

การปรับปรุงถ่านชีวภาพจากผักตบชวาด้วยการฉายรังสี  
เพื่อใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Modification of Water Hyacinth-derived Biochar  
by Radiation for Carbon Dioxide Adsorption

จินตดา พลกล้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การปรับปรุงถ่านชีวภาพจากผักตบชวาด้วยการฉายรังสี  
เพื่อใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

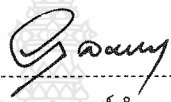
ธินัดดา พลกล้า

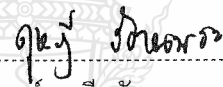
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

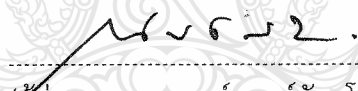
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การปรับปรุงถ่านชีวภาพจากผักตบชวาด้วยการฉายรังสีเพื่อใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์  
Modification of Water Hyacinth-derived Biochar by Radiation for Carbon Dioxide Adsorption

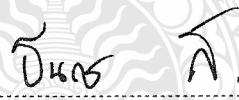
ชื่อ - นามสกุล      นางสาวธินิดดา พลกล้า  
สาขาวิชา      วิศวกรรมวัสดุ  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์วริชฐา ชอบพัฒนา, Ph.D.  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      อาจารย์ธนกร ความหมั่น, Ph.D.  
ปีการศึกษา      2565

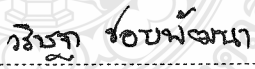
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำนาจ ลากเกษมสุข, วท.ด.)


 ..... กรรมการ  
(อาจารย์ดุขฎิ รัตนพระ, วศ.ด.)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

 ..... กรรมการ  
(อาจารย์ธนกร ความหมั่น, Ph.D.)

 ..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วริชฐา ชอบพัฒนา, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภวสุปรีย์, Ph.D.)  
วันที่ 20 เดือน มกราคม พ.ศ. 2566

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงถ่านชีวภาพจากผักตบชวาด้วยการฉายรังสี เพื่อใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวธินัดดา พลกล้า
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วริษฐา ขอบพัฒนา, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ธนกร ความมั่น, Ph.D.
ปีการศึกษา	2565

### บทคัดย่อ

การกำจัดขยะเหลือทิ้งด้วยวิธีดั้งเดิมส่งผลเสียต่อมลภาวะทางอากาศ ในการวิจัยนี้จึงได้นำผักตบชวามาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ โดยเริ่มจากการปรับสภาพผักตบชวากับรังสีอิเล็กตรอนจากนั้นผักตบชวาก็ถูกเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพโดยการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และปรับปรุงคุณสมบัติด้วยยูเรียผ่านวิธีไฮโดรเทอร์มอล ผลการทดลองพบว่าปริมาณไนโตรเจนของถ่านชีวภาพ เพิ่มขึ้นประมาณ 2-3% หลังจากการเติมยูเรียด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล หลังจากการฉายรังสีที่ 400 kGy ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 152 m<sup>2</sup>/g เป็น 462 m<sup>2</sup>/g แต่อย่างไรก็ตามเคมีพื้นผิวและองค์ประกอบของไนโตรเจนมีผลต่อสภาพความเป็นกรดของถ่านชีวภาพส่งผลให้การดูดซับ CO<sub>2</sub> ลดลง

ตัวอย่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวา (WHBC) ได้นำมาพัฒนาและเปรียบเทียบกับถ่านยูคาลิปตัสจากวิสาหกิจชุมชน เพื่อเพิ่มมูลค่าเศษถ่านเหลือใช้ โดยถูกนำมากระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ และปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีด้วยแอมโมเนียผ่านการฉายรังสีแกมมาและวิธีไฮโดรเทอร์มอล หลังการกระตุ้นและปรับปรุงคุณสมบัติ วิธีไฮโดรเทอร์มอลมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าการฉายรังสีแกมมา อย่างไรก็ตามตัวอย่าง WHAC ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1765.52 m<sup>2</sup>/g ซึ่งมากกว่าวิธีไฮโดรเทอร์มอล และถ่านชีวภาพดั้งเดิม

นอกจากนี้ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ถูกทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 150 ppm ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทำปฏิกิริยาการดูดซับได้ดีที่สุด ตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากสองแหล่ง ชีวมวลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยรังสีแกมมา (WHGAC<sub>N</sub> 565.15 mg/g และ EUGAC<sub>N</sub> 552.16 mg/g) มีแนวโน้มดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีกว่าวิธีไฮโดรเทอร์มอล และถ่านกัมมันต์จากการวิจัยอื่นๆ และไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับทางเคมีแบบชั้นเดียวโดยไม่มีความแตกต่างระหว่างแหล่งชีวมวลทั้งสองประเภท

**คำสำคัญ:** ผักตบชวา, ยูคาลิปตัส, ถ่านชีวภาพ, ถ่านกัมมันต์, รังสีอิเล็กตรอน, รังสีแกมมา, ไฮโดรเทอร์มอล, การดูดซับ CO<sub>2</sub> และสีย้อมเมทิลีนบลู

<b>Thesis Title</b>	Modification of Water Hyacinth-derived Biochar by Radiation for Carbon Dioxide Adsorption
<b>Name - Surname</b>	Miss Tinutda Phonlam
<b>Program</b>	Material Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor. Dr. Varistha Chobpattana, Ph.D.
<b>Thesis Co – advisor</b>	Dr. Tanagorn Kwamman, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2022

### ABSTRACT

The traditional waste incineration negatively affects air pollution. In this research, water hyacinth (WH) was transformed into activated carbon (AC) by different approaches. The process started with electron irradiation. Then, the biomass was converted to biochar (BC) by pyrolysis at 800 °C under nitrogen atmosphere and modified by urea under hydrothermal method. As a result, the urea modification increased the nitrogen content of BC approximately 2-3%. After electron irradiation at 400 kGy, surface area of the BC increased from 152 m<sup>2</sup>/g to 462 m<sup>2</sup>/g. However, the surface chemistry and nitrogen composition had an effect on the acidity of the BC resulting in the decrease in CO<sub>2</sub> adsorption.

WHBC was developed and compared with eucalyptus BC from community enterprises to enhance the value of biochar fragments. Both BCs were activated with potassium hydroxide to form ACs. Then, their chemical properties were modified with ammonium hydroxide through gamma irradiation and hydrothermal methods. After the activation and modification, the hydrothermal method yielded a higher nitrogen content than that of gamma irradiation; however, the WHAC from gamma radiation resulted in a higher surface area of 1765.52 m<sup>2</sup>/g.

Furthermore, AC samples were tested for the adsorption capabilities of methylene blue dye at various concentrations. The results showed that the best adsorption performance was at 150 ppm concentration. The AC samples from different sources under gamma irradiation (WHGAC<sub>N</sub> 565.15 mg/g and EUGAC<sub>N</sub> 552.16 mg/g) exhibited higher adsorption of methylene blue dye than those of the hydrothermal method and other types of BC. In addition, the adsorption isotherms of BC and AC were monolayer chemical adsorption with no distinction between these two biomass sources.

**Keywords:** Water hyacinth, Eucalyptus charcoal, Biochar, Activated carbon, Electron-beam, Gamma irradiation, Carbon dioxide and Methylene adsorption.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วริษฐา ขอบพัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.ธนกร ความมัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ไปจนถึง ดร. อีรพัชร์ ชุติมาสกุล ในการให้คำปรึกษาตั้งแต่หัวข้อ วิทยานิพนธ์ การดำเนินงาน ตลอดจนความรู้ด้านเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง อีกทั้งยังได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งใจและสำนึกใน พระคุณ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ดร. อำนวย ลาภเกษมสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. ดุษฎี รัตพระ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ดร. อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธุ์ กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ชัย โอ เจริญ ประธานหลักสูตรปริญญาโท ที่ได้กรุณาชี้แนะแนวทางและคำแนะนำ เพื่อให้ผู้เขียนได้พัฒนา แนวความคิดและโต้ตอบปัญหา ได้อย่างรอบคอบ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ของเนื้อหา อย่างครบถ้วน

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้าน อุปกรณ์ เครื่องมือในการวิเคราะห์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิเคราะห์ทดสอบ เขียนงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความ ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกระหว่างการดำเนินการวิจัย

ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดี อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และ ขอขอบคุณเจ้าของผลงาน เอกสารและงานวิจัยทุกท่าน ที่ได้ให้ผู้เขียนค้นคว้าได้นำมาอ้างอิงในการวิจัย จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธินัดดา พลกล้า

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ถ่านชีวภาพ (Biochar).....	16
2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon).....	17
2.3 ผักตบชวา (Water Hyacinth).....	18
2.4 ถ่านไม้จากยูคาลิปตัส.....	23
2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process).....	24
2.6 กระบวนการปรับสภาพ และดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี.....	26
2.7 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	31
2.8 กลไกการดูดซับมลพิษของถ่านกัมมันต์.....	33
2.9 เครื่องมือและเทคนิคในการวิเคราะห์.....	34
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	43
3.2 อุปกรณ์ และเคมีภัณฑ์.....	46
3.3 การเตรียมถ่านชีวภาพ.....	47

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การเตรียมถ่านกัมมันต์.....	47
3.5 การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมา.....	48
3.6 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวถ่านกัมมันต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	48
3.7 การศึกษาปริมาณการดูดซับสีย้อม.....	48
3.8 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ.....	49
3.9 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ.....	49
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง.....	51
4.1 วิเคราะห์โครงสร้างชีวมวล หลังผ่านกระบวนการปรับสภาพ.....	51
4.2 วิเคราะห์โครงสร้างถ่านชีวภาพหลังกระบวนการปรับปรุงสมบัติเคมีพื้นผิว.....	56
4.3 วิเคราะห์ผลกระบวนการดูดซับของถ่านชีวภาพ.....	65
4.4 วิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพหลังกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์.....	67
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผล.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
5.3 ต้นทุนการผลิต.....	81
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	99



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเม็ด .....	18
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของผักตบชวาในการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพ .....	20
ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิ กระบวนการกระตุ้น ที่มีผลต่อการดูดซับ CO <sub>2</sub> ของถ่านชีวภาพ.....	42
ตารางที่ 2.4 กระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิว ที่มีผลต่อการดูดซับ MB ของถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์ .....	42
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	43
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซนต์แร่ธาตุในตัวอย่างถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา และยูคาลิปตัส.....	54
ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชีวมวลก่อน-หลังการปรับสภาพด้วย เทคนิค TGA.....	55
ตารางที่ 4.3 การสแกน XPS ตำแหน่งองค์ประกอบเคมีแบบกว้างของถ่านชีวภาพ.....	58
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ได้จาก ผักตบชวา.....	62
ตารางที่ 4.5 โครงสร้างความเป็นรูพรุน และคุณสมบัติพื้นผิวของตัวอย่างถ่านชีวภาพจาก ผักตบชวา.....	64
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของธาตุในถ่านกัมมันต์วิเคราะห์โดยเทคนิค XPS .....	69
ตารางที่ 4.7 โครงสร้างความเป็นรูพรุน และคุณสมบัติพื้นผิวของตัวอย่างถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์ .....	74
ตารางที่ 4.8 ค่าการดูดซับ และไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ที่เวลาสมดุล 24 ชั่วโมง .....	76
ตารางที่ 4.9 แหล่งที่มาของชีวมวล วิธีการดัดแปลง และความสามารถในการดูดซับ MB ของถ่านกัมมันต์ตามการทบทวนวรรณกรรม.....	78

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา.....	17
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์.....	18
รูปที่ 2.3 ผักตบชวาในเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.....	19
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของผักตบชวา .....	21
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกัน ด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก.....	22
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของไซแลน.....	22
รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของ (ก) Trans-coniferyl Alcohol (ข) Trans-p-sinapyl Alcohol และ (ค) Tran-pcoumaryl Alcohol .....	23
รูปที่ 2.8 ถ่านไม้ยูคาลิปตัส.....	24
รูปที่ 2.9 กระบวนการไพโรไลซิส.....	25
รูปที่ 2.10 กระบวนการปรับสภาพของวัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส.....	26
รูปที่ 2.11 กระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิวของถ่านชีวภาพและกัมมันต์.....	27
รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์.....	28
รูปที่ 2.13 กระบวนการฉายรังสีอิเล็กตรอน.....	30
รูปที่ 2.14 โครงสร้างถ่านกัมมันต์หลังดัดแปลงเคมีพื้นผิวด้วยรังสีแกมมา.....	30
รูปที่ 2.15 แรงการกระจาย.....	32
รูปที่ 2.16 แรงไฟฟ้าสถิต .....	32
รูปที่ 2.17 กลไกการดูดซับ .....	33
รูปที่ 2.18 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิว.....	34
รูปที่ 2.19 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	35
รูปที่ 2.20 เครื่องมือวิเคราะห์ผิววัสดุ.....	36
รูปที่ 2.21 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ .....	36
รูปที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	37
รูปที่ 2.23 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทาง ความร้อน .....	38
รูปที่ 2.24 เครื่องรามาน สเปกโตรสโคปี.....	39

