้ได้ ส่งผลให้เกิดการเสื่อมของความจุ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง การลดลงอย่างต่อเนื่องของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของวัสดุนำไปสู่ประสิทธิภาพการทำงานแบบวัฏจักรที่ไม่ดี (Electronics, 2023)

2.5 ตัวเก็บประจุแบบผสม (Hybrid capacitors)

ตัวเก็บประจุแบบผสมเป็นการรวมข้อดีของตัวเก็บประจุแบบซูโดคาปาซิเตอร์ และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นเข้าด้วยกัน เพื่อขับเคลื่อนประสิทธิภาพของอุปกรณ์เคมีไฟฟ้า การเพิ่มช่วงแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งระบบสามารถปรับปรุงความหนาแน่นพลังงานของอุปกรณ์ทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงใช้ประโยชน์จากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันของวัสดุแต่ละชนิด โดยใช้วัสดุขั้วไฟฟ้าแบบซูโดคาปาซิเตอร์ และวัสดุขั้วไฟฟ้าแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นเป็นขั้วบวกและขั้วลบตามลำดับ เพื่อขยายช่วงแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งระบบ ทำให้ได้ความหนาแน่นพลังงานที่สูงขึ้น และทำให้อุปกรณ์เคมีไฟฟ้าทั้งระบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของตัวเก็บประจุแบบผสมนี้คือ เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของวัสดุทั้งสองชนิดไม่สอดคล้องกับอัตราการเคลื่อนที่ของไอออน ทำให้ไม่สามารถใช้ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าของวัสดุขั้วไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้มีความจุต่ำและความเสถียรในการทำงานแบบวัฏจักรที่ไม่ดี (Electronics, 2023)

2.6 ข้อดีของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Advantages of supercapacitors)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือที่เรียกอีกชื่อว่าอัลตราคาปาซิเตอร์ เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเคมีไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่แบบดั้งเดิม ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดดังนี้ (Electronics, 2023)

2.6.1 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่สูงมาก สามารถให้กำลังไฟฟ้าได้หลายพันวัตต์ต่อกิโลกรัม ซึ่งหมายความว่าสามารถกักเก็บและปล่อยพลังงานปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงชั่วขณะหรือการชาร์จและคายประจุที่มีความถี่สูง เช่น การเก็บพลังงานจากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน UPS เป็นต้น

2.6.2 อายุการใช้งานยาวนาน:

เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดเก็บประจุระหว่างวัสดุขั้วไฟฟ้าแทนการใช้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า จึงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่เคมีแบบดั้งเดิม โดยสามารถทำการชาร์จและคายประจุได้หลายแสนรอบ ซึ่งหมายความว่าสามารถรักษาประสิทธิภาพการทำงานที่เสถียรได้ในระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนาน

2.6.3 ประสิทธิภาพสูง:

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดสูงถึงกว่า 95% ซึ่งหมายความว่าสามารถกักเก็บและปล่อยพลังงานปริมาณมากในเวลาอันสั้นโดยมีการสูญเสียพลังงานจากการแปลง

พลังงานที่ต่ำ และมีการปรับตัวที่ดีต่ออุณหภูมิสูงและต่ำ โดยประสิทธิภาพจะไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำมาก ตัวเก็บประจุยิ่งยวดยังคงสามารถทำงานได้ตามปกติ

2.6.4 เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดไม่มีส่วนประกอบของสารพิษ เช่น โลหะหนัก และไม่ก่อให้เกิดของเสียที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างการใช้งาน

2.6.5 ความน่าเชื่อถือสูง:

เนื่องจากไม่ต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมีในการเก็บประจุ จึงไม่เกิดปัญหาเช่น การบวมของแบตเตอรี่ หรือการเพิ่มขึ้นของความต้านทานภายในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีระบบป้องกันการชาร์จและคายประจุเกิน ซึ่งช่วยรับประกันความปลอดภัยในการใช้งาน

2.6.6 ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา:

โครงสร้างของตัวเก็บประจุยิ่งยวดค่อนข้างเรียบง่าย และใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและบาง ทำให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่ชัดเจนในการใช้งานที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่หรือต้องการน้ำหนักเบา

2.7 ข้อเสียของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Disadvantages of supercapacitors)

เมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ทั่วไป ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง อายุการใช้งานยาวนาน ความต้านทานภายในต่ำ การชาร์จและคายประจุที่รวดเร็ว เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บประจุยิ่งยวดก็มีข้อเสียบางประการ ดังนี้ (Electronics, 2023)

2.7.1 ความหนาแน่นพลังงานต่ำ:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความหนาแน่นพลังงานค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปมีค่าเพียงเศษส่วนถึงไม่กี่ส่วนสิบของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ซึ่งหมายความว่ามีความสามารถในการกักเก็บพลังงานที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดอาจไม่ใช่ตัวเลือกที่ดีที่สุดในการใช้งานบางประเภท เช่น งานที่ต้องการการกักเก็บพลังงานเป็นระยะเวลานาน

2.7.2 ปัญหาด้านความน่าเชื่อถือ:

เนื่องจากวัสดุขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมักต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูง อายุการใช้งานอาจได้รับผลกระทบ ในสภาพแวดล้อมที่มีความดันและอุณหภูมิสูง วัสดุขั้วไฟฟ้าอาจเกิดการออกซิเดชัน การกัดกร่อน หรือความเสียหาย ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดลดลง

2.7.3 การพึ่งพาอุณหภูมิ:

ค่าความจุไฟฟ้าและความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมักได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดอาจลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือและความเสถียรในการใช้งานบางประเภท

2.7.4 ต้นทุนสูง:

เนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุขั้วไฟฟ้าและการออกแบบโครงสร้างของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง ซึ่งหมายความว่าในการใช้งานบางประเภท ตัวเก็บประจุยิ่งยวดอาจไม่ใช่ตัวเลือกที่คุ้มค่าที่สุดในแง่ของต้นทุน

2.8 การประยุกต์ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Application of supercapacitor)

เนื่องจากคุณสมบัติด้านความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง อายุการใช้งานยาวนาน และประสิทธิภาพสูง ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในด้านต่างๆ ดังนี้ (Electronics, 2023)

2.8.1 การกักเก็บและจัดการพลังงาน:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถใช้เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบฉับพลัน และถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในสถานการณ์ที่ต้องการการปล่อยพลังงานปริมาณมากอย่างรวดเร็ว เช่น การเก็บพลังงานจากการเบรกของยานยนต์ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉินของ UPS การกักเก็บพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และลม เป็นต้น

2.8.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองหรือแหล่งจ่ายไฟหลักสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไฟสำรองสำหรับแผงวงจรหลักของคอมพิวเตอร์ แหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบไฟ LED และการกักเก็บพลังงานสำหรับอุปกรณ์พกพา

2.8.3 การส่งกำลังและการสื่อสาร:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถปล่อยและดูดซับพลังงานไฟฟ้าปริมาณมากในระยะเวลาสั้น จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในด้านการส่งกำลังและการสื่อสาร เช่น ระบบกักเก็บพลังงานสำหรับสถานีชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานจากการเบรกของรถไฟฟ้าใต้ดิน รถไฟ และรถราง ระบบไฟฟ้าสำรองแบบ UPS สำหรับสถานีฐานโทรคมนาคม เป็นต้น

2.8.4 ด้านอวกาศ:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดถูกนำมาใช้ในด้านอวกาศมากขึ้นเรื่อยๆ เช่น แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องบิน แหล่งพลังงานสำหรับเครื่องบินไฟฟ้า และการจัดการพลังงานของดาวเทียม

2.8.5 อุปกรณ์ทางการแพทย์:

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถให้ทางเลือกในการกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพ น่าเชื่อถือ และอายุการใช้งานยาวนาน จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น เครื่องกระตุ้นหัวใจ อวัยวะเทียม เป็นต้น

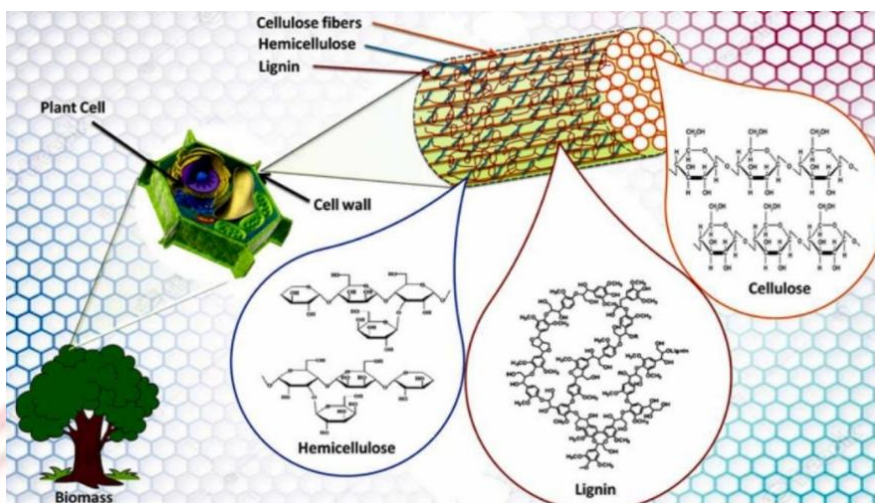
2.9 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล หมายถึง เศษวัสดุทางการเกษตร โดยแบ่งออกเป็นชีวมวลที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และชีวมวลที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เพาะปลูก ดังนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563)

2.9.1 ชีวมวลที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร อาทิเช่น กากอ้อยจากอุตสาหกรรมน้ำตาล แกลบจากโรงสีข้าว ใบปาล์มและทะลายปาล์มเปล่าที่ได้จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดิบ เป็นต้น ชีวมวลเหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานหรือจำหน่ายเป็นเชื้อเพลิงแล้วเกือบทั้งหมด เช่น กากอ้อยถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าและไอน้ำ ในอุตสาหกรรมน้ำตาลหรือแกลบที่เกิดขึ้นในโรงสีข้าวขนาดใหญ่ถูกจำหน่ายให้โรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

2.9.2 ชีวมวลที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่เพาะปลูก จะเกิดจากชีวมวลส่วนที่เหลืออยู่หลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตของเกษตรกร ได้แก่ เหมืองมันสำปะหลัง ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย ตอและรากไม้ยางพารา เป็นต้น ชีวมวลเหล่านี้ไม่นิยมนำมาผลิตพลังงานเนื่องจากมีต้นทุนสูงในการรวบรวมและขนส่งจากพื้นที่เพาะปลูกไปยังสถานที่ใช้งานที่อยู่ห่างไกล ชีวมวลเหล่านี้จึงมักถูกทิ้งไว้ในพื้นที่เพาะปลูกเพื่อให้ย่อยสลายกลายเป็นสารปรับปรุงดิน หรือถูกเผาทำลายในพื้นที่เพาะปลูก

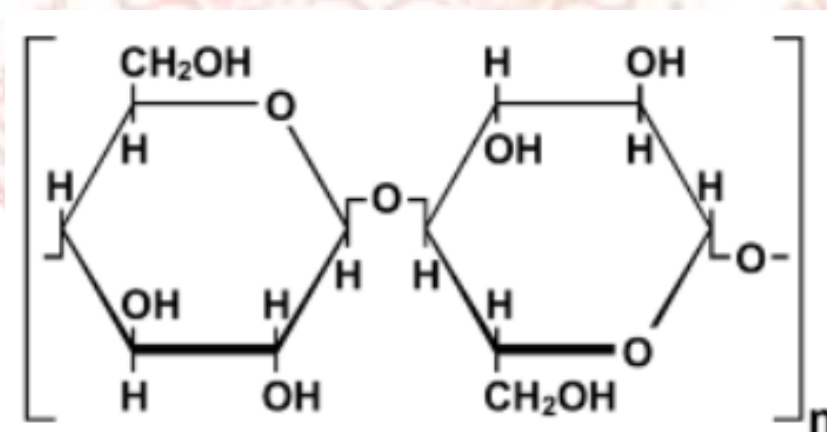
ชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ที่สำคัญ เนื่องจากสามารถผลิตขึ้นใหม่ได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน โดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ของพืช ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานเคมีและสะสมไว้ในรูปของคาร์โบไฮเดรต (McKendry, 2002)



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างผนังเซลล์พืช (Marakana et al., 2021)

2.9.3 เซลลูโลส (Cellulose)

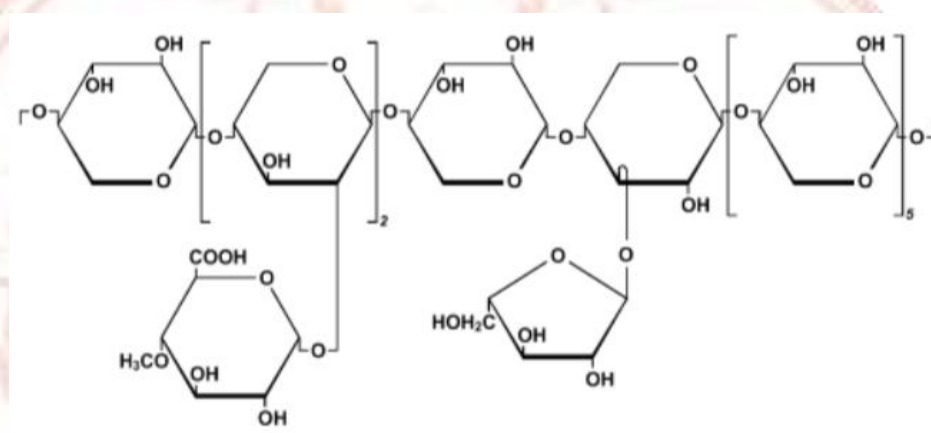
เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic เป็นสายยาว มีโครงสร้างเป็นเส้นใยที่แข็งแรง ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช (Ding et al., 2012) เซลลูโลสมีความสำคัญในการผลิตพลังงานชีวมวล เนื่องจากสามารถย่อยสลายเป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอลได้ (Sun et al., 2016) เซลลูโลส มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 สูตรโครงสร้างของเซลลูโลส (Kögel-Knabner, 2002)