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการดำเนินงาน .....	44
รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการดำเนินงาน .....	45
รูปที่ 4.1 กราฟ FTIR ของชีวมวลจากใบผักตบชวา ก่อน-หลังการปรับสภาพด้วยรังสี อเล็คตรอน .....	51
รูปที่ 4.2 กราฟ XRD ของชีวมวลจากใบผักตบชวา ก่อน-หลังการปรับสภาพด้วยรังสี อเล็คตรอน .....	52
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างชีวมวลจากผักตบชวาและการวิเคราะห์ปริมาณสารใน ตัวอย่าง (ก) WH (ข) WH100 (ค) WH200 และ (ง) WH400 .....	53
รูปที่ 4.4 กราฟ TGAการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทาง ความร้อน ของวัสดุชีวมวลจากผักตบชวา (ก) WH (ข) WH100 (ค) WH200 และ (ง) WH400.....	55
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพก่อน-หลังกระบวนการ การตัดแปลงคุณสมบัติเคมีพื้นผิว .....	56
รูปที่ 4.6 รามาน สเปกตรัมของถ่านชีวภาพก่อน-หลังกระบวนการตัดแปลงคุณสมบัติเคมีพื้น ผิวด้วยยูเรีย .....	57
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของไนโตรเจน N1s ในตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านการตัดแปลงเคมี พื้นผิว .....	59
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของไนโตรเจน C1s ในตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านการตัดแปลงเคมี พื้นผิว .....	60
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของไนโตรเจน O1s ในตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านการตัดแปลงเคมี พื้นผิว .....	61
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM แสดงถึงลักษณะพื้นผิวถ่านชีวภาพ หลังกระบวนการตัดแปลงเคมี พื้นผิว (ก) BC (ข) NB (ค) NB100 (ง) NB200 และ (จ) NB400 .....	63
รูปที่ 4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับคายซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา .....	64
รูปที่ 4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CO <sub>2</sub> ของ ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา ที่ 298 K.....	66

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 จุดที่ประจวบเป็นศูนย์ของตัวอย่าง BC และ NB.....	66
รูปที่ 4.14 กราฟ CO <sub>2</sub> -TPD ของตัวอย่าง BC, NB, NB100, NB200 and NB400.....	67
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วย XPS หลังจากการดัดแปลง NH <sub>3</sub> โดย การฉายรังสีแกมมาและวิธีไฮโดรเทอร์มอล (ก) ผักตบชวา และ (ข) ยูคาลิปตัส...	68
รูปที่ 4.16 องค์ประกอบของไนโตรเจน N1s ของ (ก) WHGAC <sub>N</sub> , (ข) WHHAC <sub>N</sub> , (ค) EUGAC <sub>N</sub> , และ (ง) EUHAC <sub>N</sub> .....	69
รูปที่ 4.17 องค์ประกอบของไนโตรเจน O1s ของ (ก) WHGAC <sub>N</sub> , (ข) WHHAC <sub>N</sub> , (ค) EUGAC <sub>N</sub> , และ (ง) EUHAC <sub>N</sub> .....	70
รูปที่ 4.18 องค์ประกอบของไนโตรเจน C1s ของ (ก) WHGAC <sub>N</sub> , (ข) WHHAC <sub>N</sub> , (ค) EUGAC <sub>N</sub> , และ (ง) EUHAC <sub>N</sub> .....	71
รูปที่ 4.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ หลังปรับปรุงสมบัติ (ก) รังสีแกมมา (ข) ไฮโดรเทอร์มอล .....	72
รูปที่ 4.20 ไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนของ (ก) ผักตบชวา และ (ข) ยูคาลิปตัส .....	73
รูปที่ 4.21 จุดที่ประจวบเป็นศูนย์ ของ EUAC, EUGAC <sub>N</sub> , EUHAC <sub>N</sub> , WHAC, WHGAC <sub>N</sub> และ WHHAC <sub>N</sub> .....	75
รูปที่ 4.22 ไอโซเทอร์มสมดุลการดูดซับสี่อ้อมเมทิลีนบลู 24 ชั่วโมง.....	75
รูปที่ 4.23 จลศาสตร์ไอโซเทอร์มการดูดซับของสี่อ้อมเมทิลีนบลู ที่สมดุล 6 ชั่วโมง .....	77
รูปที่ 4.24 ไอโซเทอร์มจลศาสตร์การดูดซับของ (ก) โมเดลลำดับที่หนึ่งเทียม และ (ข) โมเดลลำดับที่สองเทียม .....	77
รูปที่ 5.1 แนวโน้มตลาดโลกของถ่านกัมมันต์ในช่วงปี 2020-2030.....	82
รูปที่ 5.2 แนวโน้มในการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์.....	82
รูปที่ ก.1 ใบผักตบชวา .....	95
รูปที่ ก.2 ผักตบชวาหลังตากแห้งครบสามวัน .....	95
รูปที่ ก.3 ตู้อบแห้งผักตบชวาก่อนการอบด .....	96
รูปที่ ก.4 กระบวนการเตรียมผงผักตบชวา (ก) เครื่องบดใบผักตบชวา (ข) ผงใบผักตบชวา หลังร่อนผ่านตะแกรง 200 เมช.....	96

รูปที่ ก.5 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชีวภาพ .....	97
รูปที่ ก.6 ถ่านกัมมันต์หลังผสม KOH แล้วอบแห้ง 3 วัน.....	97
รูปที่ ก.7 เครื่องเตาเผาปฏิกรณ์.....	98
รูปที่ ก.8 ถ่านกัมมันต์ หลังกระบวนการกระตุ้น .....	98



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ผักตบชวาจัดว่าเป็นวัชพืชทางน้ำที่มีการเจริญเติบโต และแพร่พันธุ์ได้ค่อนข้างรวดเร็ว ทั้งนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมาต่อแหล่งน้ำจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ปริมาณผักตบชวาที่พบมากขึ้นในแม่น้ำลำคลองเป็นสาเหตุหนึ่งที่เกิดน้ำเน่าเสีย ขัดขวางการสัญจรทางน้ำ ซึ่งการกำจัดผักตบชวาในปัจจุบันยังเป็นปัญหา คือเมื่อทำการเผากำจัดทิ้งก็จะนำไปสู่การเกิดมลพิษทางอากาศซ้ำอีกด้วย [1] นับเป็นการสูญเปล่าที่น้ำเสียตายอย่างยิ่ง จึงได้มีการศึกษาคิดค้นหาทางนำส่วนที่ต้องกำจัดทิ้งเหล่านี้มาทำให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่าหลายๆ แนวทาง [2] และหนึ่งในนั้นก็คือ การนำผักตบชวามาพัฒนาเป็นถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับมลพิษ นอกจากนี้เศษถ่านยูคาลิปตัสที่เหลือใช้จากชุมชนก็เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่ประกอบไปด้วยเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ค่อนข้างสูง [3] ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้เช่นเดียวกัน และที่สำคัญหาง่าย และต้นทุนต่ำ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอนที่ 0, 100, 200, และ 400 kGy จากนั้นเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสเป็นถ่านชีวภาพ และปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีด้วยยูเรีย ถ่านชีวภาพจากผักตบชวาและถ่านยูคาลิปตัสจะถูกนำมาศึกษาพัฒนาต่อยอดโดยการเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านกัมมันต์ จนไปถึงวิธีการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีพื้นผิวด้วยกระบวนการฉายรังสีแกมมา และวิธีไฮโดเทอร์มอลเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของผักตบชวาและเศษถ่านจากชุมชนมากขึ้น เนื่องจากปัจจุบันนี้การศึกษาวิจัยจะมุ่งเน้นให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก หากนำเอาแนวคิดการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการรักษาสิ่งแวดล้อมเข้ามามีส่วนร่วม ก็จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อองค์กรและสังคมเป็นอย่างมาก [1]

ถ่านชีวภาพ (Biochar) และถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นวัสดุที่อุดมไปด้วยคาร์บอนที่ได้จากการบำบัดความร้อนในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย ความคล้ายของถ่านชีวภาพกับถ่านกัมมันต์ คือ การผลิตผ่านกระบวนการไพโรไลซิส รวมถึงพื้นที่ผิวขนาดใหญ่กลางถึงสูงจนได้ผลิตภัณฑ์สีดำที่มีความเป็นรูพรุน โดยวัตถุดิบต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง (ปกติถ่านชีวภาพสูงกว่า ร้อยละ 45, ถ่านกัมมันต์สูงกว่า ร้อยละ 65) และมีปริมาณสารระเหยต่ำ [4] วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ ได้แก่ วัสดุชีวมวล และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือวัชพืชเหลือทิ้งทางสิ่งแวดล้อม เป็นต้น [2] งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนาและดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีของถ่านชีวภาพเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ในการดูดซับมลพิษ โดยใช้กระบวนการทางรังสี และกระบวนการไฮโดเทอร์มอล ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อ

สิ่งแวดล้อม ผักตบชวา และเศษถ่านจากชุมชนจะถูกเตรียมในสภาวะต่างๆ โดยผ่านกระบวนการดัดแปลงคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยกรรมวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จะต้องมีกระบวนการกระตุ้นเพื่อปรับสภาพพื้นผิว โดยการนำถ่านชีวภาพไปกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ 800 องศาเซลเซียส จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำเงา จากนั้นถ่านกัมมันต์ทั้งสองมีการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยการเติมหมู่ไนโตรเจนลงในโครงสร้าง โดยเน้นไปที่การใช้สารไนโตรเจนตั้งต้นที่ไม่รุนแรง และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ในกระบวนการดูดซับ ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับเคมีพื้นผิวและโครงสร้างรูพรุน วิธีการกระตุ้นและลักษณะของสารตั้งต้นที่ใช้มีอิทธิพลอย่างมาก ต่อกลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวและโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนั้นจุดสนใจหลักของนักวิจัยคือการพัฒนาหรือปรับเปลี่ยนเทคนิคการดัดแปลงให้อยู่ในลักษณะที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้สารตั้งต้นที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มศักยภาพของถ่านกัมมันต์สำหรับสารปนเปื้อนจำเพาะ ซึ่งวิธีการดัดแปลงต่างๆ เช่น การบำบัดด้วยกรด, การบำบัดด้วยเบส, การบำบัดด้วยการทำให้ชุ่ม, การบำบัดโอโซน, การบำบัดลดแรงตึงผิว, พลาสมา และการบำบัดด้วยไมโครเวฟ ต่างมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาถ่านกัมมันต์ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานตามความเหมาะสม ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในด้านการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของของถ่านกัมมันต์เพื่อควบคุมมลพิษ โดยการปรับปรุงเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ให้อุดมไปด้วยกลุ่มฟังก์ชันไนโตรเจน และออกซิเจน โดยองค์ประกอบเหล่านี้จะสร้างปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ และสารที่ถูกดูดซับ

ถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเตรียมจะถูกนำมาศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ คือ เทคนิคการวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Brunauer-Emmett-Teller) เทคนิครามาน สเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer)

การศึกษาทางเคมีประกอบด้วย เทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) เทคนิควิเคราะห์ผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy) เทคนิควิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Elemental Analyzer) เทคนิคดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Adsorption) และเทคนิคการดูดซับสีย้อม (Dye Adsorption)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา และยูคาลิปตัส โดยการดัดแปลงโครงสร้างเคมีด้วยไนโตรเจน ภายใต้กระบวนการทางรังสีและวิธีไฮโดรเทอร์มอล เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับมลพิษ

1.2.2 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้ผักตบชวาในการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์จากบริเวณพื้นที่ ตำบล คลองหก จังหวัดปทุมธานี

1.3.2 เพิ่มมูลค่าเศษถ่านเหลือใช้จากชุมชน ในเขตพื้นที่ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก

1.3.2 ใช้กระบวนการปรับปรุงสภาพ และดัดแปลงโครงสร้างเคมี ด้วยเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือ การฉายรังสีรังสีอิเล็กตรอน แกมมา และวิธีไฮโดรเทอร์มอล

1.3.3 ดัดแปลงโครงสร้างเคมี และคุณสมบัติของถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์โดยการเติมหมู่ไนโตรเจนลงในโครงสร้าง โดยเน้นไปที่การใช้สารไนโตรเจนตั้งต้นที่ไม่รุนแรง และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ยูเรีย และแอมโมเนีย

1.3.4 คุณสมบัติที่ได้ คือ พื้นที่ผิว รูพรุน และคุณสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับมลพิษ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา และยูคาลิปตัสด้วยการดัดแปลงโครงสร้างเคมีทางรังสี และไฮโดรเทอร์มอล เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับมลพิษ

1.4.2 ได้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์

1.4.3 ได้เพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงถ่านชีวภาพจากผักตบชวาด้วยการฉายรังสี เพื่อใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุชีวภาพเหลือทิ้งและเศษถ่านเหลือใช้จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชน โดยใช้กระบวนการปรับเปลี่ยนเคมีพื้นผิวด้วยกระบวนการทางรังสี และวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

#### 2.1 ถ่านชีวภาพ (Biochar)

ถ่านชีวภาพ เป็นการผลิตโดยการให้ความร้อนแก่มวลชีวภาพ เช่น ไม้ที่นำไปเผาในเตาอบ ตั้งแต่อุณหภูมิปานกลางไปจนถึงอุณหภูมิที่สูงมาก โดยวัสดุที่นิยมนำมาเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น กิ่งไม้ ใบไม้ ใบหญ้า ชานอ้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด มันสำปะหลัง มูลสัตว์ หรือกลุ่มกากตะกอนของเสีย เป็นต้น มาผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและจำกัดอากาศเพื่อไม่ให้มีออกซิเจน หรือมีน้อย ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ นี้ เรียกว่า “การแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส” [5]

ถ่านชีวภาพ มีความต่างจากถ่านหุงต้มทั่วไป ตรงที่การนำไปใช้ประโยชน์ คือ ถ่านทั่วไปมักถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ในขณะที่ถ่านชีวภาพ เป็นถ่านชนิดหนึ่งที่ได้ฝังลงในดินซึ่งทำหน้าที่เป็นสารอาหารให้แก่พืช หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปุ๋ย ในการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพ ปริมาณของคาร์บอนส่วนใหญ่ที่ได้จะขึ้นกับชนิดของมวลชีวภาพนั้นๆ สำหรับในส่วนของอุณหภูมิจะมีผลค่อนข้างมากกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ โดยส่วนใหญ่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสขึ้นไปจะพบพื้นที่ผิวและปริมาตรความเป็นรูพรุนสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ [2]

ลักษณะทางกายภาพอย่างหนึ่งที่แตกต่างกัน คือ ถ่านชีวภาพนั้นจะมีสีดำเป็นเงา เบา เปลวไฟสีน้ำเงินติดไฟได้ง่าย มีปริมาณชื้นแฉะน้อยสีขาวอมเทา และถ่านทั่วไปมีสีดำความเป็นเงาน้อยกว่า ถ่านชีวภาพเปลวไฟสีออกส้ม มีปริมาณชื้นแฉะมากสีน้ำตาลอมเทา [6]



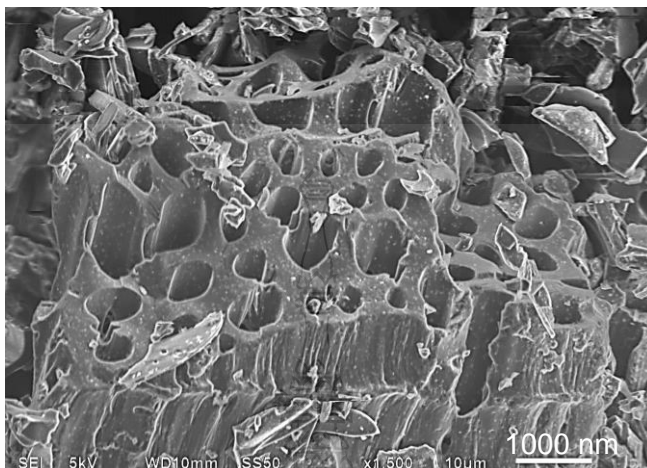
รูปที่ 2.1 ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

## 2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากของเสียทางสิ่งแวดล้อมที่มีปริมาณคาร์บอนสูง วัสดุลิกโนเซลลูโลส และถ่านหินเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้ววิธีในการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบไปด้วยสองวิธี คือการเปิดใช้งานทางกายภาพและการเปิดใช้งานทางเคมี หลังผ่านกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์มีศักยภาพที่ดีในการดูดซับโลหะหนักหรือมลพิษอื่นๆ เนื่องจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการเป็นรูพรุนขนาดเล็ก และมีความซับซ้อนทางโครงสร้างเคมีเหมาะแก่การนำไปเป็นตัวดูดซับ ส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ของถ่านกัมมันต์จะอยู่ในรูปแบบคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous Carbon) ซึ่งจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนประมาณร้อยละ 80 – 90 และธาตุอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน เป็นองค์ประกอบรวมเพียงเล็กน้อย [5,6] ในส่วนของพื้นที่ผิว (Surface Area) มีค่าประมาณ 600 ไปจนถึงมากกว่า 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม ( $m^2/g$ ) และเป็นลักษณะรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (รูปที่ 2.2) โดยปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) มีค่าประมาณ 0.20 ถึงมากกว่า 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ( $cm^3/g$ ) ซึ่งทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลตั้งต้นและกระบวนการกระตุ้นร่วมด้วย [7]

ถ่านกัมมันต์สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเกล็ด (Granular) มีขนาดประมาณ 1 – 5 mm และชนิดผง (Powder) มีขนาดประมาณ 15 – 25  $\mu m$  ซึ่งทั้งสองมีการนำมาใช้งานจริงอย่างแพร่หลาย [8] ตามคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเกล็ด ประเทศไทยมีการกำหนดค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ (มอก.900 – 2547) แสดงในตารางที่ 2.1 [9] จากที่เห็นความสามารถในการดูดซับสูงและถูกนำมาใช้บำบัดสารมลพิษในน้ำ ส่วนหนึ่งก็มาจากคุณลักษณะดังกล่าว [7] เช่น ถ่านกัมมันต์จากต้นกกใช้กำจัดกลุ่มฟีนอลที่ละลายอยู่ในน้ำ [10] ถ่านกัมมันต์จากแกนผลมะกอกในการบำบัดสีย้อม [11] สารฆ่าแมลงและศัตรูพืชถูกกำจัดโดยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลัม

[12] ถ่านกัมมันต์จากเปลือกปาล์ม และกะลามะพร้าวสามารถดูดซับกลุ่มโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว [13,14] จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุบดตั้งต้นที่ได้รับความสนใจเพื่อใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือ กลุ่มวัสดุพืชเหลือทิ้ง และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพที่แสดงถึงโครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ในส่วนของชนิดผงและเกล็ด

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์มาตรฐานกำหนด	
		ชนิดผง	ชนิดเกล็ด
1	ความหนาแน่นปรากฏ ( $\text{g/cm}^3$ )	0.20 ถึง 0.75	$\geq 0.20$
2	ค่าไอโอดีน	$\geq 600$	$\geq 600$
3	ค่าความแข็ง (ร้อยละ)	-	$\geq 70$
4	ค่าความชื้น (ร้อยละ)	-	$\leq 8$

ที่มา : [9]

### 2.3 ผักตบชวา (Water Hyacinth)

ผักตบชวา *Pontederia crassipes* (ชื่อเดิมคือ *Eichhornia crassipes*) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Water hyacinth เป็นพืชน้ำที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ และมักจะรุกรานออกพื้นที่การเกษตร ผักตบชวาเป็นพืชน้ำยืนต้นลอยตัวอิสระบนผิวน้ำ ด้วยใบรูปไข่ที่กว้าง หนา เป็นมัน ผักตบชวาอาจโผล่ขึ้นมาเหนือผิวน้ำได้สูงถึง 1 เมตร (3 ฟุต) ใบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 – 20 ซม. (4–8 นิ้ว) บนลำต้นจะมีกระเปาะที่ช่วยพยุงให้ลอยเหนือน้ำได้ ส่วนรากที่ห้อยลงมาในน้ำมีลักษณะเหมือนขนนกสีม่วงดำ ก้านตั้งตรงรองรับดอก 8 - 15 ดอก ส่วนใหญ่ดอกจะมีสีชมพูทุกกลีบ ผักตบชวาจะเพิ่มจำนวนมากกว่า

ร่อยเท่าในเวลาเพียง 23 วัน นอกจากนี้ ยังสามารถผลิตเมล็ดพืชได้หลายพันเมล็ดในแต่ละปี และเมล็ดเหล่านี้สามารถคงอยู่ได้นานกว่า 28 ปี ส่วนใหญ่ผักตบชวามีความทนทานต่อทุกสภาพแวดล้อม และยังสามารถทนต่อความแห้งแล้งได้ดี แต่ถึงอย่างไรก็ตาม มักจะไม่ทนต่อสภาพน้ำเค็ม [15]



### รูปที่ 2.3 ผักตบชวาในเขตพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปัจจุบันผักตบชวাজัดอยู่ในกลุ่มวัชพืชต่างถิ่น (Invasive Species) ที่เกิดการแพร่ระบาดอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศของประเทศไทย และต่างประเทศอย่างมาก โดยปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งในภาคการเกษตร การชลประทาน และสุขภาพอนามัย ทำให้หลายหน่วยงานไม่สามารถควบคุมวัชพืชรุกรานดังกล่าวได้ดีนัก [15] และในต่างประเทศยังพบว่าผักตบชวาอาจส่งผลกระทบต่อสารเคมีของแพลงก์ตอนพืช พืชที่จมอยู่ใต้น้ำ และสาหร่าย โดยเป็นสาเหตุการยับยั้งการเจริญเติบโตของสิ่งแวดล้อมในน้ำ และกระบวนการสลายตัวทำให้ออกซิเจนที่ละลายในน้ำหมดไป ซึ่งมักจะทำให้ปลาตาย

#### 2.3.1 ปัญหาที่เกิดจากผักตบชวา

2.3.1.1 เป็นอุปสรรคอย่างมากที่ทำให้การสัญจรทางเรือเป็นไปได้ยาก เนื่องจากเกิดการกีดขวางตามผิวน้ำจำนวนมาก

2.3.1.2 เป็นแหล่งพาหะนำโรคของสัตว์ขนาดเล็ก เช่น หอยโข่งที่เป็นพาหะนำโรคพยาธิใบไม้ในตับ และยังเป็นแหล่งอาศัยของพวกยุงลาย

2.3.1.3 ผักตบชวาไปลดการไหลของน้ำลงประมาณ ร้อยละ 40 เนื่องจากเป็นอุปสรรคต่อการระบายน้ำในแม่น้ำลำคลองต่างๆ

2.3.1.4 ปริมาณของผักตบชวาที่ลอยอยู่บนผิวน้ำอย่างหนาแน่นทำการปิดกั้นแหล่งอาหารทำให้หมู่ปลาไม่ค่อยเจริญเติบโต

2.3.1.5 แพผักตบชวาเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของศัตรูพืชนานาชนิดที่ลูกลามจะไปแย่งน้ำและอาหารจากพืชปลูก เช่น หนอนและศัตรูพืชอื่นๆ [15]

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผักตบชวาเป็นวัชพืชที่เป็นปัญหามลภาวะทางน้ำที่อาจส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศได้อีกด้วย การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้มีการนำผักตบชวาซึ่งเป็นชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสที่โดยทั่วไปถูกจัดเป็นวัชพืชเหลือทิ้งที่ทำลายระบบนิเวศ และเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ในส่วนของใบลำต้น และรากจำเป็นจะต้องหาทางกำจัดทำลายทิ้ง [16] เกษตรกรมักใช้วิธีการเผาเพื่อทำลายซึ่งส่วนแต่เป็นการสร้างมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อมทั้งทางน้ำ และทางอากาศทั้งสิ้น จึงได้มีการคิดค้นการเพิ่มมูลค่าของสิ่งที่จะต้องกำจัดทิ้งเหล่านี้มาทำให้เกิดประโยชน์ [17] และหนึ่งในนั้นก็คือ การนำผักตบชวามาใช้ให้เกิดมูลค่าทางเศรษฐกิจมากขึ้น โดยถูกพัฒนาเป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และมลพิษทางน้ำ ซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่สามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งอย่างอื่นอีกด้วย

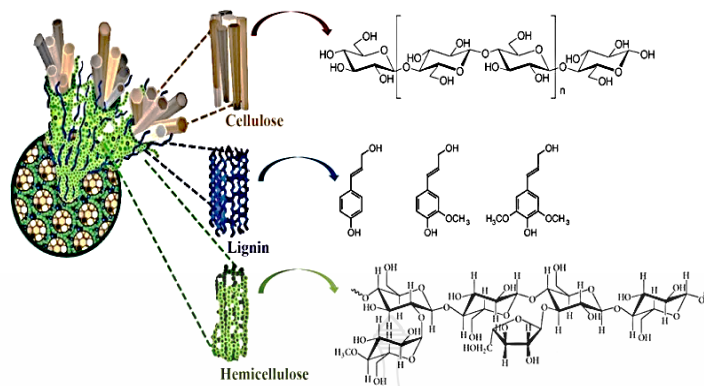
## ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบที่สำคัญของผักตบชวาในการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์

ลำดับที่	องค์ประกอบ	ร้อยละต่อน้ำหนักแห้ง
1	เซลลูโลส	18
2	ลิกนิน	8
3	เฮมิเซลลูโลส	48
4	คาร์บอน	31 - 47
5	เถ้า	2 - 10

ที่มา : [18]

องค์ประกอบของผักตบชวาที่เป็นชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส (ดังแสดงในตารางที่ 2.2) มีอัตราส่วนโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปพบเฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 20 - 30 ลิกนิน ร้อยละ 15 - 30 และเซลลูโลส ร้อยละ 15 - 60 [19]