2.9.4 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

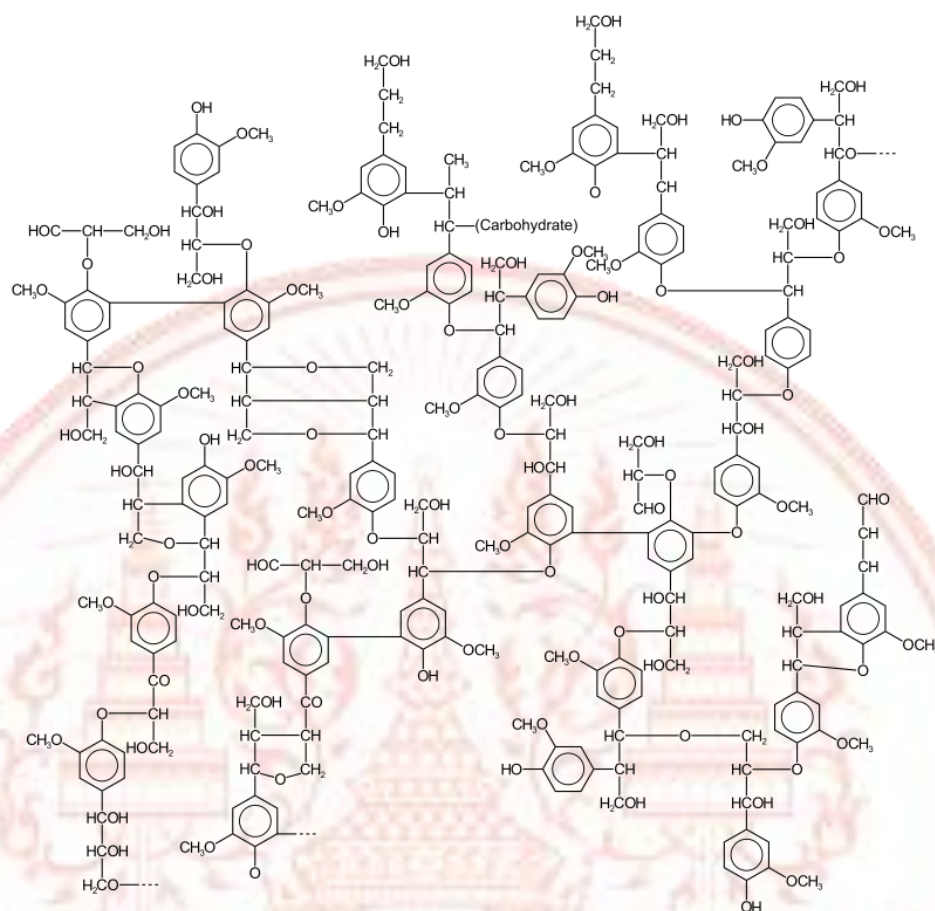
เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนกว่าเซลลูโลส ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด เช่น ไซโลส กลูโคส แมนโนส กาแล็กโตส และอะราบินอส มีโครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขา ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน (Scheller & Ulvskov, 2010) เฮมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และมีบทบาทสำคัญในการผลิตไบโอเอทานอลรุ่นที่สอง (Second-generation bioethanol) จากวัสดุลิกโนเซลลูโลส (Alvira et al., 2010) เฮมิเซลลูโลส มีโครงสร้างดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 สูตรโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Kögel-Knabner, 2002)

2.9.5 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างซับซ้อนและแข็งแรง ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์พืชและป้องกันการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ (Boerjan et al., 2003) ลิกนินมีค่าความร้อนสูงกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จึงมีความสำคัญในกระบวนการเผาไหม้และการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ อย่างไรก็ตาม ลิกนินเป็นอุปสรรคต่อการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในกระบวนการผลิตเอทานอล จึงต้องมีการปรับสภาพวัสดุ (Pretreatment) เพื่อกำจัดลิกนินออกก่อน (Haghighi Mood et al., 2013) ลิกนิน มีโครงสร้างดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 สูตรโครงสร้างของลิกนิน (Kögel-Knabner, 2002)

นอกจากองค์ประกอบหลักทั้งสามชนิดนี้แล้ว ชีวมวลยังประกอบด้วยสารอื่นๆ ในปริมาณที่น้อยกว่า ได้แก่

2.9.6 โปรตีน (Proteins)

โปรตีนพบได้ในชีวมวลจากพืชและสัตว์ โดยเฉพาะในเมล็ดพืชและของเสียจากปศุสัตว์ โปรตีนมีความสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) เนื่องจากให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูง (Kayhanian, 1999)

2.9.7 ไขมัน (Lipids)

ไขมันพบได้ในปริมาณที่แตกต่างกันในชีวมวลแต่ละชนิด โดยเฉพาะในเมล็ดพืชน้ำมัน ไขมันมีความสำคัญในการผลิตไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) (Leung et al., 2010)

2.9.8 แร่ธาตุ (Minerals)

แร่ธาตุต่างๆ เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และซิลิกา พบได้ในชีวมวลในรูปของเถ้า (Ash) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการเผาไหม้และการเกิดตะกรันในหม้อไอน้ำ (Vassilev et al., 2010)

การทราบองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกวิธีการแปรรูปที่เหมาะสมและการออกแบบกระบวนการผลิตพลังงานที่มีประสิทธิภาพ (McKendry, 2002)

2.10 ประโยชน์และความสำคัญของชีวมวล (Benefits and Importance of Biomass)

ชีวมวลมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาพลังงานทดแทนและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนี้

2.10.1 เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน ชีวมวลสามารถผลิตขึ้นใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง ช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล (Berndes et al., 2003)

2.10.2 ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้ชีวมวลเป็นพลังงานช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิ เนื่องจากคาร์บอนที่ปล่อยออกมาจะถูกนำกลับไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืชใหม่ (Cherubini et al., 2009)

2.10.3 สร้างความมั่นคงทางพลังงาน การพัฒนาพลังงานชีวมวลช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และเพิ่มความหลากหลายของแหล่งพลังงาน (Goldemberg & Teixeira Coelho, 2004)

2.10.4 สร้างรายได้ให้กับเกษตรกร การใช้ประโยชน์จากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มและรายได้ให้กับเกษตรกร (Thornley et al., 2013)

2.10.5 ลดปัญหาการจัดการของเสีย การนำของเสียอินทรีย์มาใช้เป็นพลังงานช่วยลดปริมาณขยะและมลพิษจากการกำจัดของเสีย (Hämäläinen et al., 2011)

2.11 ยางพารา (Para rubber tree)

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific name) *Hevea brasiliensis*

ชื่อวงศ์ (Family name) Euphorbiaceae

ชื่อสามัญ (Common name) ยางพารา

ชื่ออื่นๆ (Other names) ยางบราซิล (Brazilian rubber tree), ยางแพร่ (Pará rubber tree)

2.11.1 ถิ่นกำเนิด (Origin) ยางพารามีถิ่นกำเนิดในกลุ่มแม่น้ำอเมซอน ประเทศบราซิล (Bauklwill, 1989) ก่อนที่จะถูกนำมาปลูกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะในประเทศไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย

2.11.2 ประวัติและข้อมูลทั่วไป (History and general information) ยางพาราถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกในปี พ.ศ. 2442 โดยพระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ที่จังหวัดตรัง ปัจจุบันไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางพาราอันดับหนึ่งของโลก โดยมีพื้นที่ปลูกกว่า 22 ล้านไร่ (การยางแห่งประเทศไทย, 2560)

2.11.3 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ (Botanical characteristics) ยางพาราเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางถึงใหญ่ สูง 20-30 เมตร ใบเป็นใบประกอบแบบสามใบ ดอกแยกเพศอยู่บนต้นเดียวกัน ผลเป็นแบบแคปซูล มี 3 พู แต่ละพูมีเมล็ด 1 เมล็ด เปลือกกลูยางพาราเป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดยางพารา มีลักษณะแข็ง สีน้ำตาลเข้ม (Jitladda & Porntip, 2012)

2.11.4 ชนิด (Types) มีสายพันธุ์ยางพาราที่นิยมปลูกในประเทศไทยหลายสายพันธุ์ เช่น RRIM 600, RRIT 251, PB 235, และ BPM 24 (สถาบันวิจัยยาง, 2564) แต่ละสายพันธุ์มีลักษณะของเปลือกกลูยางพาราที่แตกต่างกันเล็กน้อย

2.11.5 การใช้ประโยชน์ (Utilization) เปลือกกลูยางพาราเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมยางพาราที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ประโยชน์ดังนี้ (Onoji et al., 2016)

2.11.5.1 การผลิตพลังงานทดแทน เปลือกกลูยางพารามีค่าความร้อนสูง สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ (Ramadhas et al., 2005)

2.11.5.2 วัสดุดูดซับ เปลือกกลูยางพาราสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำเสีย (Deshon Kaman et al., 2017)

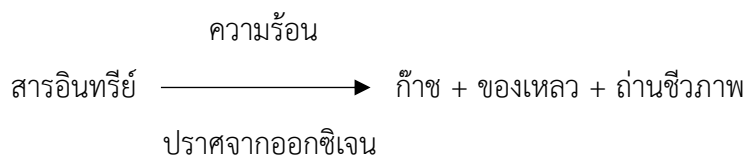
2.11.5.3 วัสดุทดแทนไม้ สามารถนำมาผลิตเป็นแผ่นขึ้นไม้อัด (Particleboard) ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดี (Febrianto et al., 2012)

2.11.5.4 ส่วนผสมในคอนกรีต การใช้เปลือกกลูยางพาราเป็นวัสดุผสมในคอนกรีตช่วยเพิ่มความแข็งแรงและลดน้ำหนักของคอนกรีต (Azunna, 2019)

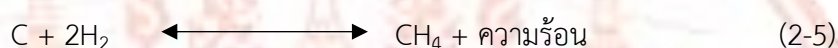
2.12 กระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส คือ กระบวนการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน เป็นปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้นก่อนกระบวนการเผาไหม้และแก๊สซิฟิเคชัน โดยเกิดขึ้นตามธรรมชาติในช่วงแรก ที่อุณหภูมิประมาณ 300-1,000°C ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ทำให้เกิดการแตกตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวลที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Yang et al., 2007) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส จะเป็นดังต่อไปนี้

ปฏิกิริยาพื้นฐาน



ปฏิกิริยารอง



2.13 กระบวนการสลายตัวทางความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.13.1 การไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)

- 1) อัตราการให้ความร้อน: ต่ำ ($0.1-1^\circ\text{C/s}$)
- 2) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา: นาน (หลายนาที่ถึงหลายชั่วโมง)
- 3) อุณหภูมิ: $300-650^\circ\text{C}$
- 4) ผลิตภัณฑ์หลัก: ของแข็ง (Solid) หรือ ถ่าน (Char) ประมาณ 35-40% โดยน้ำหนัก

2.13.2 การไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) (Bridgwater, 2012)

- 1) อัตราการให้ความร้อน: สูง ($10-200^\circ\text{C/s}$)
- 2) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา: สั้น (1-2 วินาที)
- 3) อุณหภูมิ: $450-550^\circ\text{C}$
- 4) ผลิตภัณฑ์หลัก: ของเหลว (Liquid) หรือ น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ประมาณ 60-75% โดยน้ำหนัก

2.13.3 การไพโรไลซิสแบบฉับพลัน (Flash pyrolysis)

- 1) อัตราการให้ความร้อน: สูงมาก ($>1000^\circ\text{C/s}$)
- 2) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา: สั้นมาก (<0.5 วินาที)
- 3) อุณหภูมิ: $800-1000^\circ\text{C}$
- 4) ผลิตภัณฑ์หลัก: แก๊ส (Gas) หรือ ซินแก๊ส (Syngas) ประมาณ 70-80% โดยน้ำหนัก

2.14 ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis)

2.14.1 อุณหภูมิ

- 1) มีผลต่อการแตกตัวของโมเลกุลและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น
- 2) อุณหภูมิต่ำ (<400°C) ส่งเสริมการเกิดถ่าน
- 3) อุณหภูมิปานกลาง (400-550°C) ส่งเสริมการเกิดน้ำมันชีวภาพ
- 4) อุณหภูมิสูง (>550°C) ส่งเสริมการเกิดแก๊ส
- 5) การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลเล็กลง
- 6) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500°C จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวทางความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทำให้ได้แก๊สมากขึ้น

2.14.2 อัตราการให้ความร้อน

- 1) มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์
- 2) อัตราการให้ความร้อนต่ำส่งเสริมการเกิดถ่าน
- 3) อัตราการให้ความร้อนสูงส่งเสริมการเกิดของเหลวและแก๊ส
- 4) การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary reactions) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น
- 5) อัตราการให้ความร้อนสูงจะช่วยลดการเกิดถ่าน เนื่องจากไม่มีเวลาเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของคาร์บอน
- 6) การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วยังช่วยให้เกิดการระเหยของสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น ทำให้ได้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงขึ้น

2.14.3 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

- 1) มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary reactions)
- 2) ระยะเวลาสั้นจะลดโอกาสการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง
- 3) ระยะเวลาสั้นจะส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลเล็กลงและความซับซ้อนมากขึ้น
- 4) ระยะเวลาสั้นจะช่วยรักษาโครงสร้างของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น น้ำตาลและสารประกอบฟีนอลิก
- 5) ระยะเวลาสั้นจะส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ เช่น การรวมตัวของสารประกอบฟีนอลิกเป็นถ่าน

2.14.4 ชนิดของวัตถุดิบ

- 1) องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบมีผลต่อชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- 2) วัตถุดิบที่มีเซลลูโลสสูงจะให้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพมากกว่า
- 3) วัตถุดิบที่มีลิกนินสูงจะให้ผลผลิตถ่านมากกว่า
- 4) ปริมาณความชื้นในวัตถุดิบมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะน้ำมันชีวภาพ
- 5) วัตถุดิบที่มีเซลลูโลสสูง เช่น ฟางข้าว จะให้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูง
- 6) วัตถุดิบที่มีลิกนินสูง เช่น เปลือกไม้ จะให้ผลผลิตถ่านสูง
- 7) วัตถุดิบที่มีแร่ธาตุสูง เช่น เปลือกข้าว จะส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ ทำให้ได้ผลผลิตแก๊สสูงขึ้น

2.14.5 ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

- 1) มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร
- 2) อนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ดีและรวดเร็ว
- 3) อนุภาคขนาดใหญ่จะมีความต้านทานการถ่ายเทความร้อนสูง ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอนุภาค ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย
- 4) อนุภาคขนาดเล็กจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอ
- 5) อนุภาคขนาดใหญ่อาจทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอนุภาค ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายในอนุภาคเดียวกัน

2.14.6 ความดัน

- 1) ความดันต่ำจะส่งเสริมการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอและแก๊ส
- 2) ความดันสูงจะส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น

2.14.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา

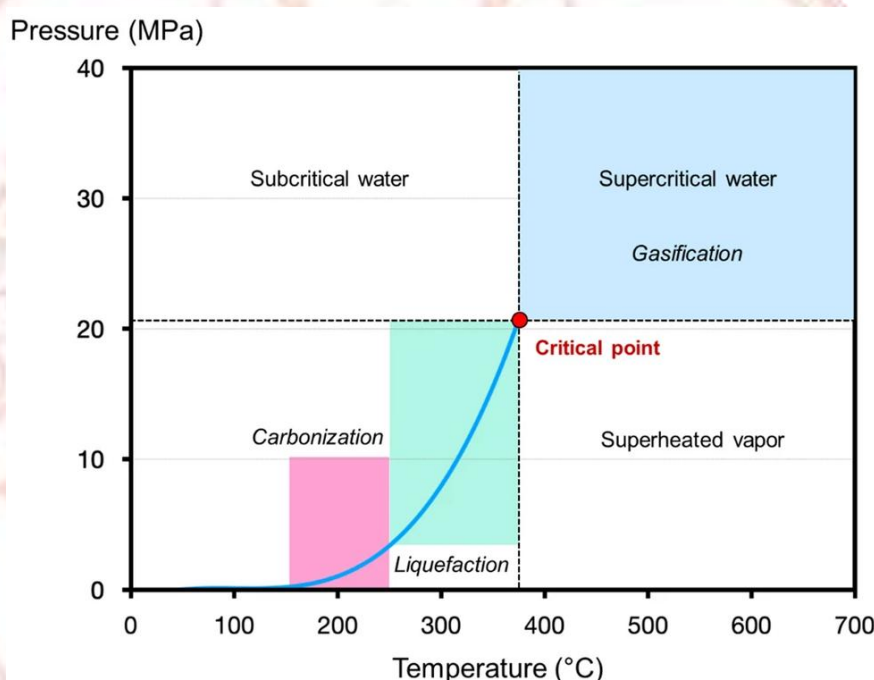
- 1) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเปลี่ยนแปลงกลไกการเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้