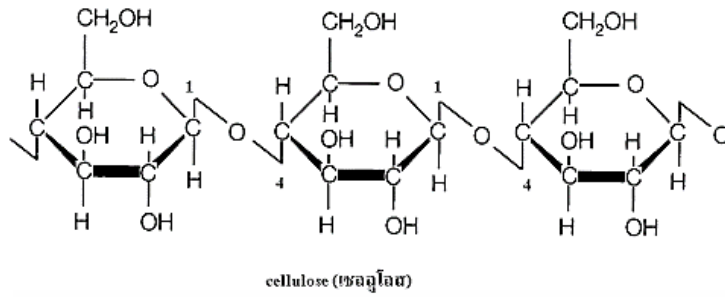
## รูปที่ 2.4 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของผักตบชวา

ที่มา : [20]

### 2.3.2 ลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลสเป็นวัสดุตั้งต้นที่สำคัญในการผลิตสารตั้งต้นทางชีวภาพจำนวนมากที่ใช้เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค ซึ่งเต็มไปด้วยโครงสร้างทางธรรมชาติที่หลากหลาย แต่ที่พบมากที่สุดประกอบไปด้วย ลิกนิน เซลลูโลส และเอมิเซลลูโลส ได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้ง ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มไม้เนื้ออ่อนหรือไม้เนื้อแข็ง เศษวัสดุทางการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และพวกฟางข้าว รวมไปถึงขยะที่ได้จากกระบวนการแปรรูปอาหาร มูลสัตว์ และวัชพืชต่างๆ [20]

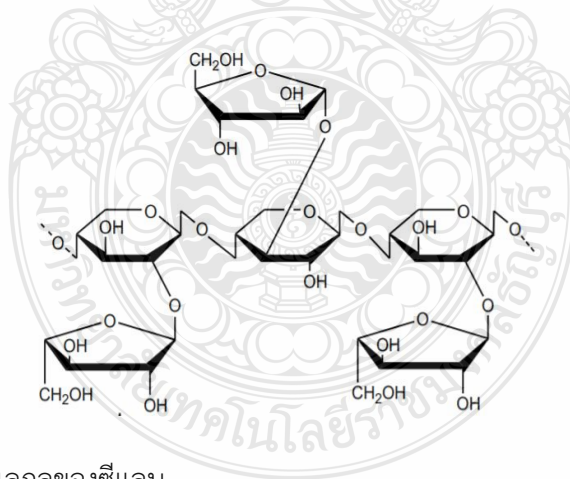
2.3.2.1 เซลลูโลส (Cellulose) เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยสายโซ่กลูแคนเชิงเส้นที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4-ไกลโคซิดิก ยึดกันไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล [21] เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบโครงสร้างที่สำคัญของผนังเซลล์ปฐมภูมิของพืชสีเขียว สำหรับหลายชนิด และโอไมซีท แบคทีเรียบางชนิดหลังเซลลูโลสออกมาเพื่อสร้างฟิล์มชีวภาพ ซึ่งเปรียบเสมือนพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีอยู่มากที่สุดในโลก ปริมาณเซลลูโลสของใยฝ้ายคือ 90% ไม้ 40 – 50% และป่านแห้งประมาณ 57% ส่วนใหญ่มักจะใช้ในการผลิตกระดาษแข็ง และกระดาษตั้งต้นสำหรับแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น กระดาษแก้วและเรยอน การเปลี่ยนเซลลูโลสจากพืชพลังงานเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานเอทานอลอยู่ระหว่างการพัฒนาเพื่อเป็นแหล่งเชื้อเพลิงหมุนเวียนโดยทั่วไปแล้วโครงสร้างแบบ Amorphous Cellulose จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ได้ง่ายกว่า Crystalline Cellulose สำหรับโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส แสดงในรูปที่ 2.5 [21]



รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างเคมีของเซลลูโลส ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก

ที่มา : [22]

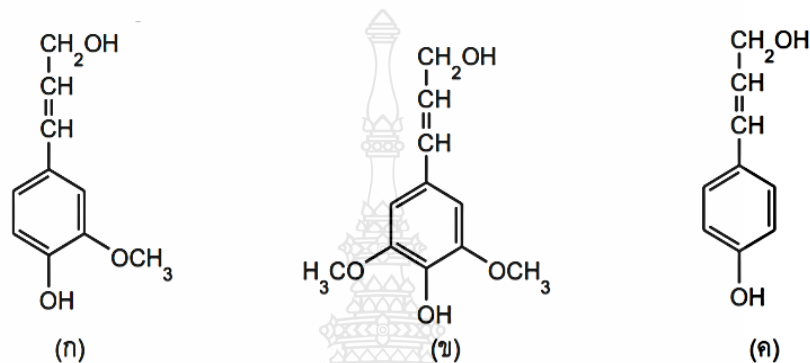
2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) หรือที่เรียกว่าพอลิโอส เป็นหนึ่งในจำนวนของเฮเทอโรพอลิเมอร์ (เมทริกซ์พอลิแซคคาไรด์) เช่น อะราบิโนซีแลน ซึ่งพบร่วมกับเซลลูโลสในผนังเซลล์ของพืชบนบกเกือบทั้งหมด เซลลูโลสมีลักษณะเป็นผลึก แข็งแรง และทนต่อการไฮโดรไลซิส แต่เฮมิเซลลูโลสจะมีการแตกแขนงกิ่งก้านสาขา และยังมีแนวโน้มที่จะตกผลึกอีกด้วย สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ด้วยกรดเจือจางหรือเบสเช่นเดียวกับเอนไซม์เฮมิเซลลูเลส สำหรับโครงสร้างทางเคมีของซีแลน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [20]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของซีแลน

ที่มา : [23]

2.3.2.3 ลิกนิน (Lignin) เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์เชิงซ้อนชนิดหนึ่ง ที่สร้างวัสดุโครงสร้างหลักในเนื้อเยื่อพวงของพืช ส่วนใหญ่ลิกนินมีความสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างผนังเซลล์ โดยเฉพาะในเนื้อไม้และเปลือกไม้ เนื่องจากสารเหล่านี้ให้ความแข็งแรงและไม่เน่าเสียง่าย ในทางเคมี ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากสารตั้งต้นฟีนอลที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมโยง โดยโครงสร้างที่เชื่อมโยงแบบ 3 มิติ ประกอบด้วย Trans-coniferyl Alcohol, Trans-p-sinapyl Alcohol และ Tran-p-coumaryl Alcohol ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [20]



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของ (ก) Trans-coniferyl Alcohol (ข) Trans-p-sinapyl Alcohol และ (ค) Tran-p-coumaryl Alcohol

ที่มา : [23]

## 2.4 ถ่านไม้จากยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัส เป็นพืชที่มีเปลือกที่เรียบ เป็นเส้นๆ และมีความแข็ง ใบมีต่อมน้ำมัน กลีบเลี้ยงและกลีบดอกเชื่อมกันเป็น "หมวก" และมีผลคล้ายแคบซูลที่เรียกกันทั่วไปว่า "กัมมันท์" ยูคาลิปตัสส่วนใหญ่มิถินกำเนิดในออสเตรเลีย และในบริเวณเขตพื้นที่ป่าจะพบประมาณสามในสี่เป็นป่ายูคาลิปตัส การนำไม้เนื้อแข็งมาเผาเป็นถ่านในประเทศไทยค่อนข้างได้รับความนิยม เนื่องจากต้องใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม และนอกเหนือจากถ่านแบบก้อนที่ได้จากการเก็บเกี่ยวและนำไปขาย จะเห็นว่าเศษถ่านเหลือทิ้งจำนวนมากที่ยังเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ และไม่สามารถนำไปใช้งานอย่างอื่นได้ แต่ก็เห็นว่า มีงานวิจัยบางกลุ่มนำเศษถ่านเหล่านี้ไปบดแล้วนำมาทำเป็นถ่านขึ้นรูป เพื่อสร้างค่าความร้อนที่ดีมากขึ้นสำหรับทำเป็นเชื้อเพลิง แต่ถึงอย่างไรก็ตามถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง [24] จึงเหมาะที่จะนำมากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับมลพิษทางน้ำ หรือตัวเก็บประจุ เป็นต้น ดังนั้นเพื่อส่งเสริมการพัฒนาเศษวัสดุเหลือใช้ในชุมชนที่มีอยู่มากใช้ให้เป็นประโยชน์ จึงมีการศึกษาวิจัยนำ



เศษถ่านยูคาลิปตัสที่เหลือทิ้งจากการนำไปขายมาเพิ่มมูลค่าเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยการปรับปรุงสมบัติพื้นที่ผิว สำหรับนำไปใช้การดูดซับสารต่างๆ ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า



รูปที่ 2.8 ถ่านไม้ยูคาลิปตัส

## 2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process)

กระบวนการไพโรไลซิส (หรือ Devolatilization) คือการสลายตัวด้วยความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมักจะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน โดยเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น การไพโรไลซิสมักใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ เป็นหนึ่งในกระบวนการที่เกี่ยวข้องในการเผาไหม้ โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิสของสารอินทรีย์จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้และทิ้งถ่านซึ่งเป็นกากของแข็งที่อุดมไปด้วยคาร์บอน และเมื่อมีการจำกัดไม่ให้มีออกซิเจนจะเรียกว่าคาร์บอนเซชันไพโรไลซิส ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์คาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ กระบวนการไพโรไลซิสจะแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) [25]

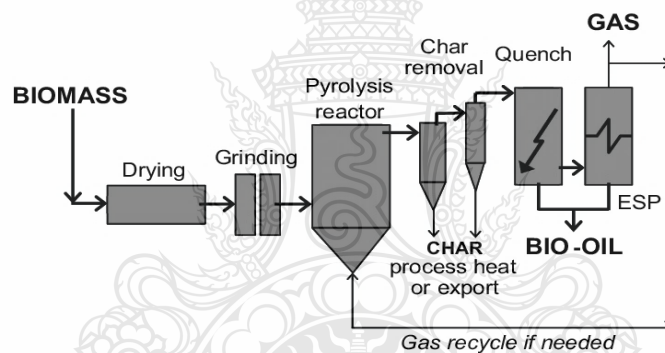
### 2.5.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้านิยมนำมาให้ความร้อนแก่ชีวมวล จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำมีรูพรุนสูง เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือถ่านชีวภาพ วัสดุที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านเฉลี่ยประมาณ 2 มิลลิเมตร และการทำงานปฏิกิริยาจะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 5 - 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที การใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 400-600 องศาเซลเซียสมีผลต่อการสร้างพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของคาร์บอน เช่น ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มในการได้ผลิตภัณฑ์ที่มีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนมากขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตามผลเสียที่ตามมาคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาในรูปแบบถ่านหรือผลิตภัณฑ์น้อยกว่ากระบวนการที่ใช้สภาวะอุณหภูมิต่ำๆ ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจาก

กระบวนการดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบถ่าน ร้อยละ 25 - 35 และของเหลวร้อยละ 30 - 50 นอกจากนี้ การไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการย่อย คือ ไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional Pyrolysis) และคาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization Pyrolysis) [25]

### 2.5.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว วัตถุดิบตั้งต้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาอยู่ระหว่าง 400 – 650 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะได้ออกมาเป็นน้ำมัน ไอไพโรไลซิส และไอน้ำที่ได้จากการสลายตัวจากความร้อน จากนั้นจะใช้เวลาเพียง 1 – 2 วินาที ที่ไอน้ำดังกล่าวจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลว เมื่อวัตถุดิบเป็นชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของแข็งร้อยละ 15 - 25 ก๊าซไม่กลั่นตัวร้อยละ 10 – 15 และของเหลว เช่น น้ำมันชีวภาพ ร้อยละ 60 - 75 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลตั้งต้น ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงและสารเคมีหลายประเภทจึงมักใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว [25]



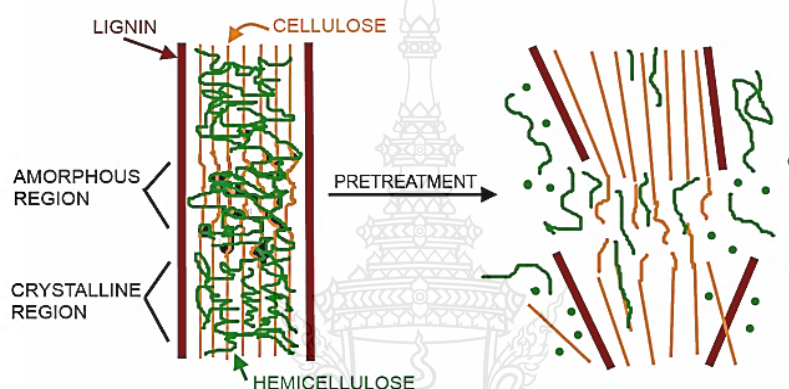
รูปที่ 2.9 กระบวนการไพโรไลซิส

ที่มา : [14]

ผลิตภัณฑ์ถ่านที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถนำมาใช้ในรูปแบบของเชื้อเพลิงหรือถ่านชีวภาพได้ ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และสภาวะในการเผาไหม้ เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะต้องไม่มีสารเคมีปนเปื้อนใดๆ หรือได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพที่นิยมกันทั่วไป เช่น ประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ หรือใช้ในการกักเก็บคาร์บอนลงดิน [25]

## 2.6 กระบวนการปรับสภาพและกระบวนการตัดแปลงโครงสร้างทางเคมี

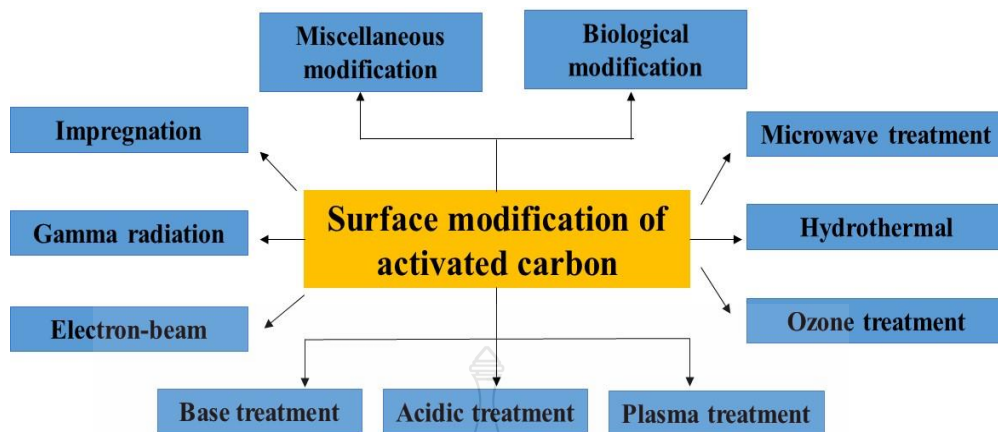
การปรับสภาพ เป็นการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสให้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพขั้นสูง หรือเรียกว่าเป็นกระบวนการย่อยเซลลูโลสเป็นน้ำตาล [10] ซึ่งขั้นตอนการปรับสภาพจะไปเพิ่มความไวของเซลลูโลสต่อการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ อย่างไรก็ตามวัตถุดิบตั้งต้นของลิกโนเซลลูโลส ทำให้วิธีการปรับสภาพมีความเหมาะสมแตกต่างกันออกไป วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือการปรับสภาพ เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลส และลิกนินออก เพื่อเข้าถึงโครงสร้างเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเพื่อผลิตที่ดีของถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนการปรับสภาพจึงมีความจำเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.10 กระบวนการปรับสภาพของวัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส

ที่มา : [26]

กระบวนการตัดแปลงเคมีพื้นผิว คือ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ของถ่านกัมมันต์เพื่อช่วยให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะของการนำไปใช้งาน ดังนั้นการตัดแปลงโครงสร้างเคมีพื้นผิวจึงถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีความเหมาะสม หากมีการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับมลพิษ [27] ซึ่งการตัดแปลงเคมีพื้นผิวจะเกี่ยวข้องกับการเกิดออกซิเดชันและเกิดการเพิ่มแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเคมีบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ เพื่อสร้างหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ตามตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา (เช่น กรดคาร์บอกซิลิก เอมีน เป็นต้น) การเกิดออกซิเดชันสามารถทำได้โดยการตัดแปลงทางเคมี [27,28] เช่น ออกซิเดชันในอากาศ [28], ออกซิเดชันด้วยไฟฟ้าเคมี [29] และพลาสมา [30] หรือโอโซนบำบัด [31] นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้อีกด้วย กระบวนการตัดแปลงโครงสร้างทางกายภาพ และเคมีของถ่านกัมมันต์แสดงดังรูปที่ 2.11 ดังนี้

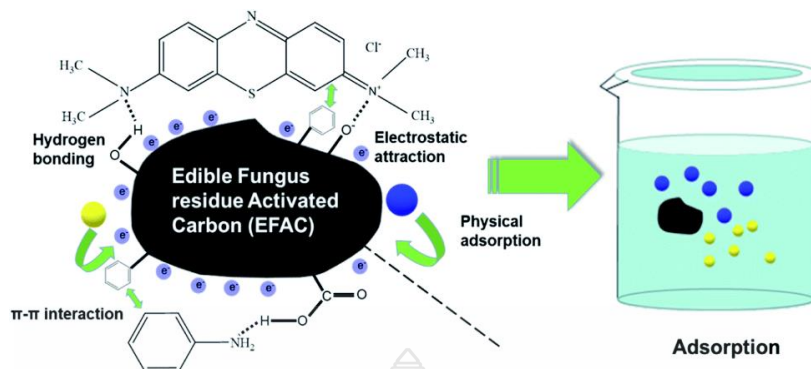


รูปที่ 2.11 กระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิวของถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์

2.6.1 วิธีบำบัดด้วยกรด (Acidic Treatment) การบำบัดด้วยกรดของคาร์บอน มักใช้ในการออกซิไดซ์พื้นผิวคาร์บอน ซึ่งจะไปช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนพื้นผิวคาร์บอน ทำให้พื้นผิวของคาร์บอนเต็มไปด้วยกลุ่มไฮโดรฟิลิก เป็นลักษณะของกลุ่มที่ชอบน้ำ [32] กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเป็นกรดที่มีการใช้ในการบำบัดอย่างแพร่หลายที่สุด วัตถุประสงค์ของการใช้กรด คือจะทำให้หมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบนพื้นผิวคาร์บอนที่สามารถบริจาคโปรตอนประจวบกับกลุ่มโลหะหนักที่มีแนวโน้มที่จะก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุลบ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า การบำบัดด้วยกรดอาจส่งผลกระทบต่อ การลดลงของพื้นที่ผิวและปริมาตรความเป็นรูพรุน [26]

2.6.2 การบำบัดด้วยเบส (Base Treatment) การบำบัดด้วยเบส (อัลคาไลน์) ของถ่านกัมมันต์ จะทำให้เกิดประจุที่พื้นผิวเป็นบวกซึ่งจะช่วยให้การดูดซับสารที่ก่อให้เกิดมลพิษชนิดที่มีประจุลบได้ วิธีที่ง่ายที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนด้วยคุณสมบัติพื้นผิวพื้นฐานคือการรักษาที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) [33] การบำบัดถ่านกัมมันต์ด้วย  $\text{NH}_3$  ที่ 400–900 องศาเซลเซียสจะนำไปสู่การก่อตัวของไนโตรเจนที่เป็นฟังก์ชันพื้นฐานของ เอไมด์ เอมีน อะโรมาติก และโปรตอนเอไมด์ [34] ซึ่งทั้งหมดนี้จะถูกผลิตขึ้นที่อุณหภูมิ 400–600 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ Pyridine-type เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยเสริมโครงสร้างอะโรมาติกบนพื้นผิวคาร์บอน [35] กลุ่มที่มีไนโตรเจน โดยทั่วไปจะสามารถเพิ่มปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลคาร์บอนที่มีรูพรุนและโครงสร้างเป็นกรด เช่น ไตโพล-ไตโพล พันธะไฮโดรเจน พันธะโควาเลนต์ และอื่นๆ นอกจากนี้ภายใต้สภาวะอัลคาไลน์ คาดว่า OH จะทำปฏิกิริยากับกลุ่มฟังก์ชันพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ มีประโยชน์ในการเพิ่มการดูดซับสารอินทรีย์โดยเฉพาะฟีนอลจากน้ำ [26]





รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์

ที่มา : [11]

2.6.3 Impregnation เป็นการบำบัดที่สามารถกำหนดให้เป็นการกระจายแบบละเอียดของสารเคมี หรืออนุภาคโลหะในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยเป็นการชุบถ่านกัมมันต์กับโลหะ เช่น เงิน ทองแดง อะลูมิเนียม และเหล็ก [36] ซึ่งกำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับที่สูงอย่างเห็นได้ชัด ถ่านกัมมันต์ที่ชุบแล้วได้แสดงให้เห็นศักยภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้นต่อฟลูออไรด์ ไซยาไนต์ และสารโลหะหนัก เช่น สารหนูในน้ำ

2.6.4 การบำบัดด้วยไมโครเวฟ (Microwave Treatment) เป็นการปรับเปลี่ยนถ่านกัมมันต์โดยการแผ่รังสีไมโครเวฟซึ่งได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากความสามารถในการให้ความร้อนที่ระดับโมเลกุลที่นำไปสู่ปฏิกิริยาทางความร้อนที่เป็นเนื้อเดียวกันและรวดเร็ว [37] เมื่อเทียบกับการให้ความร้อนแบบทั่วไป การบำบัดด้วยไมโครเวฟมีข้อดีหลายประการ เช่น พลังงานไมโครเวฟทำให้ความร้อนวัสดุจากภายในสู่ภายนอก ไม่จำเป็นต้องพาความร้อนผ่านของเหลว พลังงานไมโครเวฟให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ไม่มีการสัมผัสโดยตรงระหว่างแหล่งความร้อนไมโครเวฟกับแหล่งความร้อนวัสดุ ความสะดวกในการควบคุมกระบวนการทำความร้อน ความสามารถที่อุณหภูมิสูง ประหยัดเวลาและพลังงาน และการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น

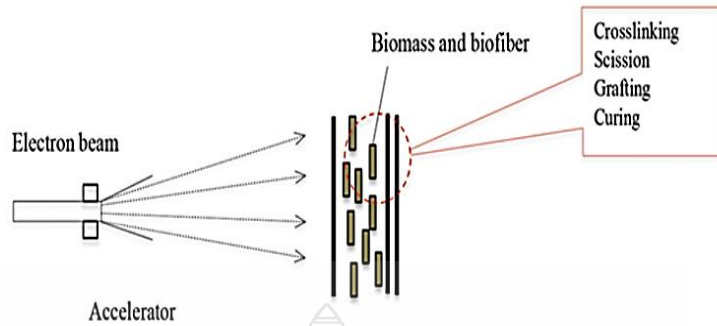
2.6.5 การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone Treatment) สารออกซิแดนซ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดชนิดหนึ่งคือโอโซนสำหรับการแยกสารอินทรีย์ที่เป็นพิษที่มีอยู่ในน้ำ เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการเสนอการใช้โอโซนให้เป็นทางเลือกในการบำบัดถ่านกัมมันต์ [38] โดยความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพที่สูง [39,40] นอกจากการดูดซับจะเพิ่มประสิทธิภาพแล้ว ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและสารที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ยังสามารถผลิตแร่ในลักษณะอินทรีย์วัตถุได้

2.6.6 การบำบัดด้วยพลาสมา (Plasma Treatment) การเกิดออกซิเดชันในพลาสมา เป็นกระบวนการที่ถ่านกัมมันต์สัมผัสกับพลาสมาภายใต้สุญญากาศหรือความดันบรรยากาศในที่มี อากาศหมุนรอบหรือออกซิเจน อย่างไรก็ตามจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ในระหว่างการออกซิเดชันในพลาสมา จะเป็นการเพิ่มความเป็นกรดของพื้นผิวคาร์บอน เนื่องจากการเติมสารเคมีของออกซิเจนไปยังพื้นผิวคาร์บอนจะส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระของ ออกซิเจนอย่างรุนแรงบนอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ทีพื้นผิวรอบข้างของชั้นคาร์บอน หรือกราฟีน [26]

2.6.7 การดัดแปลงทางชีวภาพ (Biological Modification) เป็นการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ ดัดแปลงทางชีวภาพสำหรับการกำจัดมลพิษทางน้ำ ซึ่งในกระบวนการนี้แบคทีเรียที่อยู่ภายในเซลล์จะ ถูกกระตุ้นภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ และสารอาหารอินทรีย์ เพื่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพอย่างหนึ่งของกระบวนการทางชีวภาพคืออายุการใช้งานของคาร์บอนสามารถให้ย่อยสลาย ได้ทางชีวภาพ [41]

2.6.8 การดัดแปลงอื่นๆ (Miscellaneous Modification) เป็นวิธีที่นอกจากวิธีการ ดังกล่าวข้างต้น โดยถ่านกัมมันต์จะได้รับการปรับเปลี่ยนโครงสร้างโดยใช้สารเคมีอื่นๆ บางส่วนของ วิธีการเหล่านี้คือ ความเป็นไปได้ของถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปลงโดยสารลดแรงตึงผิวไอออนิกสำหรับกำจัด Cr (VI) จากสารละลายในน้ำ [42] มีรายงานโดยนักวิจัยกล่าวว่า ถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปลงโดย Hexade Cytrimethylammonium มีความสามารถในการดูดซับ Cr (VI) สูงขึ้นมากกว่าที่ดัดแปลงโดยเซทิลไพริดีนียม