- 2) เร่งปฏิกิริยาบางชนิดสามารถเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น การใช้ซีโอไลต์ (Zeolite) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ

การควบคุมปัจจัยเหล่านี้อย่างเหมาะสมจะช่วยให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังช่วยในการออกแบบกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับวัตถุดิบแต่ละชนิด (Yang et al., 2007)

2.15 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (Hydrothermal carbonization)

เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลโดยอาศัยปฏิกิริยาความร้อนที่มีน้ำเป็นตัวกลาง ดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิในช่วง 180-300 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 20-25 บาร์ เป็นระยะเวลา 1-7 ชั่วโมง กระบวนการนี้เกิดขึ้นในช่วงที่น้ำมีสถานะอยู่ระหว่างสภาวะใต้จุดวิกฤต (Subcritical Water) จนถึงสภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Water) ดังภาพที่ 2-8 ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือถ่านไฮโดร (Hydrochar) ซึ่งปรากฏในรูปของสารแขวนลอยที่มีลักษณะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว (Slurry) อันเกิดจากการผสมกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลว



ภาพที่ 2-8 การแยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจากเฟสของน้ำ (Khandelwal et al., 2024)

2.16 ปัจจัยและตัวแปร ของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

2.16.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในกระบวนการ HTC เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาของ (Funke & Ziegler, 2010) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 180-350°C โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มปริมาณคาร์บอนและลดปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ การเพิ่มอุณหภูมิจะเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรและค่าความร้อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงชนิดของวัตถุดิบและการใช้พลังงานร่วมด้วย

2.16.2 เวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time)

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ การศึกษาของ (Libra et al., 2011) แสดงให้เห็นว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 1-72 ชั่วโมง โดย (Sevilla & Fuertes, 2009) พบว่าการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นและการเกิดพอลิเมอร์ ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแข็งแรงและมีความเป็นรูพรุนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และการใช้พลังงานควบคู่กันไป

2.16.3 ความดัน (Pressure)

ความดันในระบบ HTC เป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ Kruse et al. (2013) อธิบายว่าความดันที่เกิดขึ้นเองในระบบ (Autogenous Pressure) มักอยู่ในช่วง 10-40 บาร์ ซึ่งมีผลต่อการละลายของสารอินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาเคมี การศึกษาของ (Titirici, 2007) แสดงให้เห็นว่าความดันที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มการละลายของลิกนินและเซลลูโลส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลต่อสมบัติของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา

2.16.4 อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (Solid to Liquid Ratio)

อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อน อัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 1:5 ถึง 1:15 โดย (Khan et al., 2019) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนที่สม่ำเสมอ และเพิ่มโอกาสการสัมผัสระหว่างวัตถุดิบกับน้ำร้อน ซึ่งส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.16.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Sevilla & Fuertes, 2009) พบว่าสภาวะที่เป็นกรดช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดย (Funke & Ziegler, 2010) อธิบายว่า pH ที่ต่ำกว่า 7 จะช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นและการเกิดพอลิเมอร์ ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและมีโครงสร้างที่เสถียร

2.17 กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวข้องของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน

2.17.1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

เป็นปฏิกิริยาขั้นแรกที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 180-200°C โดยน้ำจะทำลายพันธะไกลโคไซด์ในเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส ไซโลส และฟรุคโทส (Funke & Ziegler, 2010)

2.17.2 ดีไฮเดรชัน (Dehydration)

เป็นการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุลของน้ำตาล ทำให้เกิดสารประกอบฟิวรานและอนุพันธ์ เช่น 5-HMF และ furfural ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับปฏิกิริยาต่อไป โดยเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 200-260°C

2.17.3 ดีคาร์บอซซิเลชัน (Decarboxylation)

เป็นการสูญเสียหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ในรูปของ CO₂ จากสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาก่อนหน้า ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก

2.17.4 อะโรมาติเซชัน (Aromatization)

เป็นการเกิดวงแหวนอะโรมาติกจากสารประกอบที่มีพันธะคู่ ทำให้เกิดโครงสร้างที่เสถียรและมีความเป็นขั้วต่ำ ส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติไฮโดรโฟบิกมากขึ้น

2.17.5 รีคอนเดนเซชัน (Re-condensation)

เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวของโมเลกุลขนาดเล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาก่อนหน้า ทำให้เกิดโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดโครงสร้างคาร์บอนแบบอสัณฐาน (Titirici, 2007)

2.18 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

2.18.1 ถ่านกัมมันต์

คือวัสดุคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพหรือเคมี ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากโดยสามารถผลิตได้จากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ่านไม้ กะลามะพร้าว หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การกระตุ้นทำได้ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง 800-1000°C หรือใช้สารเคมี เช่น H₃PO₄, KOH, ZnCl₂

2.18.2 โครงสร้างและสมบัติ

มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 500-3,000 m²/g มีรูพรุนแบ่งเป็น 3 ขนาด: ไมโครพอร์ (micropores), มีโซพอร์ (mesopores) และ แมโครพอร์ (macropores) โครงสร้างประกอบด้วยชั้นกราฟีนที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีหมู่ฟังก์ชันบนผิวที่หลากหลาย ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง

2.18.3 การประยุกต์ใช้งาน

ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย การกรองอากาศ การแยกก๊าซ และการฟอกสี ในทางการแพทย์ใช้ดูดซับสารพิษ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม การผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา และการกักเก็บพลังงาน

ถ่านกัมมันต์ สามารถแบ่งการกระตุ้นตามกลไกวิธีการกระตุ้นที่ใช้ แบ่งออกได้เป็น 2 วิธีการ คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี

2.18.4 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam Activation)

เป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากที่สุด โดยให้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 800-1000°C สัมผัสกับคาร์บอน ทำให้เกิดปฏิกิริยา $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ ส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดไมโครและเมโซพอร์ในโครงสร้าง การควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลามีผลต่อการพัฒนารูพรุน (González-García, 2018)

การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Activation)

ใช้ก๊าซ CO₂ ที่อุณหภูมิ 800-900°C เกิดปฏิกิริยา $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ ซึ่งช่วยพัฒนารูพรุนขนาดไมโครพอร์ได้ดี วิธีนี้มีข้อดีคือควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าการใช้ไอน้ำ และให้โครงสร้างรูพรุนที่สม่ำเสมอ

การกระตุ้นด้วยอากาศ (Air Activation)

ใช้ออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิ 300-500°C เกิดปฏิกิริยา $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ วิธีนี้มีต้นทุนต่ำแต่ควบคุมยาก เพราะปฏิกิริยาคายความร้อนสูงและอาจทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สม่ำเสมอ

2.18.5 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

หลักการและกระบวนการ

การกระตุ้นทางเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีในการเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยสารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ $ZnCl_2$, H_xPO_4 , KOH และ NaOH (González-García, 2018) สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อุณหภูมิ 400-800°C ทำให้เกิดการกัดกร่อนและสร้างรูพรุนขนาดต่างๆ

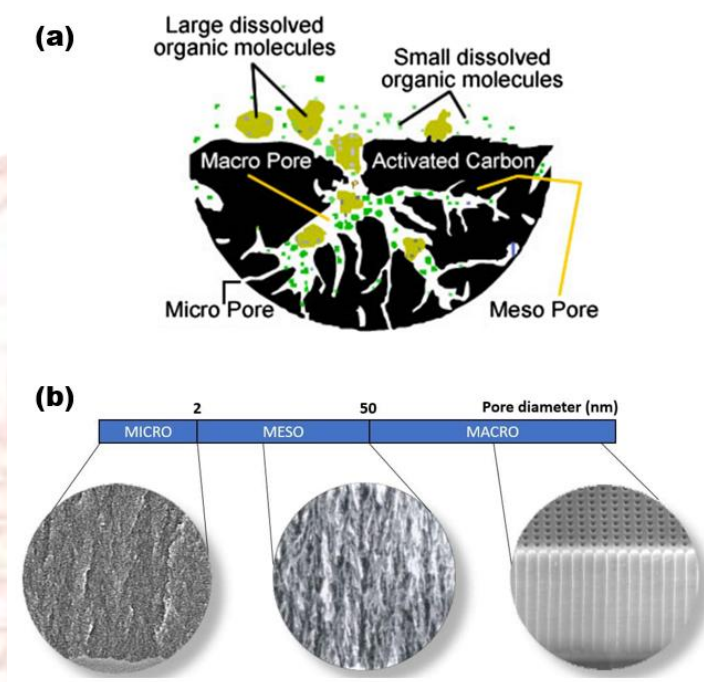
ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ

อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ และเวลาในการกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ การศึกษาของ (Wang & Kaskel, 2012) พบว่าการใช้ KOH ในอัตราส่วน 4:1 ที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 2,500 m²/g

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมี

เมื่อเทียบกับการกระตุ้นทางกายภาพ การกระตุ้นทางเคมีใช้อุณหภูมิต่ำกว่า ใช้เวลาน้อยกว่า และให้ผลผลิตสูงกว่า (Kumar & Jena, 2017) นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมขนาดรูพรุนได้ดีกว่าทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตามต้องการ

2.19 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)



ภาพที่ 2-9 การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC (a) (Berillo & Ermukhambetova, 2024) (b) (Atria, 2024)

การจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC เป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาและวิจัยวัสดุรูพรุน โดยระบบนี้ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงมาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถอธิบายลักษณะของรูพรุนได้อย่างครอบคลุมและแม่นยำ

รูพรุนขนาดจิ๋ว หรือ Micropores เป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กที่สุด โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร ในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น Ultramicropores ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.7 นาโนเมตร และ Supermicropores ที่มีขนาดระหว่าง 0.7 ถึง 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดจิ๋วนี้มีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากมีพลังงานการดูดซับสูง อันเป็นผลมาจากการที่ผนังของรูพรุนอยู่ใกล้กันมาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผนังรูพรุนทั้งสองด้าน ด้วยคุณสมบัตินี้ จึงทำให้วัสดุที่มีรูพรุนขนาดจิ๋วเป็นตัวเลือกที่ดีในการใช้เป็นตัวดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการดูดซับก๊าซ

รูพรุนขนาดกลาง หรือ Mesopores มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่มีความน่าสนใจเป็นพิเศษในแง่ของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในรูพรุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด Capillary condensation ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไอร่ะเหยเกิดการควบแน่นที่ความดันต่ำกว่าความดันไอที่สภาวะอิ่มตัว นอกจากนี้ ในรูพรุนขนาดกลางยังสามารถเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) ได้ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง และที่สำคัญคือการเกิด Hysteresis loop ในไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่สำคัญในการวิเคราะห์โครงสร้างของรูพรุน

รูพรุนขนาดใหญ่ หรือ Macropores มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งถือว่าเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในระบบการจำแนกนี้ แม้ว่ารูพรุนขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่ารูพรุนประเภทอื่น แต่ก็มีความสำคัญในการเป็นเส้นทางขนส่งโมเลกุลไปยังรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า ในรูพรุนขนาดนี้ การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นได้ง่าย และไม่พบการเกิด Capillary condensation เนื่องจากขนาดรูพรุนที่ใหญ่เกินไป

การวิเคราะห์ลักษณะของรูพรุนสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือการวัดการดูดซับ-คายซับก๊าซ (Gas adsorption-desorption) ซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุน สำหรับรูพรุนขนาดใหญ่มักใช้เทคนิค Mercury porosimetry ซึ่งอาศัยการแทรกซึมของปรอทภายใต้ความดันเข้าไปในรูพรุน นอกจากนี้ยังมีเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการกระเจิงรังสีเอกซ์มุมเล็ก (SAXS) ที่ช่วยให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและลักษณะของรูพรุน

ในการประยุกต์ใช้งาน วัสดุที่มีรูพรุนขนาดจิ๋วมักถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความสามารถในการดูดซับสูง เช่น การกำจัดสารปนเปื้อนขนาดเล็กในน้ำหรืออากาศ การแยกก๊าซ และการกักเก็บก๊าซ ส่วนวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลางมักถูกนำไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยา ระบบนำส่งยา และเซนเซอร์ทางเคมี ในขณะที่วัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่มักถูกใช้เป็นวัสดุกรองหรือเป็นโครงสร้างรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา

การเข้าใจระบบการจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐาน IUPAC นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและพัฒนาวัสดุรูพรุนให้เหมาะสมกับการใช้งานในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านสิ่งแวดล้อม การแพทย์ อุตสาหกรรมเคมี หรือการผลิตพลังงาน เนื่องจากขนาดของรูพรุนมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุในแต่ละการประยุกต์ใช้งาน

2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rashmi Manippady et al. (2023) ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนจากเห็ดป่าใช้เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และเผาที่อุณหภูมิ 700-1000°C วัสดุขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการกระตุ้นที่ 900 °C ตัวอย่าง (M3) มีโครงสร้างผสมระหว่างกราฟิตบางส่วนและอสัณฐาน แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดที่ 1,550 m²/g เมื่อนำไปประกอบเป็นถ่านกักเก็บประจุ ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้า พบว่า มีค่าความจุจำเพาะที่สูงที่สุด 247 F g⁻¹ มีค่าความหนาแน่นพลังงาน 35 Wh/kg และความหนาแน่นกำลัง 1.3 kW/kg สามารถทำงานได้ถึง 20,000 รอบ โดยค่าความจุลดลงประมาณ 30%

Husnul Hasanah (2020) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกักเก็บ (Activated Carbon) จากขยะใบชา โดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และเผาที่อุณหภูมิ 800°C ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ผลลัพธ์ที่ได้ถ่านกักเก็บที่มีพื้นที่ผิวเฉพาะสูงถึง 1,451.07 m²/g โดยอัตราส่วนระหว่างถ่านกักเก็บ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เหมาะสมที่สุดคือ 1:3 เมื่อนำถ่านกักเก็บมาใช้เป็นวัสดุสำหรับอิเล็กโทรดในตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitors) พบว่ามีค่าความจุเฉพาะสูงสุด 162.613 F g⁻¹ ในอิเล็กโทรไลต์ กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄)

Phachwisoot et al. (2023) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกักเก็บ (Activated Carbon) จากหัวมันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับอิเล็กโทรดในตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitors) โดยเปรียบเทียบการใช้วัตถุดิบจากหัวมันสำปะหลังดิบ (CRZ83) และหัวมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล คาร์บอนไอเซชัน (Hydrothermal Carbonization) (CRHZ83) ในสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง การสังเคราะห์ถ่านกักเก็บ (Activated Carbon) ใช้กระบวนการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) ที่อัตราส่วน 1:3 และเผาที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และคุณสมบัติทางเคมี และทางไฟฟ้าพบว่าถ่านกักเก็บผลิตจาก (CRZ83) มีคุณสมบัติที่เหมาะสมมากกว่าถ่านกักเก็บผลิตจากไฮโดรคาร์ (CRHZ83) โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,225 m²/g และปริมาตรรูพรุน 1.53 cm³/g ซึ่งสูงกว่า (CRHZ83) และศักยภาพทางไฟฟ้าของ (CRZ83) ในอิเล็กโทรไลต์ กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ มีค่าความจุเฉพาะ 123.0 F g⁻¹ ที่ความหนาแน่นกระแส 0.3 A/g

Pagketanang et al. (2015) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกักเก็บ (Activated Carbon) จากเปลือกเมล็ดยางพารา เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดในตัวเก็บประจุแบบชั้นคู่ไฟฟ้า (EDLCs) กระบวนการสังเคราะห์เริ่มจากการแช่เปลือกเมล็ดยางพาราในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 2%