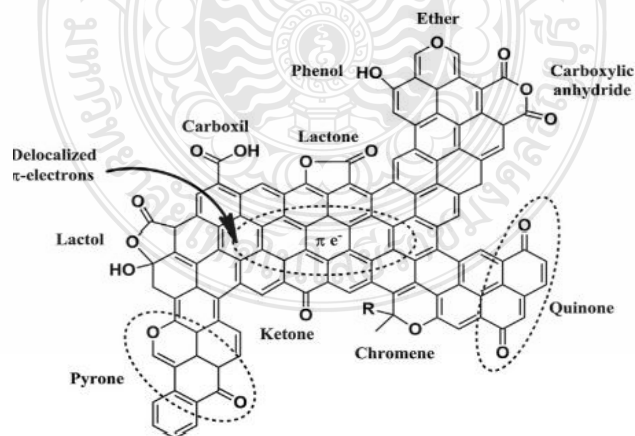
2.6.9 ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron-beam) กระบวนการฉายรังสีอิเล็กตรอน (Electron-beam Radiation Processing) คือกระบวนการสังเคราะห์ชีวมวลที่มีสมบัติเด่นเฉพาะทาง ภายภาพและทางเคมี เมื่อชีวมวลได้รับรังสีจะเกิดปฏิกิริยาการเกิดโครงสร้างแบบต่อกิ่ง (Graft Polymerization) การเกิดโครงสร้างแบบเชื่อมโยงข้าม (Crosslinking) หรือการทำให้แตกสลายและเกิดการ ขาดของสายโซ่โมเลกุล (Degradation and Scission) ซึ่งลักษณะการเกิดโครงสร้างมักขึ้นอยู่กับชนิดของ ชีวมวลและปริมาณรังสี ส่วนใหญ่การเลือกใช้รังสีจะต้องพิจารณาหรือเลือกสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่ เหมาะสมกับชีวมวลนั้นๆ ด้วย เช่น ปริมาณรังสีรวม (Total Dose) และอัตราปริมาณรังสี (Dose Rate) พลังงานจากรังสีจะทำให้ชีวมวลเกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ ซึ่งชีวมวลที่พบโครงสร้างของลิกนินต่ำกว่า รังสี อาจจะไปทำปฏิกิริยากับสายโซ่ของเซลลูโลสได้ดีกว่า เป็นต้น รังสีอิเล็กตรอนสามารถเกิดปฏิกิริยากับ มอนอเมอร์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้สารเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ช่วยลดปัญหาการปนเปื้อน และเหมาะกับการ ใช้งานเฉพาะเจาะจง ในการสังเคราะห์สารเพื่อดูดซับโลหะชนิดต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [43,44]



รูปที่ 2.13 กระบวนการฉายรังสีอิเล็กตรอน

ที่มา : [44]

2.6.10 รังสีแกมมา (Gamma Ray,  $\gamma$ -ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นสั้น (น้อยกว่า 10-13 นาโนเมตร) รังสีแกมมามีพลังงานสูงที่สุดในบรรดาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด ในกระบวนการฉายรังสีนั้น รังสีแกมมาถูกปลดปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีได้แก่ โคบอลต์-60 หรือซีเซียม-137 การฉายรังสีแกมมามีจุดเด่นที่เหนือกว่าการทำไร้เชื้อวิธีอื่นๆ หลายประการ คือ มีความสามารถในการแพร่ผ่านได้สูง ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่ำ และระดับของสารตกค้างที่ตรวจได้ต่ำ โมเลกุลของน้ำแยกตัวออกเป็นตัวออกซิไดซ์ (ไฮดรอกซิลเรดิคัลและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์  $\cdot\text{OH}$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และรีดิกทีฟ (อิเล็กตรอนไฮเดรตและไฮโดรเจนเรดิคัล  $e_{aq}^-$  และ  $\text{H}\cdot$ ) เมื่อสัมผัสกับรังสีแกมมา [45]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างถ่านกัมมันต์หลังปรับปรุงคุณสมบัติด้วยรังสีแกมมา

ที่มา : [46]

2.6.11 กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Processes) เป็นการสังเคราะห์วัสดุด้วยความร้อน และเป็นเทคนิคที่สามารถเกิดการตกผลึกของสารละลายภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ระยะเวลา (1 - 48 ชั่วโมง) ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ (180 - 300 องศาเซลเซียส) และความดันสูง (ความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ) วิธีไฮโดรเทอร์มอลเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างชีวมวลให้เหมาะสมกับรูปแบบการนำไปใช้งาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นของแข็งที่มีคาร์บอนสูง และมีโครงสร้างของสารตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเข้ามาจากเดิม เช่น หากมีการปรับปรุงโครงสร้างพื้นผิวด้วยการเติมหมู่ไฮดรอกซิล จะพบว่ามีโครงสร้างพื้นผิว และความเป็นรูพรุนของชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงไป และมีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะมีสมบัติแตกต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดของชีวมวลเริ่มต้น และตัวเร่งปฏิกิริยา [47-48]

กระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องทราบถึงชนิดโครงสร้างทางเคมี และองค์ประกอบอื่นๆ ของการนำไปใช้งาน แล้วจึงทำการเลือกกระบวนการที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิว และความเป็นรูพรุน และประสิทธิภาพในการดูดซับ

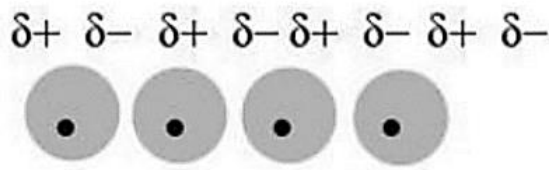
## 2.7 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับคือการยึดเกาะของอะตอมระหว่างไอออน หรือโมเลกุลจากก๊าซ ของเหลว หรือของแข็งที่ละลายอยู่บนพื้นผิวดูดซับ โดยที่สารถูกดูดซับจะถูกละลายหรือซึมผ่านของเหลวหรือของแข็งของตัวดูดซับ ในขณะที่การประสิทธิภาพจะเกี่ยวข้องกับพื้นผิว และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของวัสดุ กระบวนการดูดซับนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [50]

### 2.7.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เกิดขึ้นโดยการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) [50] เป็นแรงปฏิสัมพันธ์อย่างอ่อนที่ เกิดบนพื้นฐานของแรงแวนเดอร์วาลส์ (~10–100 meV) ถึงแม้จะเป็นการดูดซับอย่างอ่อน แต่ตามธรรมชาติแล้วการดูดซับทางกายภาพก็มีบทบาทสำคัญ ตัวอย่างเช่น แรงดึงดูดของแวนเดอร์วาลส์ระหว่างพื้นผิวและขนขนาดเล็กบนเท้าของตุ๊กแก ทำให้สามารถปีนขึ้นไปบนกำแพงแนวตั้งได้อย่างน่าทึ่ง การยึดระหว่างพันธะด้วยแรงกระจาย แสดงในรูปที่ 2.15

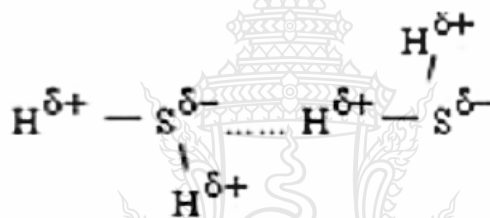




รูปที่ 2.15 แรงการกระจาย

ที่มา : [50]

แรงไฟฟ้าสถิต เป็นแรงในกลุ่มโมเลกุล (สารประกอบโคเวเลนต์) ที่มีขั้วแต่ไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนโดยขั้วที่ต่างกันจะเกิดแรงดึงดูดกันอย่างอ่อนๆ [50] ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แรงไฟฟ้าสถิต

ที่มา : [50]

การดูดซับทางกายภาพเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ง่ายหรือสามารถฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับได้ง่าย เนื่องจากเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนจึงมีการคายพลังงานความร้อนค่อนข้างน้อยหรือต่ำกว่า 20 k/mole โดยส่วนใหญ่การดูดซับจะเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Multilayer) และในจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ สำหรับสารดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับมีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ ถ่านชีวภาพ ซีโอไลต์ ซิลิกาเจล แกรไฟต์และอัลคาไรต์ เป็นต้น [50]

### 2.7.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับชนิดหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวกับตัวดูดซับ โดยอาจจะเป็นปฏิกิริยาการเกิดไฟฟ้าสถิตระหว่างโครงสร้างอะตอมหรือโมเลกุลของพันธะโคเวเลนต์หรือไอออนิก ทำให้มีการคายพลังงานความร้อนออกมาค่อนข้างสูงประมาณ 50 - 400 kJ/mole ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไปทำลายโครงสร้างเดิมของสารดูดซับทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น สำหรับสารดูดซับที่

นิยมนำมาใช้ในการดูดซับทางเคมี มีหลายชนิด เช่น สารละลายลิเทียม และสารละลายแคลเซียม เป็นต้น [50]

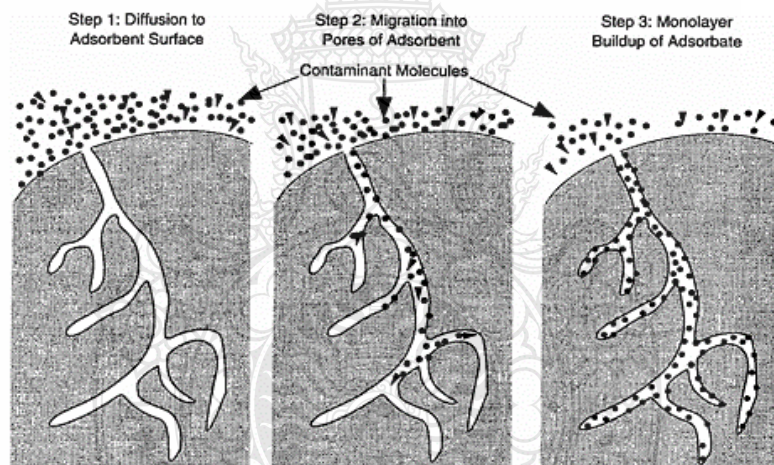
## 2.8 กลไกการดูดซับมลพิษ

2.8.1 กระบวนการดูดซับของกลุ่มคาร์บอนมี 3 ขั้นตอน หลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.17

2.8.1.1 ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะทำการแพร่ไปยังผิวสัมผัสภายนอกของตัวดูดซับ

2.8.1.2 ขั้นตอนที่ 2 จากนั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนขนาดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอนุภาคสารที่ถูกดูดซับ

2.8.1.3 ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเริ่มเข้าไปเกาะติดและเรียงตัวกันเป็นชั้นๆ ภายในรูพรุนของตัวดูดซับจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว [50]



รูปที่ 2.17 กลไกการดูดซับของถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์

ที่มา : [50]

2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับมีดังนี้

2.8.2.1 อุณหภูมิ คือ ตัวดูดซับจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงเมื่ออยู่ในอุณหภูมิต่ำๆ แต่หากอุณหภูมิสูงๆ ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง

2.8.2.2 พื้นที่ผิวสัมผัส คือ การดูดซับจะมากขึ้นแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว

2.8.2.3 ความดัน คือ ที่ความดันของก๊าซสูงๆ โมเลกุลสารจะถูกอัดตัวเข้าตามรูพรุนได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซของตัวดูดซับสูงขึ้นตามไปด้วย

2.8.2.4 อัตราการไหลของก๊าซ คือ ตัวดูดซับจะดูดซับก๊าซได้ดีในสภาวะการไหลผ่านของก๊าซช้าๆ เนื่องจากพื้นผิวตัวดูดซับจะสัมผัสได้นานมากกว่าอัตราการไหลของก๊าซที่มีความเร็ว [50]

## 2.9 เครื่องมือและเทคนิคในการวิเคราะห์

### 2.9.1 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นที่ผิว Brunauer-Emmett-Teller (BET)

การวิเคราะห์ BET เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่ให้ข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับพื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายรูพรุนของวัสดุประเภทของแข็ง [51] วิธีกรรมนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์วัสดุของแข็งหลายประเภทตั้งแต่กลุ่มผงตัวเร่งปฏิกิริยาไปจนถึงวัสดุคาร์บอน ทฤษฎีของ BET จะเป็นการนำตัวอย่างไปใช้กับระบบดูดซับหลายชั้นซึ่งโดยปกติจะใช้ก๊าซตรวจวัด ซึ่งก๊าซดังกล่าวจะไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับตัวดูดซับ ในส่วนวัสดุที่ก๊าซเกาะติดและเฟสของก๊าซจะเรียกว่าตัวดูดซับ ในการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับก๊าซที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับพื้นผิวโพรบ ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์ BET ตามมาตรฐานมักดำเนินการที่อุณหภูมิ  $N_2$  (77 K)

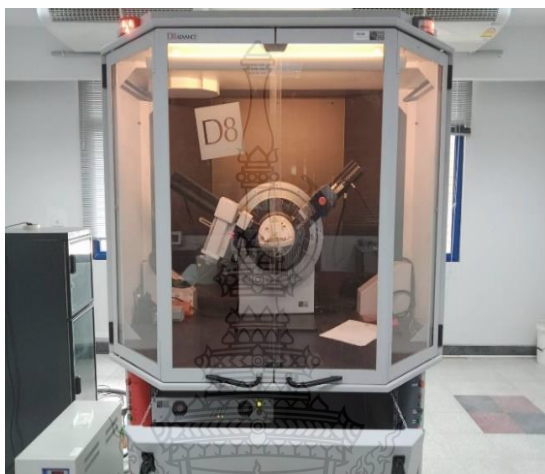


รูปที่ 2.18 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นที่ผิว

### 2.9.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง (เก็บตัวอย่างกลับได้) อีกทั้งยังบอกรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก หรือองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้ ในการวิเคราะห์ XRD รังสีเอ็กซ์ที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกปรับให้เข้าไปใกล้กับ

ตัวอย่าง เมื่อเกิดปฏิสัมพันธ์ของรังสีที่ตกกระทบกับตัวอย่างจะสร้างรังสีที่เลี้ยวเบน ซึ่งจะถูกตรวจจับ ประมวลผล และนับความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนที่กระจายไปตามมุมต่างๆ ของวัสดุ [52] นอกจากนี้ เทคนิค XRD สามารถวิเคราะห์วัสดุได้หลากหลาย เช่น พอลิเมอร์ที่สร้างผลึกได้ เช่น แก้ว โลหะ แร่ธาตุ เซมิคอนดักเตอร์ ตลอดจนโมเลกุลอินทรีย์ อินทรีย์ และชีวภาพต่างๆ ดังนั้นเทคนิค XRD จึงเป็นศาสตร์พื้นฐานที่จำเป็นในการพัฒนาสาขาวิทยาศาสตร์มากมาย



รูปที่ 2.19 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

### 2.9.3 เทคนิควิเคราะห์ผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

เทคนิค XPS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์วัสดุในเชิงปริมาณที่มีความไวต่อพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัยหลักโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ ซึ่งสามารถระบอบองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ภายในวัสดุได้ ตลอดจนสถานะทางเคมีของวัสดุนั้น และยังสามารถระบุโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์โดยรวมและความหนาแน่นของสถานะได้เช่นเดียวกัน เทคนิค XPS จึงเหมาะที่จะนำมาระบุชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ โดยทั่วไปมักถูกนำมาวิเคราะห์วัสดุหลากหลายชนิด เช่น สารกึ่งตัวนำ โลหะ เซรามิกส์ แก้ว กระจก ฟัน ผ้า เป็นต้น [53]



รูปที่ 2.20 เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ  
ที่มา : [53]

#### 2.9.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)

เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อวัดหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุ หลังผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี หรือสามารถตรวจวัดเพื่อระบุได้ว่าโครงสร้างทางเคมีที่เกิดขึ้นมีลักษณะการสั่นโมเลกุลแบบไหน แล้วใช้หลักการเทียบข้อมูลเพื่อสันนิษฐานหมู่ฟังก์ชันในสารนั้นได้ [52] สเปกตรัมจะถูกระบุอยู่ในช่วงคลื่นที่ต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งถือได้ว่ามีความละเอียดสูง อย่างไรก็ตามกระบวนการทางคณิตศาสตร์ จำเป็นต้องแปลงข้อมูลดิบเพื่อสร้างเป็นสเปกตรัมจริง



รูปที่ 2.21 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์



## 2.9.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่ง que สร้างภาพของตัวอย่างโดยการสแกนพื้นผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน ทำให้เกิดสัญญาณต่างๆ ที่มีข้อมูลเกี่ยวกับพื้นผิวและองค์ประกอบของตัวอย่าง ลำแสงอิเล็กตรอนจะถูกสแกนในรูปแบบแรสเตอร์ สแกน และตำแหน่งของลำแสงจะรวมกับความเข้มของสัญญาณที่ตรวจพบเพื่อสร้างขึ้นมาเป็นรูปภาพ โดยสัญญาณจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบด้วย โดยทั่วไปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยาย 6 -1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ถึงไมโครเมตร [52] และการวิเคราะห์ SEM บางตัวสามารถบรรลุความละเอียดได้ดีกว่า 1 นาโนเมตร



รูปที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา : [52]

## 2.9.6 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

เทคนิค TGA เป็นเทคนิควิเคราะห์ความหนาแน่นของน้ำหนักตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยจะวัดการสูญเสียมวลอย่างต่อเนื่องในสภาวะนั้นๆ หรือเรียกได้ว่าเป็นการวิเคราะห์น้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ นอกจากนี้เครื่อง TGA นี้ยังศึกษาสมบัติแม่เหล็ก เช่น Curie point temperature ได้ด้วย [51] ในการวิเคราะห์ ตัวอย่างจะถูกเตรียมประมาณ 50 ไมโครกรัม บนจานขนาดเล็ก จากนั้นนำเข้าไปวางที่เครื่องซึ่งละเอียดที่มีอยู่ในตัวเครื่อง โดยที่สภาวะทั้งหมดจะถูกควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน โดยการสูญเสียน้ำหนักของ

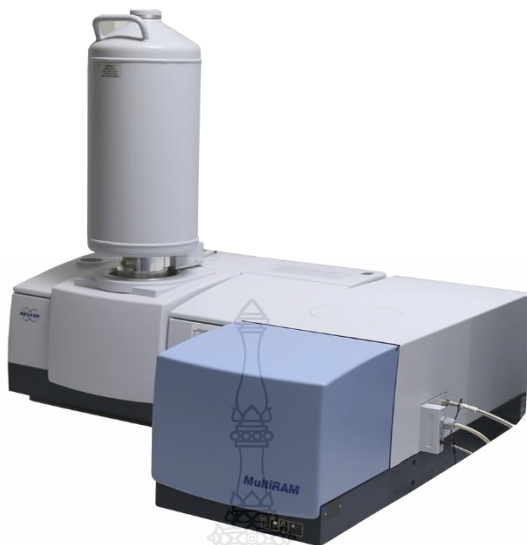
วัสดุจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่แตกต่างกันไปของแต่ละชนิดด้วย การสูญเสียดังกล่าวเกิดจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ



รูปที่ 2.23 เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน

#### 2.9.7 เครื่องรามาน สเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

รามานสเปกโตรสโคปี เป็นเทคนิคที่ใช้โดยทั่วไปเพื่อหาโหมดการสั่นของโมเลกุล ระบบจะสังเกตโหมดการหมุนและโหมดความถี่ต่ำอื่นๆ ได้ และยังสามารถวิเคราะห์ถึงลักษณะรูปแบบของคาร์บอนได้ เช่น โครงสร้างแบบผลึก หรือโครงสร้างอสัณฐาน แต่ส่วนใหญ่แล้วรามานสเปกโตรสโคปีมักถูกใช้ในวิชาเคมีเพื่อระบุโครงสร้างของ fingerprints ที่สามารถระบุถึงโมเลกุลได้ ในกรณีการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของสาร โดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การกระจายตัวของฟังก์ชันในตัวอย่าง จะเป็นการวัดค่าพลังงานที่กระเจิงออกอันเกิดจากการสั่นของโมเลกุล ซึ่งสามารถตรวจสอบตัวอย่างได้ทั้งชนิดของแข็ง ของเหลว และผง และยังเป็นเทคนิคที่ใช้ทดสอบตัวอย่างเพื่อการควบคุมคุณภาพได้ทั้งในห้องปฏิบัติการหรือในกระบวนการผลิตได้ [52]



รูปที่ 2.24 เครื่องรามาาน สเปกโตรสโคปี  
ที่มา : [52]

2.9.8 เทคนิคการดูดซับสีย้อม (Dye Adsorption) เป็นเทคนิคที่เกิดขึ้นทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ซึ่งมีให้เห็นอยู่มากมาย และใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งตามหลักการแล้วจะเกิดจากกลไกได้หลายแบบ เช่น การดูดซับผ่านพื้นที่ผิว รูพรุน การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน การยึดเหนี่ยวด้วยพันธะไฮโดรเจน และความมีขั้วหรือไม่มีขั้วของวัสดุ เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดนี้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับที่เป็นเฟสของเหลว และถ่านชีวภาพหรือถ่านกัมมันต์ที่เป็นเฟสของแข็ง ส่วนใหญ่จะอาศัยหลักการอธิบายโดยใช้ทฤษฎีไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) วัสดุแต่ละชนิดจะแสดงพฤติกรรมดูดซับที่แตกต่างกันออกไปด้วย [72]

2.9.9 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ ที่เกิดปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เป็นแก๊ส และตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง เช่น ถ่านชีวภาพ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มักจะเกิดขึ้นที่บริเวณรูพรุนระดับไมโครพอร์ เนื่องจากอนุภาคของแก๊สมีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้ประสิทธิภาพการดูดซับเป็นไปได้ดีในสภาพพื้นผิวถ่านชีวภาพที่มีความเป็นเบสมากกว่ากรด การดูดซับเป็นกลไกที่สามารถย้อนกลับได้ในธรรมชาติ ซึ่งสมดุลสามารถไปข้างหน้าหรือย้อนกลับได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง [72]



## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.10.1 ผลกระทบของปริมาณรังสีอิเล็กตรอนต่อโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส

Sarosi และคณะ ศึกษาการปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอน โดยพบว่าสามารถควบคุมการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสได้ เช่น เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส แต่ในส่วนของลิกนินอาจจะต้องพิจารณาที่ปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นถึง 1200 kGy [54] เนื่องจากโครงสร้างของลิกนินประกอบไปด้วยหน่วยฟีนอลิกที่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างและคุณสมบัติมีความเสถียร หมู่ไฮดรอกซิลที่ไม่มีอีเทอร์บนวงแหวนอะโรมาติกเป็นส่วนจำเป็นสำหรับฤทธิ์ด้านการเกิดอนุมูลอิสระของลิกนิน เพราะก่อตัวเป็นลักษณะโครงสร้างของควินอยด์ (Quinoid) ที่เสถียรผ่านตัวกลางในรูปแบบอนุมูลอิสระของฟีนอกซี (Phenoxy Radical Intermediates) ดังนั้นปริมาณรังสีอิเล็กตรอนในช่วง 200 -1000 kGy จะสามารถทำให้โครงสร้างลิกนินเสื่อมสภาพได้ในบางส่วนเท่านั้น โดยจะเสื่อมสภาพเฉพาะเฟสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่เฟสที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงส่วนใหญ่สายโซ่โมเลกุลจะเกิดการควบแน่นเชื่อมโยงเป็นตาข่าย อย่างไรก็ตาม ปริมาณรังสีต่ำ 1-25 kGy สามารถใช้เพื่อลดระดับพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization, DP) ของเซลลูโลสได้ปานกลาง ในปริมาณรังสีที่สูงขึ้น 50-1000 kGy, สามารถลดความยาวเฉลี่ยของสายโซ่เซลลูโลสเป็นหน่วยสั้นๆ ได้ดี [54]

### 2.10.2 กระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์

Soudani และคณะ รายงานการเกิดออกซิเดชันของถ่านกัมมันต์ (AC) โดยผ่านการต้มโดยใช้  $\text{HNO}_3$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{HNO}_3$  ปริมาณกลุ่มฟังก์ชันที่เป็นกรดทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรความเป็นรูพรุนลดลง และยังมีรายงานเพิ่มเติมว่าการดัดแปลงโครงสร้างพื้นฐานด้วยแอมโมเนียหรือยูเรียสามารถสร้างกลุ่มที่มีไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีคุณสมบัติพื้นฐานในการเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวของ AC และโมเลกุลที่มีประจุบวก [55]

Przepiorski และคณะ ศึกษาปัจจัยในการใช้อุณหภูมิสำหรับดัดแปลงโครงสร้างเคมีพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยแอมโมเนีย พบว่าที่อุณหภูมิ 700 °C เพิ่มความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้สูงที่สุด ต่อมา Stavropoulos และคณะยังรายงานต่อไปอีกว่า การดัดแปลง AC โดยการบำบัดด้วยยูเรียสามารถสร้างอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอล [56]

Ang และคณะ พบว่าการดัดแปลงพื้นผิวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้น้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 200 °C ทำให้ปริมาตรรูพรุนของถ่านชีวภาพลดลง ต่อมา Sun และคณะ ได้ศึกษาการดัดแปลงแผ่นนาโนกราฟีน โดยใช้ยูเรียภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล พบว่าไนโตรเจนอะตอมชนิดไพโรลิก (Pyrrolic-nitrogen) และควอเตอร์นารี (Quaternary-nitrogen) เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มอล

160 -180 °C อย่างไรก็ตาม ปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนจะค่อยๆ ลดลงเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง [57]

Thurakitsee และคณะ ศึกษาผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อผนังท่อนาโน ที่ดัดแปลงเคมีพื้นผิวด้วยไนโตรเจน (SWCNT) และพบว่าเมื่อปริมาณการฉายรังสีเพิ่มขึ้นจาก 0 – 50 kGy ไนโตรเจนแบบไพริไดนิกและแกรไฟต์มีความโดดเด่นมากขึ้น [58]

### 2.10.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ CO<sub>2</sub> และสีย้อมเมทิลีนบลู

Shahkarami และคณะ [59] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพด้วยชีวมวลที่แตกต่างกัน คือ ไม้เนื้อแข็ง (Whitewood) และถั่วเหลือง (Soybean) ใช้สภาวะในการเผาไหม้เดียวกันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แต่ถ่านชีวภาพจากไม้เนื้อแข็ง (Whitewood) มีการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นที่ผิวโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam Activation) พบว่า ถ่านชีวภาพที่ได้รับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้พื้นที่ผิวถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นถึง 1400 m<sup>2</sup>/g และสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 78 mg/g ต่อมา Castilla และคณะ [27] ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพจากเปลือกของวอลนัท (Walnut Shell) ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่ 900 องศาเซลเซียส พบว่า ได้ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิว 397.0 m<sup>2</sup>/g และสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 72.6 mg/g แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างอะตอมและส่วนประกอบของไนโตรเจนก็มีความสำคัญในแง่ของประสิทธิภาพการดูดซับ CO<sub>2</sub> โดย Li และคณะ [60] รายงานว่าโครงสร้างกราฟไฟท์ไนโตรเจนในสัดส่วนที่สูงมักจะทำให้พื้นผิววัสดุดูดซับกลายเป็นกรด ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ CO<sub>2</sub> ลดลงจากตารางที่ 2.3 และ 2.4 จะเห็นได้ว่าการดูดซับ CO<sub>2</sub> และ Methylene blue สอดคล้องกันในเรื่องการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและปริมาตรความเป็นรูพรุน แต่ในทางตรงกันข้ามกลุ่มฟังก์ชันหรือองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ บนพื้นผิวก็มีความสำคัญเป็นอย่างมาก