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700-900°C ได้ผลลัพท์ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด 620 m²/g และมีปริมาณไมโครโพร (micropores) สูงถึง 93.31% และพบว่าอิเล็กโทรดตัวอย่าง AC900 เผาที่ 900°C มีค่าความจุเฉพาะสูงสุด 63.2 F g⁻¹ ที่อัตราสแกนเรท 1 mV/s⁻¹ แสดงถึงศักยภาพของเปลือกเมล็ดยางพาราในการใช้เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าในการผลิตอิเล็กโทรดสำหรับตัวเก็บประจุแบบชั้นคู่ไฟฟ้า (EDLCs)

Phainuphong et al. (2021) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) จากชีเลื่อยไม้ยางพารา ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารไปกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO₄) โดยการแช่ในสัดส่วน 10:10:5, 10:30:0 และ 10:30:5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผลลัพท์คาร์บอนกัมมันต์ในสัดส่วน 10:30:0 (สาร:KOH:KMnO₄) มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 1,574.39 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.3289-0.6405 cm³/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.63-1.75 nm คาร์บอนกัมมันต์ทั้งหมดแสดงคุณลักษณะเป็นของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous solids)

Mokti et al. (2021) ศึกษาการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดยางพารา โดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ในสารละลายไอออนิกชนิด Pyridinium [C₄Py][Tf₂N] และกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 500-800 °C ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ผลจากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ที่ 800 °C ตัวอย่าง (RSS-IL 800) มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 393.99 m²/g ปริมาตรรูพรุนรวม 0.206 cm³/g และปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.172 cm³/g สมรรถนะในการดูดซับ CO₂ ของตัวอย่าง (RSS-IL 800) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิควัดปริมาตรแบบสถิตที่อุณหภูมิ 25 °C และความดัน 1 บาร์ สามารถดูดซับ CO₂ ได้สูงสุดอยู่ที่ 2.436 mmol/g

Zhao et al. (2022) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) จากเปลือกมะพร้าว สำหรับใช้เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์อุณหภูมิกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และอัตราส่วน KOH/C ratio (x) พบว่าวัสดุขั้วไฟฟ้าที่ได้มีรูพรุนขนาด 4 nm และ 14 nm มีพื้นที่ผิวเฉพาะสูงสุดถึง 2143.6 m²/g และมีปริมาตรรูพรุนรวม 1.34 cm³/g ตัวอย่าง C5CK-800-2 มีค่าความจุเฉพาะสูงถึง 317 F g⁻¹ ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 A/g ประสิทธิภาพการเก็บประจุที่ 68% ที่ความหนาแน่นกระแส 20 A/g เมื่อประกอบเป็นตัวเก็บประจุแบบสมมาตรในอิเล็กโทรไลต์ KOH ความเข้มข้นที่ 6 โมลาร์ มีความหนาแน่นพลังงานสูงสุดที่ 13.5 Wh/kg มีความคงทนในการชาร์จและคายประจุ 10,000 รอบ โดยสามารถรักษาประสิทธิภาพไว้ได้ 99.7%

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จาก วัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา (RE2, RE4, และ RE6) ด้วยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง สัณฐานวิทยา และสมบัติทางเคมีไฟฟ้า โดยตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD, SEM, CV, GCD และ EIS พร้อมทั้งประกอบเซลล์ไฟฟ้าเป็นเซลล์แบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ต้นแบบสำหรับทดสอบการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

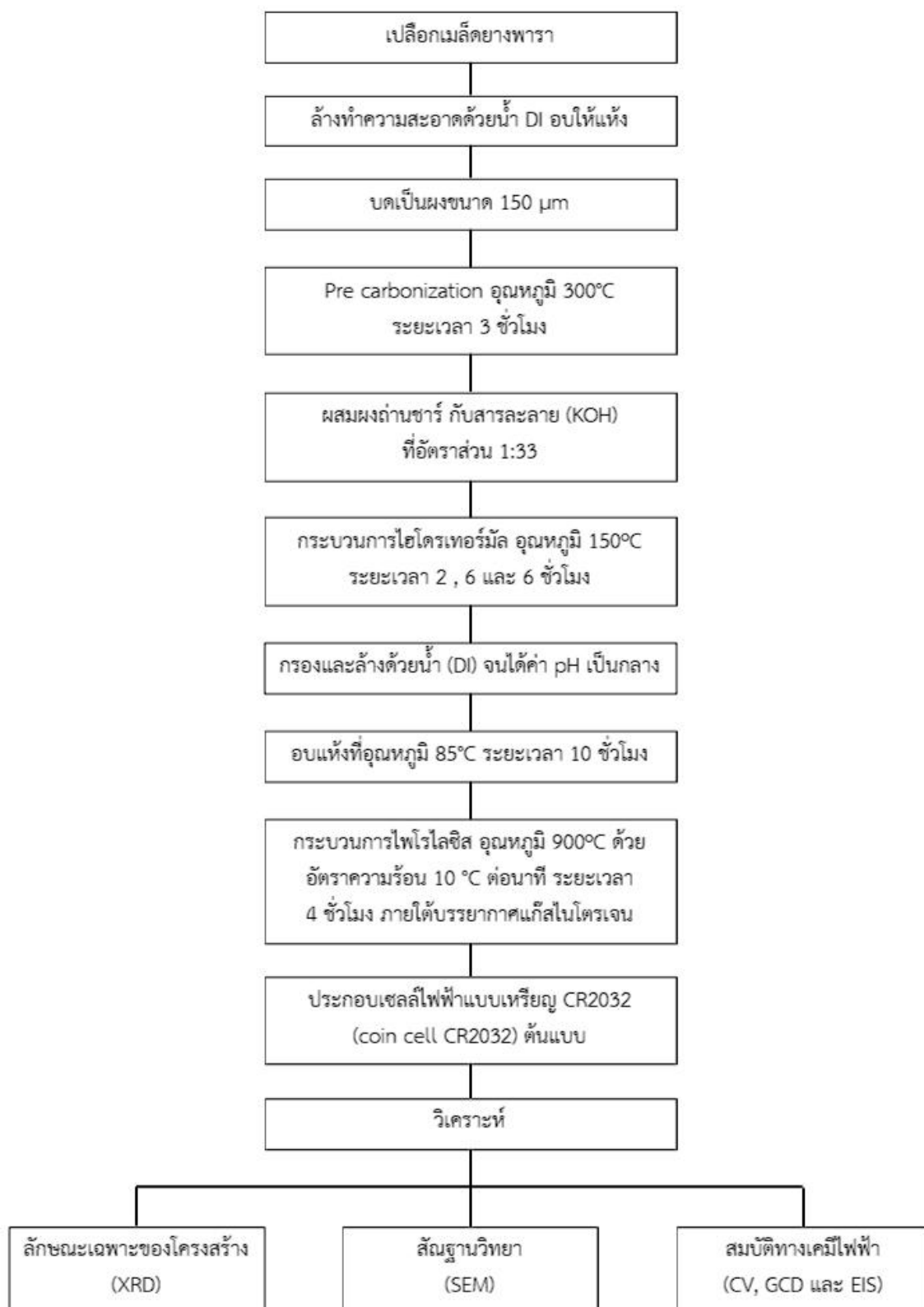
3.1 สารตั้งต้น, สารเคมี และอุปกรณ์

- 1) วัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพารา
- 2) น้ำปราศจากไอออน (Water DI)
- 3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide KOH) ยี่ห้อ Merck
- 4) เอ็น-เมทิล-2-ไพร์โรลิโดน (N-methyl-2 pyrrolidone NMP) ยี่ห้อ RCI Labscan
- 5) โพลีไวนิลลิดีน ฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride PVDF) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich
- 6) ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.995%
- 7) กระดาษกรอง ยี่ห้อ Whatman เบอร์ 6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm
- 8) กระดาษชั่งตวง ยี่ห้อ Whiteman 10 × 10 cm
- 9) Coin cell ยี่ห้อ Shenzhen ATSM
- 10) นิกเกิลโพลิม ยี่ห้อ Suzhou keshenghe
- 11) กระดาษลิตมัส ยี่ห้อ Merck
- 12) ถังปฏิกรณ์กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (Stainless steel autoclave)
- 13) ถังเทฟลอนใส่ในถังปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล (Teflon)
- 14) เครื่องชั่งสาร ยี่ห้อ Mettler Toledo
- 15) เครื่องบด ยี่ห้อ Jing Gong Yi
- 16) Vacuum pump ยี่ห้อ Rocker
- 17) เตาอบ 56 ลิตร ยี่ห้อ Binder
- 18) เตาอบ UF55 ยี่ห้อ Memmert

- 19) เตาอบ UF160 Plus ยี่ห้อ Memmert
- 20) เครื่องกวน ยี่ห้อ Heidolph
- 21) Coin cell Clamping Machine ยี่ห้อ Shenzhen ATSM
- 22) Punching Machine ยี่ห้อ Shenzhen ATSM
- 23) ชุดเครื่องแก้ว ยี่ห้อ Pyrex
- 24) ไมโครปิเปต 1- 10 μL ยี่ห้อ Nichiryo
- 25) ตะแกรงร่อนขนาด 150 μm

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้า ยี่ห้อ Zahner รุ่น Zennium Pro
 - 1.1) วัดค่า ไชคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry: CV)
 - 1.2) วัดค่า กัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge-discharge: GCD)
 - 1.3) วัดค่า ค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS)
- 2) เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT800
 - 2.1) ตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3) เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยา ยี่ห้อ BRUKER รุ่น D8 ADVANCE ECO
 - 3.1) วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD)



ภาพที่ 3-1 แผนภาพวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา

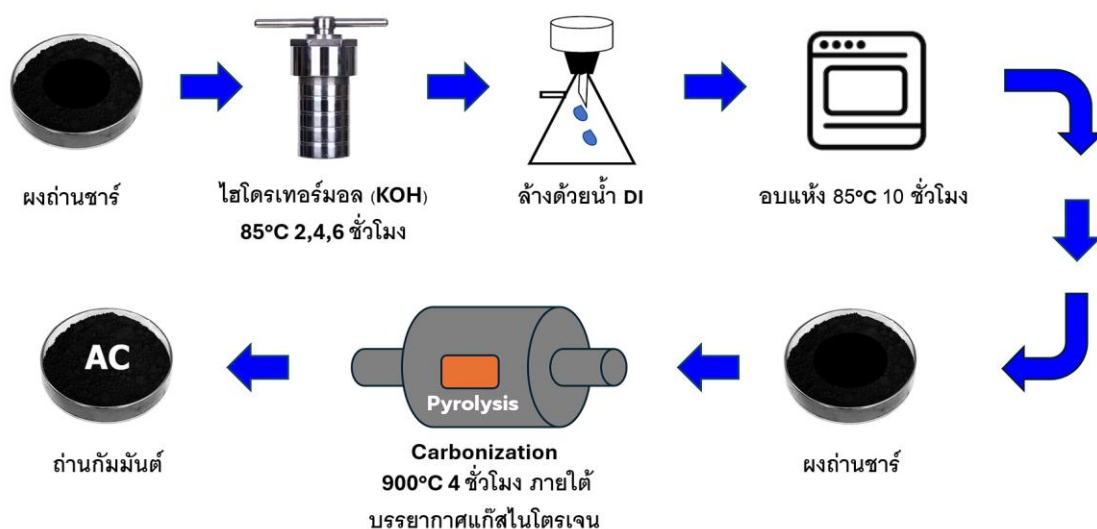
3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์

3.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา (RE2, RE4, และ RE6)

- 1) นำวัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพารามาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน (Water DI) และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำมาบดด้วยเครื่องบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 μm เพื่อควบคุมขนาดของอนุภาคที่ได้
- 3) นำวัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพาราที่ได้จากการบดไปผ่านกระบวนการ คาร์บอนไนเซชันเบื้องต้น (pre carbonization) ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) นำผงถ่านชาร์ ที่ได้มาผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ที่อัตราส่วน (RE : KOH) 1:33
- 5) นำส่วนผสมมากระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่อุณหภูมิ 150°C ระยะเวลา 2, 4, และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ (RE2, RE4, และ RE6)
- 6) นำผงถ่านชาร์ (RE2, RE4, และ RE6) ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) มากรอง และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (Water DI) จนได้ค่า pH เป็นกลาง
- 7) นำผงถ่านชาร์ (RE2, RE4, และ RE6) ที่ได้ มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
- 8) นำผงถ่านชาร์ (RE2, RE4, และ RE6) ที่อบแห้งมาเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราความร้อน 10 °C ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ผงถ่านกัมมันต์ ตัวอย่างที่ได้จะมีลักษณะเป็นสีดำ



ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการเตรียมผงถ่านชาร์ จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา



ภาพที่ 3-3 ขั้นตอนการเตรียมผงถ่านกัมมันต์จาก วัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา

3.4 การประติษฐ์ขั้วไฟฟ้า

- 1) ตัดแผ่นนิกเกิลโพลีโดย Punching Machine ให้ได้วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm.
- 2) นำผงถ่านกัมมันต์ ตัวอย่าง (RE2, RE4, และ RE6) , Polyvinylidene fluoride (PVDF) และ คาร์บอนแบล็ค (Carbon black) ผสมกันที่อัตราส่วน 80 wt% : 10 wt% : 10 wt% หยดสารละลาย N-methyl-2 pyrrolidone (NMP) กวนให้เข้ากันอย่างต่อเนื่องอุณหภูมิห้อง
- 3) เคลือบสารละลายที่ผสมได้ลงบนแผ่นนิกเกิลโพลีวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm. ให้ทั่วทั้ง 2 ด้าน
- 4) อบแห้งแผ่นนิกเกิลโพลีขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-4 แผ่นนิกเกิลโพลีขั้วไฟฟ้า (RE2, RE4, และ RE6) หลังอบแห้ง

3.5 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้นที่ 1 โมลาร์ มีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

- 1) ละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 5.611 g ในน้ำ DI ปริมาณ 100 ml
- 2) กวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที

3.6 การประกอบเซลล์ไฟฟ้าต้นแบบ (Prototype coin cell)

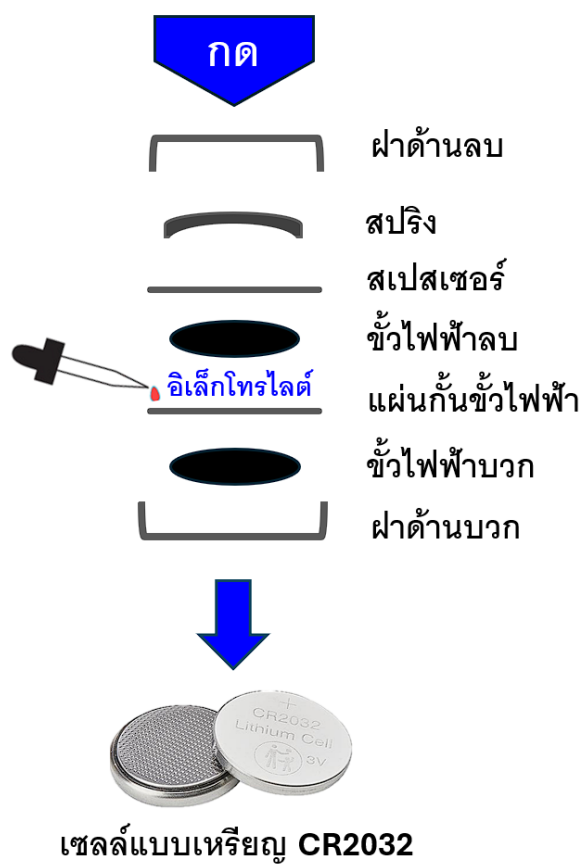
การประกอบเซลล์ไฟฟ้าต้นแบบ ในงานวิจัยนี้ ใช้ชุดอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ซึ่งเป็นโลหะที่ทนการเกิดสนิมและการกัดกร่อน โดยชุดอุปกรณ์ประกอบด้วย ฝาด้านลบ และด้านบวก (Negative and positive case) สปริง (Spring) และ สเปซเซอร์ (Spacer) ในงานวิจัยนี้แผ่นกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า (Separator) ใช้เป็นกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 6



ภาพที่ 3-5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ CR2032

ขั้นตอนในการอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ดังนี้

- 1) ประกอบเซลล์ไฟฟ้าต้นแบบ โดยเริ่มจากการวางฝาด้านบวก (Positive case) ไว้ด้านล่างสุด วางทับด้วยขั้วไฟฟ้าบวก (Cathode) และกั้นด้วยแผ่นกั้นขั้วไฟฟ้า (Separator) หยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้นที่ 1 โมลาร์ จำนวน 0.1 mL ตามด้วยวางขั้วไฟฟ้านลบ (Anode) สเปซเซอร์ (Spacer) สปริง (Spring) และฝาด้านลบ (Negative case) เป็น ลำดับสุดท้าย
- 2) นำเซลล์ไฟฟ้าต้นแบบที่ประกบกันเรียบร้อยแล้ว มาเข้าเครื่องอัดไฮโดรริก ด้วยแรงอัด 1000 Psi นาน 10 วินาที เพื่อให้เซลล์ไฟฟ้าประกบกันสนิท



ภาพที่ 3-6 ขั้นตอนในการประกอบเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 ต้นแบบ

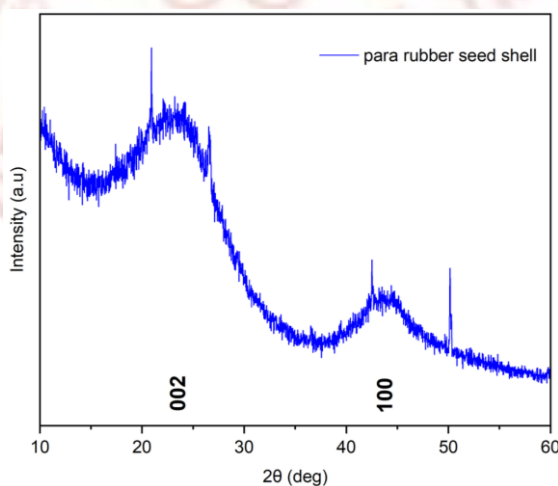
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปราย

ในงานวิจัยนี้ ได้สังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา ตัวอย่างเซลล์ (RE2, RE4, และ RE6) โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค CV, EIS และ GCD พร้อมทั้งประกอบเซลล์ไฟฟ้าเป็นแบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ต้นแบบ สำหรับทดสอบการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยมีรายละเอียดผลการวิจัยและอภิปรายผลดังต่อไปนี้

4.1 ผลตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค (X-Ray Diffraction หรือ XRD) คาร์บอนจากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา แสดงให้เห็นพีคที่กว้างสองพีค พีคแรกที่มีมุม 2 θ สอดคล้องกับระนาบ (002) บ่งบอกการรวมตัวกันแบบสุ่มของกลุ่มคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบ ในขณะที่พีคที่สองที่มีมุม 44 องศา สอดคล้องกับระนาบ (100) บ่งบอกการมีอยู่ของคาร์บอนแกรไฟต์ที่มีอยู่ (Liu et al., 2016) ลักษณะพีคในระนาบ (002) และ (100) เกี่ยวข้องกับโครงสร้างผลึกในเซลล์โลส ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของวัสดุชีวมวลที่มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างเซลล์โลส (Segal et al., 1959) บริเวณที่ไม่มีพีคคมชัดเป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างอะมอร์ฟัส (amorphous) ซึ่งเกิดจาก ลิกนิน และเฮมิเซลล์โลสที่มีลักษณะไม่เป็นระเบียบ (Azubuike, 2018) คาร์บอนที่ได้จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา บ่งชี้ได้ว่าเป็นวัสดุคาร์บอนแบบอสัณฐาน (amorphous carbon materials)

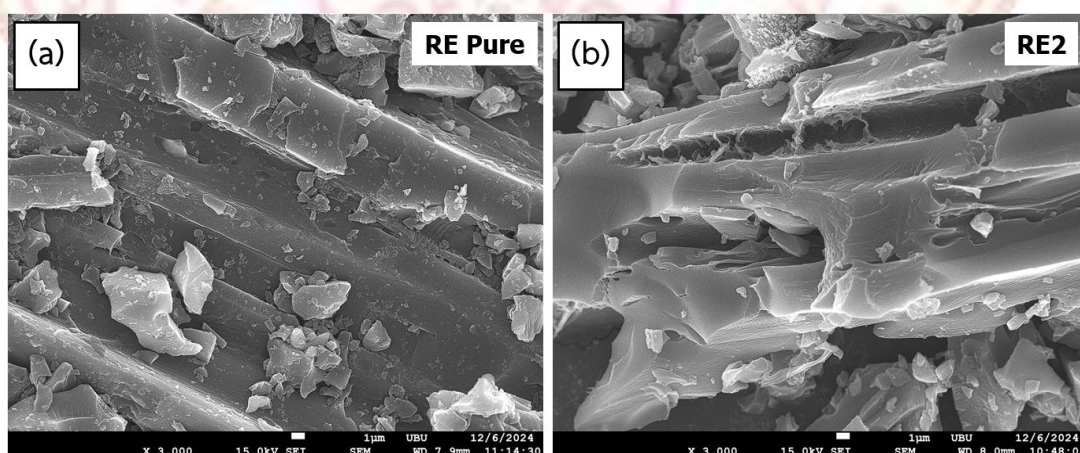


ภาพที่ 4-1 รูปแบบ XRD ของวัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพารา

ค่ามุม 2θ ในกราฟยังสามารถวิเคราะห์ระยะระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) สามารถระบุประเภทของโครงสร้างผลึก และลักษณะของคาร์บอนจากวัสดุชีวภาพเปลือกเมล็ดยางพาราได้ โดยลักษณะของการเลี้ยวเบนบ่งบอกถึงวัสดุชีวมวลที่มีลักษณะกึ่งผลึก (semi crystalline) โดยที่ความสมดุลระหว่างผลึก และอะมอร์ฟัส (amorphous) ในวัสดุนี้มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี

4.2 ผลตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า วัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพารา (RE Pure) ภาพที่ 4-2 (a) ที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนที่น้อยและมีลักษณะรูพรุนที่แคบ ซึ่งเกิดจากวัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพารา มีสารอินทรีย์หลายชนิดเมื่อโดนความร้อนสารอินทรีย์เหล่านั้นจะย่อยสลายหายไป วัสดุชีวมวลจากเปลือกเมล็ดยางพารา (RE2) ภาพที่ 4-2 (b) เมื่อทำการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อัตราส่วน (RE2:KOH) 1:33 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่อุณหภูมิ 150°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พบว่ามีลักษณะเป็นแผ่นที่มีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนที่มากและมีลักษณะรูพรุนที่กว้าง ซึ่งเกิดจากโครงสร้างรูพรุนถูกทำลายด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยรูพรุนที่มากและกว้างส่งผลเป็นอย่างมากต่อค่าความจุ เนื่องจากมีพื้นที่ในการกักเก็บประจุมากขึ้น (Huang et al., 2019) (Wang & Kaskel, 2012)

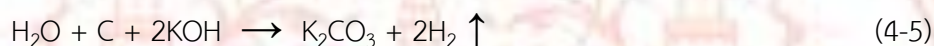


ภาพที่ 4-2 ภาพถ่าย SEM ตัวอย่าง RE Pure (a) และ RE2 (b) ที่กำลังขยาย 3,000X

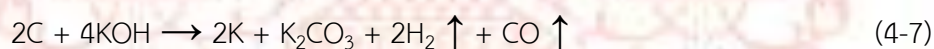
โครงสร้างรูพรุนของตัวอย่างหลังผ่านกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH แสดงดัง สมการ (Guo & Lua, 2002)



เนื่องจากโลหะโพแทสเซียม (K) ทำปฏิกิริยาคาร์บอนที่อุณหภูมิกระตุ้น ส่งผลให้ชั้นอะตอมของคาร์บอนกว้างขึ้นและเกิดเป็นรูพรุน หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิขึ้น และเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นแก๊ส CO_2 และ H_2O



K_2CO_3 บดกันไม่ให้ตัวอย่างถูกเผาไหม้มากเกินไป ส่งผลให้ได้ผลผลิตสูงและทำให้เกิดการพัฒนาของรูพรุนภายในโครงสร้างเป็นอย่างดี โดยมีปฏิกิริยารวมดังนี้



4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค CV EIS และ GCD

ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของตัวอย่างเซลล์ (RE2) ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry: CV) จากพื้นที่เส้นโค้ง CV สามารถประมาณค่าความจุจำเพาะของวัสดุขั้วไฟฟ้า (C_p) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$C_p = \frac{\text{Area}}{2 \times m \times \text{scan rate} \times (V_2 - V_1)} \quad (4.8)$$

C_p คือ ค่าความจุจำเพาะ (Specific Capacitance) หน่วยเป็น ฟารัดต่อกรัม (F/g)

Area คือ พื้นที่ (integrated area) ได้กราฟกระแส-ศักย์ไฟฟ้า (i-V) จากการทดสอบ CV

2 คือ ในการทดสอบ CV จะมีการสแกนศักย์ไฟฟ้าจาก V_1 ไป V_2 (forward scan) และย้อนกลับจาก V_2 มาที่ V_1 (reverse scan)

m คือ มวลของวัสดุขั้วไฟฟ้าที่เป็น “active material” (g)

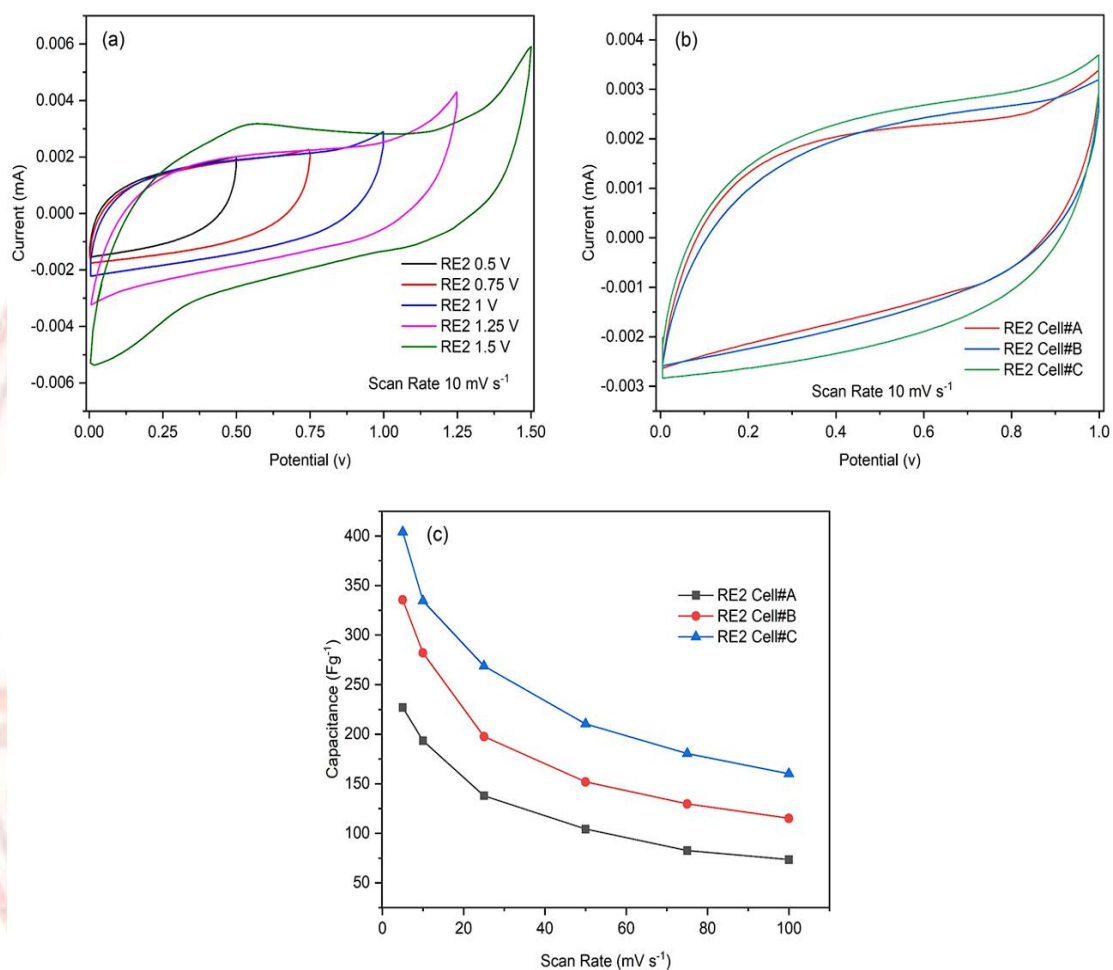
scan rate คือ อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า (V/S หรือ mV/S)

$(V_2 - V_1)$ คือ ช่วงความต่างศักย์ที่ใช้สแกน (Voltage window) ในการทดลอง CV

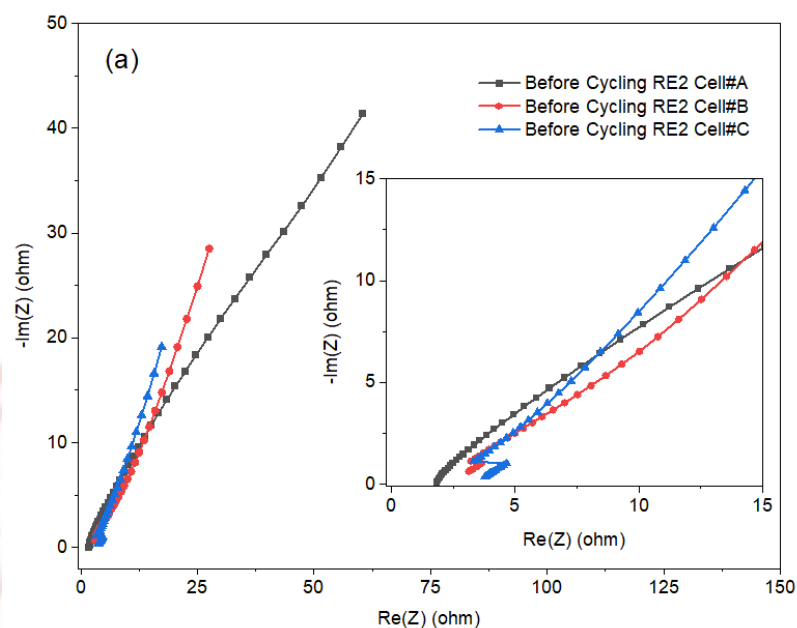
โดยทำการทดสอบในระบบสองขั้วไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ในการทดลองจะกำหนดอัตราสแกน (Scan Rate) ไว้ที่ 10 mV s^{-1} และเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงความต่างศักย์ 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, และ 1.5 (V) ตามลำดับ แล้ววัดกระแสไฟฟ้าในช่วงศักย์ต่างๆ จะได้กราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/g) กับความต่างศักย์ (V) ดังภาพที่ 4-3 (a) ซึ่งแสดงกราฟเส้นโค้งไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) มีลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และสมมาตรบ่งบอกถึงพฤติกรรมของตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้าแบบสองชั้น (Electric Double Layer Capacitor: EDLCs) อย่างชัดเจน (Li et al., 2022) โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 1.5 (V) เมื่อเกินค่านี้ไปกราฟเส้นโค้งไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) สี่เหลี่ยมผืนผ้าเกิดการเบี่ยงเบนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งยืนยันได้ว่าตัวอย่างเซลล์ (RE2) ได้ผ่านการทดสอบวัฏจักรอย่างเพียงพอในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 0-1 (V) ดังนั้นจึงถือว่าศักย์ไฟฟ้าที่ 1 (V) เป็นขีดจำกัดที่ปลอดภัยสำหรับเซลล์ (RE2) นี้

ผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C, ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry: CV) โดยทดสอบในระบบสองขั้วไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ผลการทดลองแสดงกราฟเส้นโค้งไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) มีลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสมมาตร โดยมีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) เท่ากับ 193.44 F g^{-1} , 282.07 F g^{-1} และ 334.63 F g^{-1} ตามลำดับ ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า 1(V) ที่อัตราสแกน (Scan Rate) 10 mV s^{-1} ดังภาพที่ 4-3 (b)

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) กับอัตราศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่อเวลา (Scan Rate) ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C, พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) ลดลงเมื่ออัตราสแกน (Scan Rate) ที่เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากไอออนมีเวลาน้อยลงในการแพร่เข้าสู่รูพรุนของขั้วไฟฟ้าคาร์บอน (Awitdrusawitdrus et al., 2016) ดังภาพที่ 4-3 (c) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) และอัตราสแกน (Scan Rate) นี้มีความสำคัญในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors) ซึ่งต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการกักเก็บและปลดปล่อยพลังงานที่อัตราศักย์ไฟฟ้า (Scan Rate) ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในสถานการณ์จริง

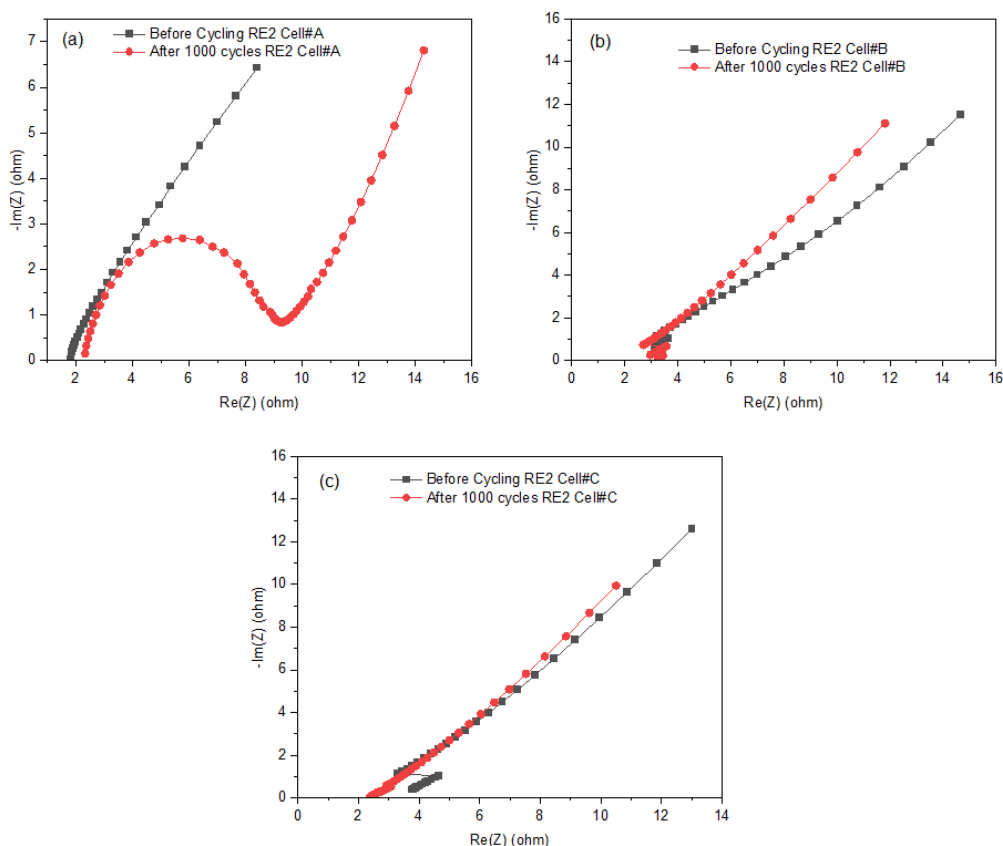


ภาพที่ 4-3 (a) เส้นโค้ง CV ตัวอย่างเซลล์ (RE2) (b) เส้นโค้ง CV ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C
(c) เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C



ภาพที่ 4-4 กราฟ Nyquist ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C ก่อนศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้า

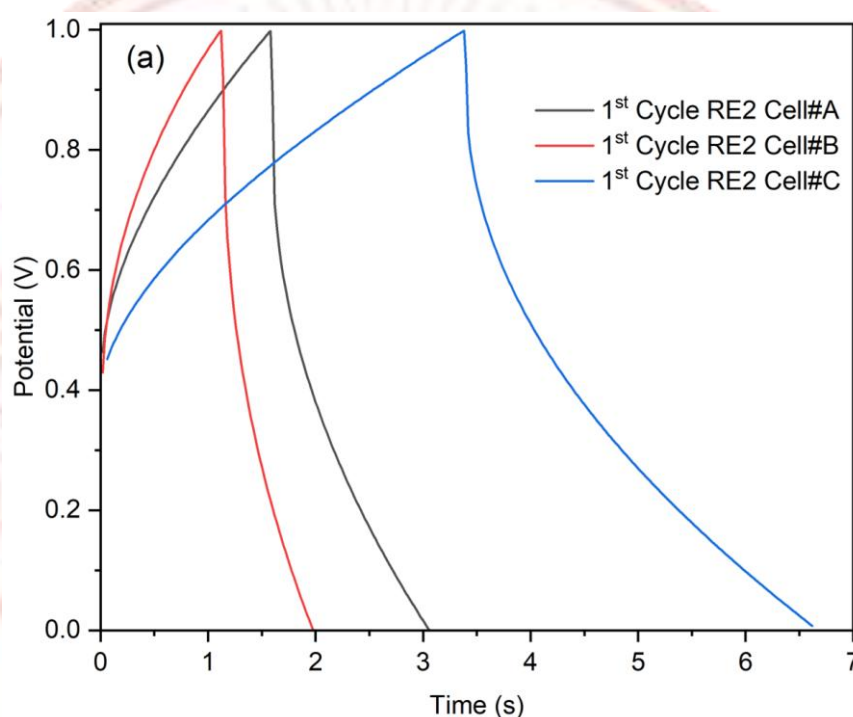
ผลการตรวจสอบความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) ก่อนทำการศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry: CV) ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C ดังภาพที่ 4-4 กราฟ Nyquist Plot ถูกวัดในช่วงความถี่ตั้งแต่ (1000 Hz) ถึง (0.001 Hz) ที่อุณหภูมิห้อง จะพบว่า กราฟ Nyquist Plot ในช่วงความถี่สูง (0-5 ohm) ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, และ C แสดงค่าความต้านทานภายใน (Internal resistance) ใกล้เคียงกัน มักพบได้จากวัสดุคาร์บอนที่มีชั้นตอนกระบวนการเตรียมที่เหมือนกัน ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell# A มีลักษณะส่วนโค้งครึ่งวงกลมที่มีความถี่สูงที่เล็กที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#B และ C ตามมาด้วยรูปแบบที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขนานกับแกนจินตภาพ (Z'') กราฟตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A มีลักษณะใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุในอุดมคติมาก ในขณะที่ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#B และ C แสดงค่าความต้านทานรวม (R_b) ความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (R_{ct}) และความต้านทานโดยรวม (R) ที่สูงที่ความถี่สูงไปจนถึงความถี่ต่ำ นอกจากนี้ เส้นที่มุ่งไปสู่ความถี่ต่ำไม่ขนานกับแกนความต้านทานจินตภาพ



ภาพที่ 4-5 เปรียบเทียบกราฟ Nyquist ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C ก่อน และหลังทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่อง จำนวน 1,000 รอบ

ผลการเปรียบเทียบความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS) ก่อน และหลังวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry: CV) ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C กราฟ Nyquist Plot ถูกวัดในช่วงความถี่ตั้งแต่ (1000 Hz) ถึง (0.001 Hz) ที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A มีลักษณะส่วนโค้งครึ่งวงกลมที่ความถี่สูงที่ใหญ่ที่สุด และพบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าเคมีสูงขึ้น หลังจากวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ อาจเกิดจากการยุบตัวของโครงสร้างรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง และอิเล็กโทรไลต์อาจเกิดการเสื่อมสภาพจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงในขณะทำการทดสอบ ทำให้การถ่ายเทประจุ (Charge Transfer) และการเคลื่อนที่ของไอออนในอิเล็กโทรไลต์ลดลง ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเคมีสูงขึ้น ดังภาพที่ 4-5 (a) ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#B และ C มีลักษณะส่วนโค้งครึ่งวงกลมที่ความถี่สูงที่เล็กลง และมีความต้านทานไฟฟ้าเคมีลดลงหลังการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี

(CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ อาจเกิดจากการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องหลายรอบและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซ้ำๆจนสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ต้องการบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าออกไปได้ ทำให้การถ่ายเทประจุ (Charge Transfer) และการเคลื่อนที่ของไอออนในอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเคมีลดลง ดังภาพที่ 4-5 (b) และ (c)



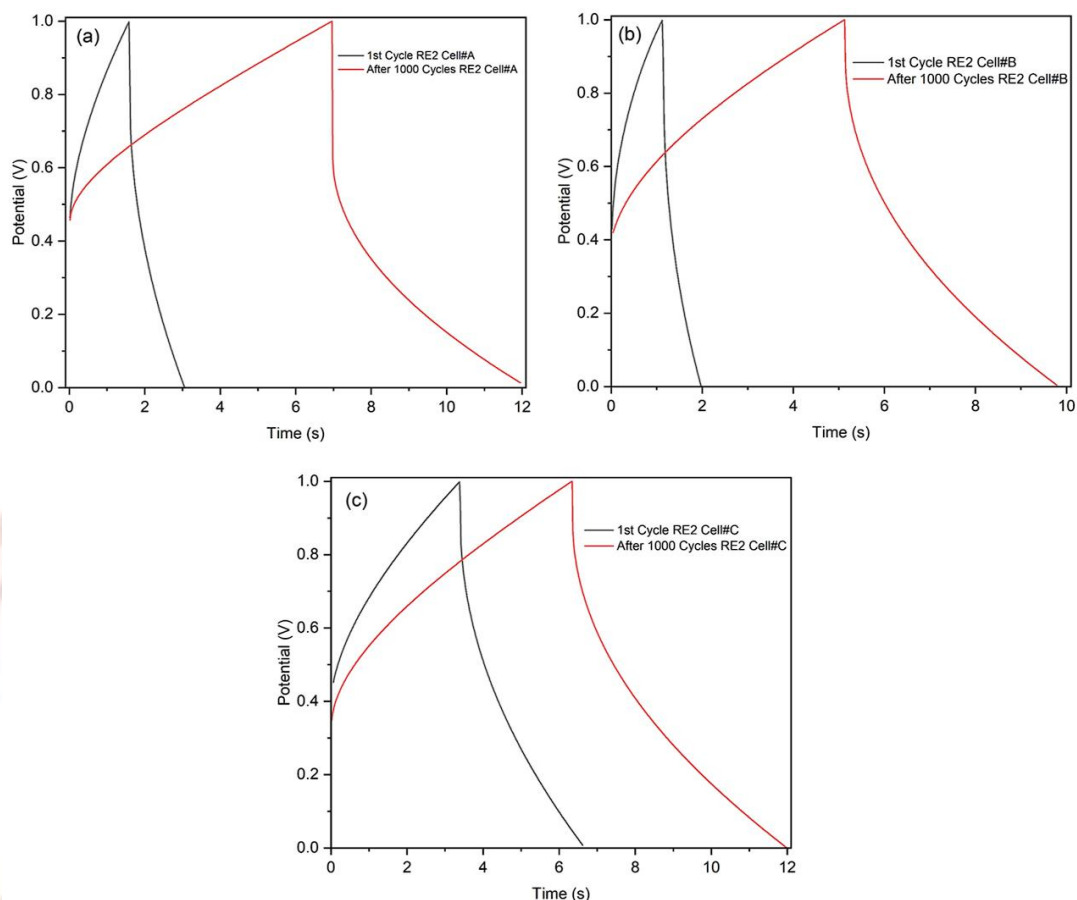
ภาพที่ 4-6 กราฟเส้นโค้ง GCD ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, B, C จำนวน 1 รอบ

ผลการศึกษาการอัด (Charge) และคายประจุ (Discharge) ของขั้วไฟฟ้า ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C ด้วยเทคนิค (Galvanostatic Charge-Discharge Curves: GCD) กราฟเส้นโค้ง GCD ถูกวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 10 mA/cm^2 และแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0-1 (V) พบว่าตัวอย่างเซลล์ RE2 ทั้ง 3 แสดงออกพฤติกรรมการอัด (Charge) และคายประจุ (Discharge) ของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A อัดประจุที่ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 1 (V) ใช้ระยะเวลาประมาณ 1.5 วินาที และใช้ระยะเวลาคายประจุประมาณ 1.5 วินาที มีลักษณะเส้นโค้งเป็นรูปสามเหลี่ยมที่ค่อนข้างสมมาตรกัน ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#B อัดประจุที่ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 1 (V) ใช้ระยะเวลาประมาณ 1 วินาที และใช้ระยะเวลาคายประจุประมาณ 1 วินาที บ่งชี้ได้ว่ามีค่าความจุจำเพาะที่น้อยกว่าตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A เนื่องจากมี

ความต้านทานภายใน (Internal Resistance) มากกว่า ตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#C แสดงออกพฤติกรรมที่ดีที่สุด อัตราประจุที่ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 1 (V) ใช้ระยะเวลาประมาณ 3 วินาที และใช้ระยะเวลาคายประจุประมาณ 4 วินาที มีลักษณะเส้นโค้งเป็นรูปสามเหลี่ยมที่สมมาตรกันที่สุด บ่งชี้ได้ว่ามีความจุจำเพาะที่สูงกว่า และมีความต้านทานภายใน (Internal Resistance) ที่ต่ำกว่าทุกตัวอย่างเซลล์ ดังภาพที่ 4-6 (a)

ผลการเปรียบเทียบศึกษาการอัด (Charge) และคายประจุ (Discharge) ของขั้วไฟฟ้า ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C ด้วยเทคนิค (Galvanostatic Charge-Discharge Curves: GCD) กราฟเส้นโค้ง GCD ถูกวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 10 mA/cm² และแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0-1 (V) ก่อน และหลังวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ การทดสอบรอบแรก (กราฟเส้นสีดำ) ดังภาพที่ 4-7 (a), (b), (c) พบว่าตัวอย่างเซลล์ RE2 ทั้ง 3 เซลล์ แสดงออกถึงพฤติกรรมที่มีการอัดประจุ (Charge) ที่รวดเร็วใช้ระยะเวลาประมาณ 2-4 วินาที ในการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าจาก 0-1 (V) แสดงถึงความต้านทานภายใน (Internal Resistance) ที่ต่ำ มีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าที่ดีในช่วงทดสอบรอบแรก และการคายประจุ (Discharge) ในช่วงทดสอบรอบแรกมีการลดลงของศักย์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว

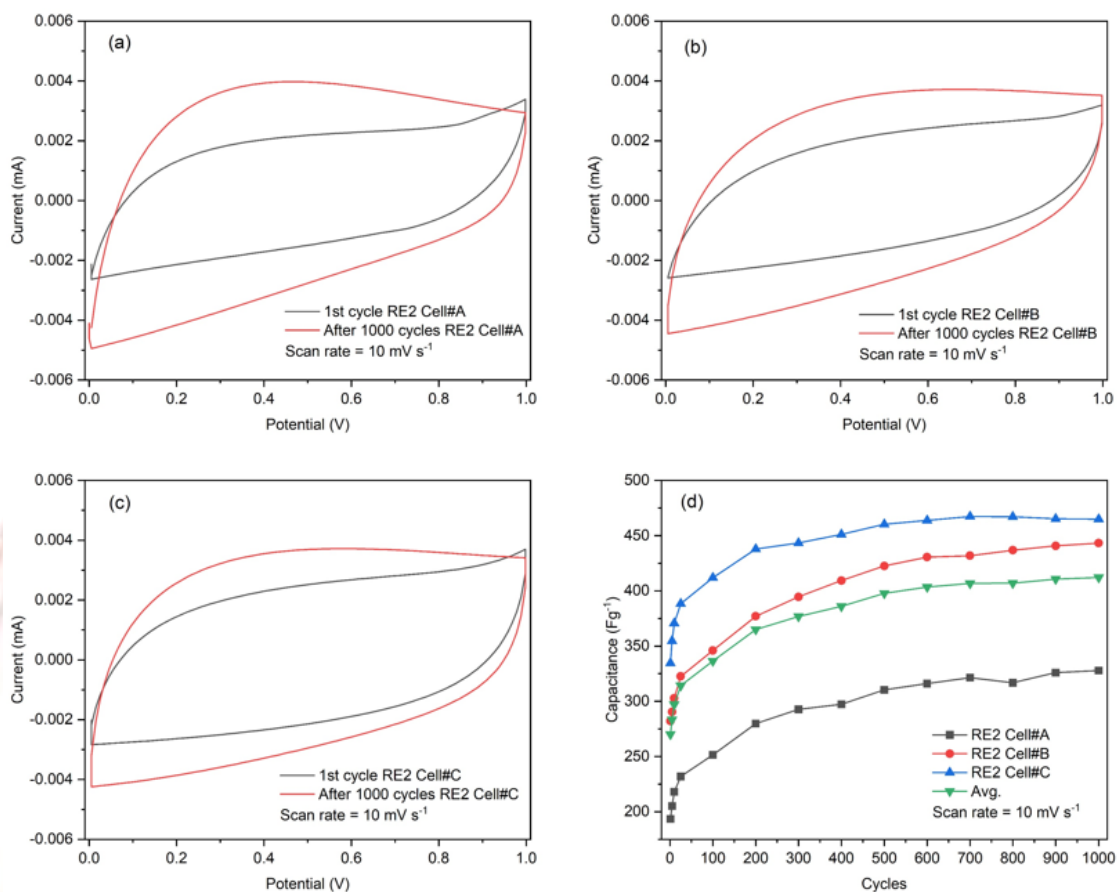
ผลการเปรียบเทียบศึกษาการอัด (Charge) และคายประจุ (Discharge) ของขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเซลล์ RE2 ทั้ง 3 เซลล์ ด้วยเทคนิค (Galvanostatic Charge-Discharge Curves: GCD) หลังจากวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ (เส้นสีแดง) ดังภาพที่ 4-7 (a), (b), (c) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดประจุ (Charge) เพิ่มขึ้นเป็นระยะเวลาประมาณ 6-8 วินาที แสดงถึงมีความต้านทานภายใน (Internal Resistance) เพิ่มขึ้นในขั้วไฟฟ้า กราฟเส้นโค้งการอัด (Charge) และคายประจุ (Discharge) ของขั้วไฟฟ้า มีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปสามเหลี่ยมที่สมมาตรมากขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการคายประจุ (Discharge) เพิ่มขึ้นเป็นระยะเวลาประมาณ 8-10 วินาที แสดงถึงมีความสามารถในการกักเก็บประจุที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างของตัวอย่างเซลล์ RE2 ทั้ง 3 พบว่า RE2 Cell#C มีประสิทธิภาพดีที่สุด



ภาพที่ 4-7 กราฟเส้นโค้ง GCD ตัวอย่างเซลล์ (a) RE2 Cell#A, (b) RE2 Cell#B และ (c) RE2 Cell#C ก่อน และหลังทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) จำนวน 1,000 รอบ

4.4 เปรียบเทียบผลศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค CV อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ

เปรียบเทียบผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) ของตัวอย่างเซลล์ RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry: CV) โดยทดสอบในระบบสองขั้วไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ในการทดลองจะกำหนดอัตราสแกน (Scan Rate) ไว้ที่ 10 mV s^{-1} และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 1 (V) กราฟเส้นโค้งไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) ของขั้วไฟฟ้า ตัวอย่างเซลล์ RE2 ทั้ง 3 เซลล์ มีลักษณะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และสมมาตรบ่งบอกถึงพฤติกรรมของตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้าแบบสองชั้น (Electric Double Layer Capacitor: EDLCs) อย่างชัดเจน (Li et al., 2022) และยังพบว่าหลังจากทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ ดังภาพที่ 4-8 (a), (b), (c) พบว่ามีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) ที่มากขึ้นทั้ง 3 ตัวอย่างเซลล์ ดังตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-8 เส้นโค้ง CV ของ (a) RE2 Cell#A, (b) RE2 Cell#B, (c) RE2 Cell#C (d) เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ก่อน และหลังทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) จำนวน 1,000 รอบ

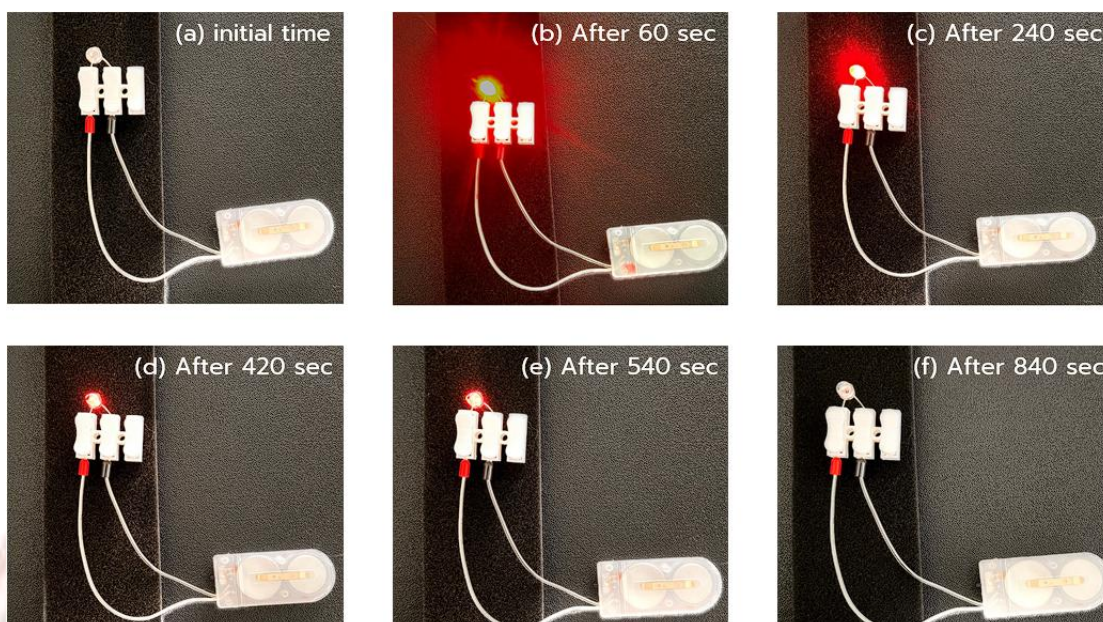
ตารางที่ 4-1 ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F g⁻¹) ที่อัตราสแกน 10 mV s⁻¹ ที่ 1 และ 1,000 รอบ

ตัวอย่าง	ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F g ⁻¹) ที่อัตราสแกน 10 mV s ⁻¹	
	@ 1 รอบ	@ 1,000 รอบ
RE2 Cell#A	193.48	327.88
RE2 Cell#B	282.07	443.23
RE2 Cell#C	334.63	464.96

ภาพที่ 4-8 (d) เปรียบเทียบผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) จากทำการวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) จำนวน 1-1,000 รอบ อย่างต่อเนื่องพบว่าค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ดังตารางที่ 4-2 การเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวที่ใช้งานได้ (Active Surface Area) ผ่านกระบวนการ (Electrochemical Activation) ระหว่างการทดสอบวัฏจักร จนสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือหมู่มากขึ้นที่ไม่ต้องการบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าออกไปได้ จนสามารถปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนของขั้วไฟฟ้า ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่แพร่เข้าสู่รูพรุนของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพการกักเก็บประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-2 สรุปค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ($F\ g^{-1}$) ที่อัตราสแกน $10\ mV\ s^{-1}$ ที่จำนวนรอบต่างๆ

จำนวนรอบ	ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ($F\ g^{-1}$) ที่อัตราสแกน $10\ mV\ s^{-1}$		
	RE2 Cell#A	RE2 Cell#B	RE2 Cell#C
1	193.44	282.07	334.63
5	205.14	290.40	354.67
10	218.08	302.76	370.72
25	231.91	322.52	388.34
100	251.46	345.98	411.89
200	279.90	377.03	437.89
300	292.62	394.56	443.30
400	297.30	409.31	451.06
500	310.32	422.57	460.37
600	315.99	430.51	463.73
700	321.42	431.82	467.26
800	316.78	436.83	467.05
900	326.00	440.80	465.25
1,000	327.88	443.23	464.96



ภาพที่ 4-9 การทดสอบนำไปประยุกต์ใช้งานจริงของเซลล์ไฟฟ้า ในการเปิดหลอด LED ขนาด 3 (V)

4.5 การประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้า

ทดสอบการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงและช่วงศักย์ไฟฟ้าที่เสถียรในการทำงานของเซลล์ไฟฟ้า ที่ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทดสอบในระบบสองขั้วไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ในการประยุกต์ใช้งานจริง ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) หนึ่งตัวไม่สามารถตอบสนองความต้องการด้านพลังงานและกำลังไฟฟ้าทั้งหมดได้แน่นอน ดังนั้นจึงเพิ่มการอัด (Charge) ศักย์ไฟฟ้าให้กับเซลล์ที่ 1.5 (V) แล้วนำมาต่ออนุกรมกันทั้งหมด 2 เซลล์ เพื่อทำการเปิดหลอด LED ขนาด 3 (V) พบว่ามีศักยภาพการใช้งานจริงดีเยี่ยม ซึ่งสามารถเปิดหลอด LED ให้เปล่งแสงได้นานถึง 14 นาที ดังภาพที่ 4-9

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จาก วัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา ด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน และเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิสูง พร้อมทั้งประกอบเซลล์ไฟฟ้าเป็นเซลล์แบบเหรียญ CR2032 (coin cell CR2032) ต้นแบบสำหรับทดสอบการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยที่ระยะเวลาการกระตุ้น อัตราส่วนสารกระตุ้น และอุณหภูมิในการเผา ปัจจัยที่กล่าวมาส่งผลต่อการเกิดรูพรุน และประสิทธิภาพการกักเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุคาร์บอน โดยสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1 ลักษณะโครงสร้างผลึก (XRD)

- 1) ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารามีลักษณะ กึ่งผลึก (semi-crystalline) และเป็นวัสดุคาร์บอนแบบอสัณฐาน (amorphous carbon)
- 2) มีพีคที่มุม 24 องศา และ 44 องศา สอดคล้องกับระนาบ (002) และ (100) เป็นลักษณะของโครงสร้างคาร์บอนที่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ

5.2 ลักษณะสัณฐานวิทยา (SEM)

- 1) ตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพารา ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นทางเคมี มีพื้นผิวขรุขระแต่มีขนาดรูพรุนที่แคบและมีจำนวนน้อย
- 2) ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลเปลือกเมล็ดยางพาราตัวอย่าง (RE2) หลังจากผ่านการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิ 900°C พบว่ารูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของ Supercapacitor

5.3 สมบัติทางเคมีไฟฟ้า

5.3.1 สมบัติทางเคมีไฟฟ้า Cyclic Voltammetry (CV)

- 1) กราฟไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) ของตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสมมาตร ซึ่งเป็นพฤติกรรมของ Electric Double Layer Capacitor (EDLCs)

2) ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 ที่สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดการเสียดสภาพคือ 1 (V)

5.3.2 ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance)

1) ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#C มีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะเท่ากับ 334.63 F g^{-1} มากที่สุด สำหรับการทดสอบวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) ที่จำนวน 1 รอบ

2) ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C หลังจากทำการทดสอบวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องที่จำนวน 1,000 รอบ มีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ เพิ่มขึ้นทั้งหมดทุกตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้า โดยตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้า RE2 Cell#C มีค่าเท่ากับ 464.96 F g^{-1} สูงที่สุด

5.3.3 ความต้านทานไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Impedance Spectroscopy: EIS)

1) ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#A มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด และใกล้เคียง Supercapacitor ในอุดมคติ ก่อนทำการทดสอบวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) ที่จำนวน 1 รอบ

2) ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#C มีความต้านทานไฟฟ้าเคมีที่ต่ำลง หลังจากทำการทดสอบวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องที่จำนวน 1,000 รอบ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซ้ำๆจนสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนหรือหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ต้องการบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้าออกไปได้ ทำให้การถ่ายเทประจุ (Charge Transfer) และการเคลื่อนที่ของไอออนในอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าเคมีลดลง

5.3.4 การอัด และคายประจุ (Galvanostatic Charge-Discharge: GCD)

1) ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#C แสดงออกพฤติกรรมที่ดีที่สุดในการอัดประจุที่ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 1 (V) ใช้ระยะเวลาประมาณ 3 วินาที และใช้ระยะเวลาคายประจุประมาณ 4 วินาที มีลักษณะเส้นโค้งเป็นรูปสามเหลี่ยมที่สมมาตรกัน บ่งชี้ว่ามีค่าความจุจำเพาะที่สูง และมีความต้านทานภายใน (Internal Resistance) ที่ต่ำ

2) หลังจากวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#C มีพฤติกรรมการอัด และคายประจุ ที่ดีขึ้นที่สุด โดยใช้ระยะเวลาการอัด และคายประจุ เพิ่มขึ้นเป็น 6 วินาที บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานที่สูงขึ้น

5.4 การประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้า

1) ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 (RE2) สามารถใช้เปิดหลอด LED ขนาด 3V ได้นานถึง 14 นาที เมื่อต่อเซลล์แบบอนุกรม 2 เซลล์

2) ตัวอย่างเซลล์ไฟฟ้าแบบเหรียญ CR2032 RE2 Cell#A, RE2 Cell#B, และ RE2 Cell#C ทำการทดสอบวัดค่าไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) อย่างต่อเนื่องจำนวน 1,000 รอบ พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Capacitance) เพิ่มขึ้น 327.88 F g^{-1} , 443.23 F g^{-1} และ 464.96 F g^{-1} ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถในการเก็บพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.5 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาการปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) แบบอื่นๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว
- 2) ศึกษาผลของอุณหภูมิช่วงต่างๆ และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อพัฒนาโครงสร้างรูพรุน
- 3) ศึกษาการใช้สารเติมแต่ง (dopants) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า และลดความต้านทานภายใน (Internal Resistance)
- 4) เพิ่มจำนวนรอบการทดสอบอย่างต่อเนื่อง (Cycle Stability) มากกว่า 1,000 รอบ เพื่อตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้า

ตารางที่ 5-1 ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุคาร์บอน จากชีวมวลชนิดต่างๆ ในงานวิจัยที่ผ่านมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้

วัสดุชีวมวล	สารกระตุ้น	ค่าความจุ (F g^{-1})	อิเล็กโทรไลต์	อ้างอิง
Bamboo	KOH	126.00	30 wt.% H_2SO_4	(Kikuchi et al., 2018)
Pistachio shell	KOH	120.00	1 M H_2SO_4	(Wu et al., 2005)
Firewood	KOH	180.00	1 M H_2SO_4	(Wu et al., 2005)
Sugar-cane bagasse	ZnCl_2	300.00	1 M H_2SO_4	(Rufford et al., 2010)
Cassava peel waste	KOH	264.00	0.5 M H_2SO_4	(Ismanto et al., 2010)
RE2 Cell#A	KOH	327.88	1M KOH	งานวิจัยนี้
RE2 Cell#B	KOH	443.23	1M KOH	งานวิจัยนี้
RE2 Cell#C	KOH	464.96	1M KOH	งานวิจัยนี้

บรรณานุกรม

- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851-4861.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>
- Atria. (2024). *Types of porosity*. <https://atriainnovation.com/en/blog/how-to-measure-the-materials-porosity/>
- Awitdrusawitdrus, Deraman, M., Ibrahimabutalib, Farma, R., Syahirah, N., Nor, M.,...Dolah, M. (2016). Cyclic Voltammometry of Binderless Activated Carbon Monoliths based supercapacitor from Mixtures of Pre-carbonized of Fibers of Empty Fruit Bunches and Green Petroleum Coke. *Kn E Engineering*, 2016, 1-8.
<https://doi.org/10.18502/keg.v1i1.511>
- Azubuike, C. P., Rodríguez-Pérez, M. Á., & Oladele, I. O. (2018). Structural properties of biomass materials investigated by XRD analysis. *Materials Research and Technology*, 7(2), 211-221.
- Azunna, S. (2019). Compressive strength of concrete with palm kernel shell as a partial replacement for coarse aggregate. *SN Applied Sciences*, 1.
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-0334-6>
- Berillo, D., & Ermukhambetova, A. (2024). The review of oral adsorbents and their properties. *Adsorption*, 30, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10450-024-00515-1>
- Berndes, G., Hoogwijk, M., & van den Broek, R. (2003). The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, 25(1), 1-28. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00185-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00185-X)
- Boerjan, W., Ralph, J., & Baucher, M. (2003). Lignin Biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 54, 519-546. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Chen, H., Liu, D., Shen, Z., Bao, B., Zhao, S., & Wu, L. (2015). Functional Biomass

Carbons with Hierarchical Porous Structure for Supercapacitor Electrode Materials. *Electrochimica Acta*, 180, 241-251.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.08.133>

Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., & Woess-Gallasch, S. (2009). Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(8), 434-447.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.013>

Deshon Kaman, S., Tan, I. A. W., & Lim, L. L. P. (2017). Palm oil mill effluent treatment using coconut shell – based activated carbon: Adsorption equilibrium and isotherm. *MATEC Web of Conferences*, 87, 03009.

<https://doi.org/10.1051/mateconf/20178703009>

Ding, S. Y., Liu, Y. S., Zeng, Y., Himmel, M. E., Baker, J. O., & Bayer, E. A. (2012). How does plant cell wall nanoscale architecture correlate with enzymatic digestibility? *Science*, 338(6110), 1055-1060. <https://doi.org/10.1126/science.1227491>

Electronics, N. (2023). *What is a supercapacitor*. <https://www.ntchip.com/electronics-news/what-is-a-supercapacitor>

Febrianto, F., Sp, H., Ck, M., & Hidayat, W. (2012). Properties enhancement of rubber wood particleboard laminated with low density polyethylene (ldpe) resin. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kayu Tropis*, 10, 186-194.

Funke, A., & Ziegler, F. (2010). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4, 160-177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>

Goldemberg, J., & Teixeira Coelho, S. (2004). Renewable energy—traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, 32(6), 711-714.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00340-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00340-3)

González-García, P. (2018). Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1393-1414.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.117>

Guo, J., & Lua, A. C. (2002). Textural and Chemical Characterizations of Adsorbent

Prepared from Palm Shell by Potassium Hydroxide Impregnation at Different Stages. *Journal of Colloid and Interface Science*, 254(2), 227-233.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8587>

Haghighi Mood, S., Hossein Golfeshan, A., Tabatabaei, M., Salehi Jouzani, G., Najafi, G. H., Gholami, M., & Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 77-93.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.033>

Hämäläinen, S., Näyhä, A., & Pesonen, H.-L. (2011). Forest biorefineries – A business opportunity for the Finnish forest cluster. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1884-1891. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.01.011>

Huang, G.-g., Liu, Y.-f., Wu, X.-x., & Cai, J.-j. (2019). Activated carbons prepared by the KOH activation of a hydrochar from garlic peel and their CO₂ adsorption performance. *New Carbon Materials*, 34(3), 247-257.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(19\)60014-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1872-5805(19)60014-4)

Husnul Hasanah, S. a. H. A. (2020). Synthesis of Activated Carbon from Waste Tea by KOH Activation as High Performance Supercapacitors Electrodes. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 12(6), 1-7.

Ismanto, A., Wang, S., Edi-Soetaredjo, F., & Ismadji, S. (2010). Preparation of capacitor's electrode from cassava peel waste. *Bioresource Technology*, 101, 3534-3540.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.123>

Jitladda, T. S., & Porntip, R. (2012). Molecular Structure of Natural Rubber and Its Characteristics Based on Recent Evidence. In S. Reda Helmy (Ed.), *Biotechnology* (pp. Ch. 13). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/29820>

Kayhanian, M. (1999). Ammonia Inhibition in High-Solids Biogasification: An Overview and Practical Solutions. *Environmental technology*, 20(4), 355-365.

<https://doi.org/10.1080/09593332008616828>

Khan, T. A., Saud, A. S., Jamari, S. S., Rahim, M. H. A., Park, J.-W., & Kim, H.-J. (2019). Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for carbon rich material preparation: A review. *Biomass and Bioenergy*, 130, 105384.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105384>

- Khandelwal, K., Seraj, S., Nanda, S., Azargohar, R., & Dalai, A. K. (2024). Subcritical water conversion of biomass to biofuels, chemicals and materials: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(5), 2191-2211.
<https://doi.org/10.1007/s10311-024-01750-2>
- Kikuchi, K., Yamashita, R., Sakuragawa, S., Hasumi, K., Mukai, Y., Kobayakawa, H.,...Saito, Y. (2018). Pore structure and the properties of electric double layer capacitor electrode of bamboo-derived activated carbon prepared by superheated steam. *Journal of Wood Science*, 64, 642-649.
- Kögel-Knabner, I. (2002). The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(2), 139-162. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00158-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00158-4)
- Kumar, A., & Jena, H. M. (2017). Adsorption of Cr(VI) from aqueous phase by high surface area activated carbon prepared by chemical activation with ZnCl₂. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 63-71.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.032>
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083-1095.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Li, K., Luo, J., Wei, M., Yao, X., Feng, Q., Ma, X., & Liu, Z. (2022). Functional porous carbon derived from waste eucalyptus bark for toluene adsorption and aqueous symmetric supercapacitors. *Diamond and Related Materials*, 127, 109196.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109196>
- Li, X., Han, C., Chen, X., & Shi, C. (2010). Preparation and performance of straw based activated carbon for supercapacitor in non-aqueous electrolytes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 131(1), 303-309.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2010.01.007>
- Libra, J., Ro, K., & Kammann, C. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals. a comparative review of the chemistry, processes and applicatios of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 89-124.
- Liu, B., Zhou, X., Chen, H., Liu, Y., & Li, H. (2016). Promising porous carbons derived from

- lotus seedpods with outstanding supercapacitance performance. *Electrochimica Acta*, 208, 55-63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.05.020>
- Long, C., Jiang, L., Wu, X., Jiang, Y., Yang, D., Wang, C.,...Fan, Z. (2015). Facile synthesis of functionalized porous carbon with three-dimensional interconnected pore structure for high volumetric performance supercapacitors. *Carbon*, 93, 412-420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.05.040>
- Marakana, P. G., Dey, A., & Saini, B. (2021). Isolation of nanocellulose from lignocellulosic biomass: Synthesis, characterization, modification, and potential applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106606. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106606>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Mokti, N., Borhan, A., Zaine, S. N., & Mohd Zaid, H. F. (2021). Development of Rubber Seed Shell-Activated Carbon Using Impregnated Pyridinium-Based Ionic Liquid for Enhanced CO₂ Adsorption. *Processes*, 9(7).
- Onoji, S., Iyuke, S., Igbafe, A., & Bavon, D. (2016). Rubber seed oil: A potential renewable source of biodiesel for sustainable development in sub-Saharan Africa. *Energy Conversion and Management*, 110, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.002>
- Pagketanang, T., Artnaseaw, A., Wongwicha, P., & Thabuot, M. (2015). Microporous Activated Carbon from KOH-Activation of Rubber Seed-Shells for Application in Capacitor Electrode. *Energy Procedia*, 79, 651-656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.550>
- Phachwisoot, G., Chanthad, C., Nakason, K., Khemthong, P., Youngjan, S., & Panyapinyopol, B. (2023). Preparation of activated carbon as supercapacitor electrode materials from cassava rhizome. 28, 11.
- Phainuphong, S., Taweekun, J., Theppaya, T., & Maliwan, K. (2021). Synthesis and characterization of activated carbon derived from rubberwood sawdust by using KOH/KMnO₄ as multiple function activation agents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1163, 012019. <https://doi.org/10.1088/1757->

[899X/1163/1/012019](https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.07.002)

Ramadhas, A. S., Jayaraj, S., & Muraleedharan, C. (2005). Characterization and effect of using rubber seed oil as fuel in the compression ignition engines. *Renewable Energy*, 30(5), 795-803.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.07.002](https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.07.002)

Rashmi Manipadhy, S., Michalska, M., Krajewski, M., Bochenek, K., Basista, M., Zaszczynska, A.,...Jain, A. (2023). One-step synthesis of a sustainable carbon material for high performance supercapacitor and dye adsorption applications. *Materials Science and Engineering: B*, 297, 116766.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116766](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116766)

Rufford, T. E., Hulicova-Jurcakova, D., Khosla, K., Zhu, Z., & Lu, G. Q. (2010). Microstructure and electrochemical double-layer capacitance of carbon electrodes prepared by zinc chloride activation of sugar cane bagasse. *Journal of Power Sources*, 195(3), 912-918.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.048](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.048)

Scheller, H. V., & Ulvskov, P. (2010). Hemicelluloses. *Annual Review of Plant Biology*, 61(Volume 61, 2010), 263-289. [https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315)

Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E., & Conrad, C. M. (1959). An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal*, 29(10), 786-794.

<https://doi.org/10.1177/004051755902901003>

Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2009). The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon*, 47(9), 2281-2289.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.026](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.026)

Sun, L., Tian, C., Li, M., Meng, X., Wang, L., Wang, R.,...Fu, H. (2013). From coconut shell to porous graphene-like nanosheets for high-power supercapacitors [10.1039/C3TA10897J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(21), 6462-6470.

<https://doi.org/10.1039/C3TA10897J>

Sun, S., Sun, S., Cao, X., & Sun, R. (2016). The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. *Bioresource Technology*, 199,

- 49-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.061>
- Taer, E., Natalia, K., Apriwandi, A., Taslim, R., Agustino, A., & Farma, R. (2020). The synthesis of activated carbon nanofiber electrode made from acacia leaves (*Acacia mangium wild*) as supercapacitors. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 11(2), 025007. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/ab8b60>
- Tamilarasan, E. B., Das, H., & Maiyalagan, T. (2021). Recent Trends in Bimetallic Oxides and Their Composites as Electrode Materials for Supercapacitor Applications. *ChemElectroChem*, 8. <https://doi.org/10.1002/celec.202100098>
- Thornley, P., Chong, K., & Bridgwater, T. (2013). European biorefineries: Implications for land, trade and employment. *Environmental Science & Policy*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.09.004>
- Titirici, M. (2007). A direct synthesis of mesoporous carbons with bicontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization. *Chemistry of Materials*, 19, 4205-4212.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Wang, J., & Kaskel, S. (2012). KOH activation of carbon-based materials for energy storage [10.1039/C2JM34066F]. *Journal of Materials Chemistry*, 22(45), 23710-23725. <https://doi.org/10.1039/C2JM34066F>
- Wu, F.-C., Tseng, R.-L., Hu, C.-C., & Wang, C.-C. (2005). Effects of pore structure and electrolyte on the capacitive characteristics of steam- and KOH-activated carbons for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 144(1), 302-309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.12.020>
- Yadav, M. S. (2020). Metal oxides nanostructure-based electrode materials for supercapacitor application. *Journal of Nanoparticle Research*, 22(12), 367. <https://doi.org/10.1007/s11051-020-05103-2>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12), 1781-1788. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

Zhao, Y., Wang, Y., Liu, Y., Wang, H., & Song, H. (2022). *Preparation of hierarchical porous carbon through one-step KOH activation of coconut shell biomass for high-performance supercapacitor*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1895857/v1>

Zheng, K., Li, Y., Zhu, M., Yu, X., Zhang, M., Shi, L., & Cheng, J. (2017). The porous carbon derived from water hyacinth with well-designed hierarchical structure for supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 366, 270-277.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.034>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580.

<https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Alternative%20Energy%20Development%20Plan%202018-2037%20%28AEDP%202018%29%28TH%29.pdf>

การยางแห่งประเทศไทย. (2560). ยุทธศาสตร์ยางพาราระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560-2579).

<https://km.raot.co.th/uploads/dip/userfiles/%E0%B8%9E%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B9%80%E0%B8%AD.pdf>

สถาบันวิจัยยาง. (2564). คู่มือการปลูกยางพาราในประเทศไทย.

https://www.raot.co.th/article_attach/build.pdf

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายมณฑล ภูเวียงแก้ว

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาข้อไฟฟ้าคาร์บอนกัมมันต์จากชีวมวลสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด

สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

ประวัติ
ประวัติส่วนตัว
ที่อยู่ปัจจุบัน 562 หมู่ 4 ตำบลพนานิคม อำเภอนิคมน้ำอ้น จังหวัดระยอง 21180

ประวัติการศึกษา
ระดับการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น

ประวัติการทำงาน
สถานที่ทำงาน บริษัท แอร์โรคลาส จำกัด 111/1, 111/10 หมู่ 2 ตำบลมะขามคู่ อำเภอนิคมน้ำอ้น จังหวัดระยอง 21180

ฝ่าย Automation and Energy Integration

ตำแหน่งงาน ผู้ช่วยหัวหน้าแผนกพลังงาน, ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานอาวุโส (ผอ.ส.โรงงาน)