**ตารางที่ 2.3** อุณหภูมิ กระบวนการกระตุ้น ที่มีผลต่อการดูดซับ CO<sub>2</sub> ของถ่านชีวภาพ

Raw Materials	Pyrolysis Temp (°C)	Activation Method	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	S <sub>micro</sub> (m <sup>2</sup> /g)	CO <sub>2</sub>	Ref.
					Adsorption Capacity (mg/g)	
Whitewood	500	Steam Activation	840	-	59	[59]
Soybean Straw	500	Raw Biochar Without Activation	0.04	250	45(Approx.)	[59]
Whitewood	500	KOH Activation	1400	-	78	[59]

**ตารางที่ 2.4** กระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิว ที่มีผลต่อการดูดซับ MB ของถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์

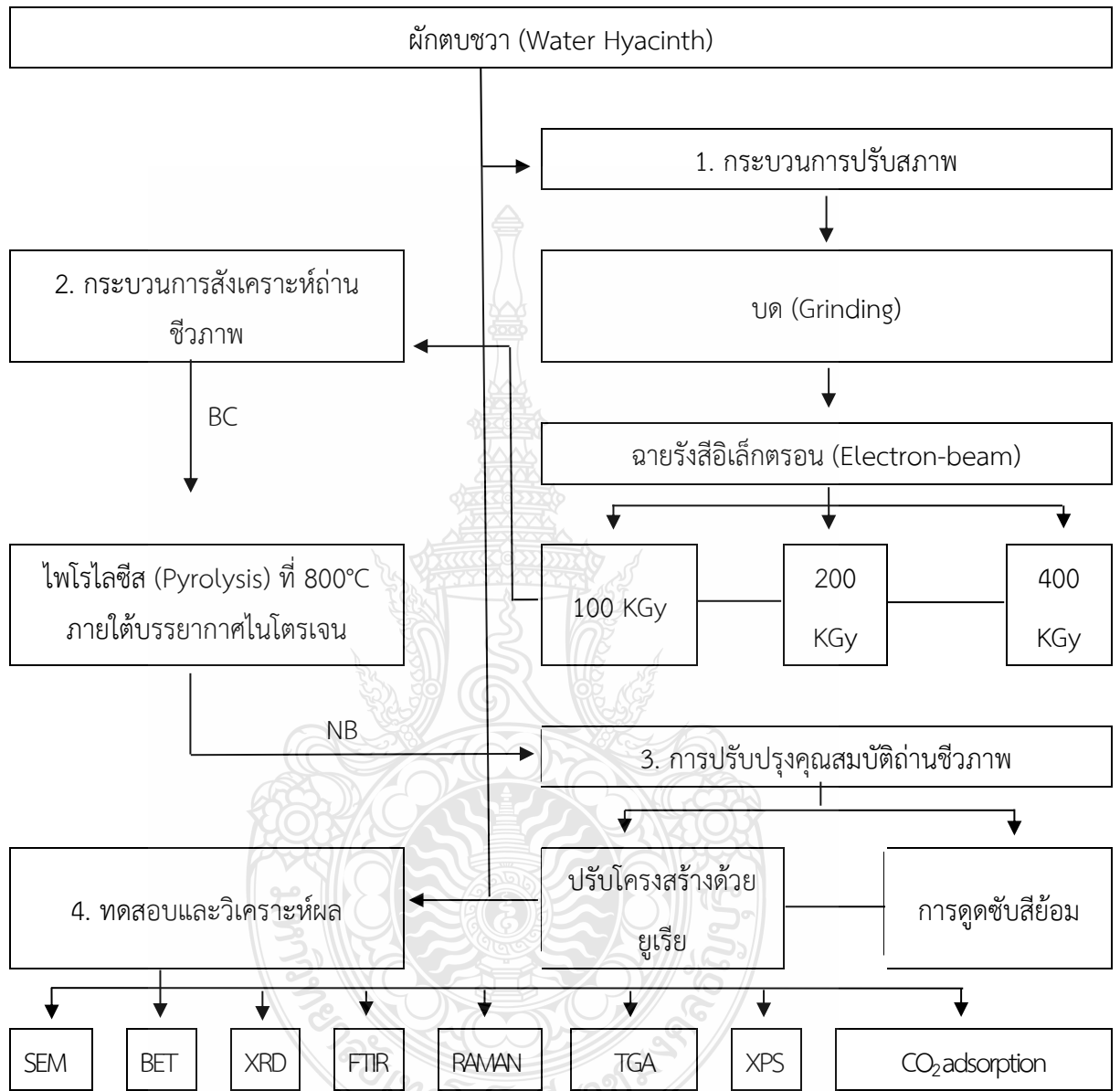
Activated carbon	Modification method	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	q <sub>e</sub> (mg/g)	Ref.
Corn straw	NH <sub>3</sub> /pyrolysis 600-800 °C	418.7	436	[61]
Bamboo	Urea/KHCO <sub>3</sub> activation	1693.0	499	[60]
Coffee grounds	HCl/CO <sub>2</sub> activation	2407.0	678	[62]
Water hyacinth	Nitric acid/stems activation	-	286	[63]
Eucalyptus	Citric acid/heat 120 °C	-	175	[64]

q<sub>e</sub> คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม (mg/g<sup>-1</sup>)

S<sub>BET</sub> คือ พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการวิเคราะห์มาตรฐาน BET

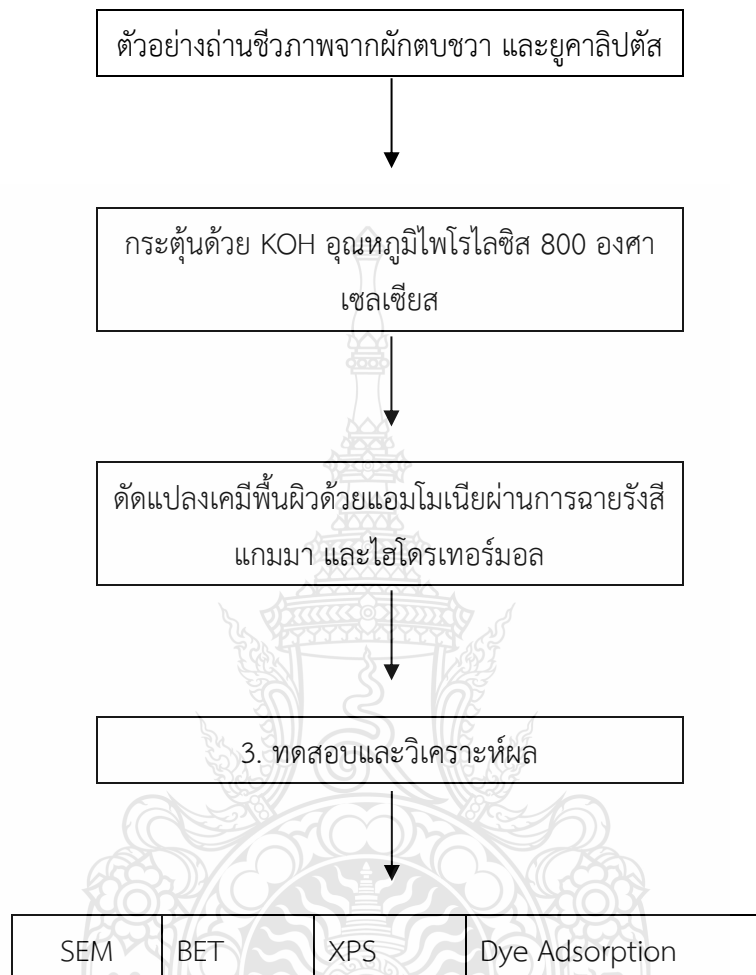


กระบวนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการดำเนินงานของการผลิตและศึกษาถ่านชีวภาพ

กระบวนการดำเนินงานในส่วนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการดำเนินงานของการผลิตและศึกษาถ่านกัมมันต์

## 3.2 อุปกรณ์ และเคมีภัณฑ์

### 3.2.1 อุปกรณ์

3.2.1.1 เครื่องบด รุ่น High-speed multi-function crusher

3.2.1.2 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius

3.2.1.3 ตะแกรงร่อน ขนาด 200 เมช

3.2.1.4 เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Eutech Instruments

3.2.1.5 ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2.1.6 กระจกบอทวง (Cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.2.1.7 แท่งแก้วคน (Glass Rod)

3.2.1.8 หลอดหยดสาร (Dropper)

3.2.1.9 เครื่อง Ultrasonic Cleaner รุ่น GT-1730QTS / GT SONIC

3.2.1.10 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.2.1.11 หลอดทดลอง (Test Tube) ขนาด 16×150 มิลลิเมตร

3.2.1.12 ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร

3.2.1.13 ขวดลดความดัน (Suckion Flask) ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3.2.1.14 กรวยกรองเซรามิก (Ceramic Funnel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120

มิลลิเมตร

3.2.1.15 กระดาษกรอง ยี่ห้อ Whatman

3.2.1.16 Hydrothermal Reactor ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.2.1.17 ขวดเก็บสาร (Vial) ขนาด 20 มิลลิลิตร

3.2.1.18 ขาตั้งและแคลมป์ (Stand & Clamp)

3.2.1.19 ริงส์แกมมา ( $C^{60}$ )

3.2.1.20 ริงส์อิเล็กทรอนิกส์

3.2.1.21 เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Chemstar Vacuum Pump-1402N)

3.2.1.22 เครื่องกวนสาร (IKA® C-MAG HS7)

### 3.2.2 เคมีภัณฑ์

3.2.2.1 แอมโมเนีย (Ammonia) ยี่ห้อ PanReac

3.2.2.2 น้ำบริสุทธิ์ (DI water, 18.2 M $\Omega$ -cm resistivities)

3.2.2.3 ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Activated Carbon) ยี่ห้อ Merck

3.2.2.4 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เกรด AR ยี่ห้อ QReC™

3.2.2.5 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรด AR ยี่ห้อ Univar

3.2.2.6 เมทิลีนบลู ยี่ห้อ Merck

### 3.3 การเตรียมถ่านชีวภาพ

ผักตบชวาที่ถูเก็บเกี่ยวได้จะถูกนำมาตัดแยกเอาส่วนของใบไปตากแห้งเป็นเวลา 3 วัน ตามด้วยอบ 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นตัดใบแห้งให้ได้ขนาดประมาณ 5 - 10 เซนติเมตร แล้วป็นให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบด แล้วร่อนผ่านตะแกรง 200 mesh (Standard test sieve, 0.0074 cm) แล้วนำไปฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ 0, 100, 200 และ 400 kGy ต่อมาขั้นตอนการไพโรไลซิส จะเตรียมโดยชั่งชีวมวลจากผักตบชวา 2 กรัม ใส่ในถ้วยเผาเซรามิก แล้วนำไปไพโรไลซิสในเครื่องเตาเผาแบบท่อ (CARBOLITE GERO30-3000°C) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน โดยมีอัตราการให้ความร้อน 2 ช่วงเวลา คือ 3 °C/นาที จากอุณหภูมิ 0 - 500 องศาเซลเซียส และ 5 °C/นาที จากอุณหภูมิ 500 - 800 องศาเซลเซียส จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิ 4 °C/นาที จนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน เก็บสารเมื่ออุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ถ่านยูคาลิปตัสจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนถูกเตรียมโดยการนำมาบดจนได้เป็นผงละเอียด ร่อนผ่านตะแกรง 200 mesh (Standard test sieve, 0.0074 cm) จากนั้นเก็บสารไว้ในตู้เก็บความชื้น

### 3.4 การเตรียมถ่านกัมมันต์

ซึ่งถ่านชีวภาพจากผักตบชวา และยูคาลิปตัส 5 กรัม ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยอัตราส่วน 1:2 (ถ่านชีวภาพ/KOH) ผสมให้เข้ากันในถ้วยเผาเซรามิก แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำไปไพโรไลซิสในเครื่องเตาเผาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน โดยอัตราการให้ความร้อน 2 ช่วง คือ 3 °C/นาที จากอุณหภูมิ 0 - 500 องศาเซลเซียส และ 5 °C/นาที จากอุณหภูมิ 500 - 800 องศาเซลเซียส จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิเย็นลงที่ 4 °C/นาที จนถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน และเก็บสารเมื่ออุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง นำสารออกมาล้างด้วย 0.1 M 98% ของกรดซัลฟูริก ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) แล้วล้างน้ำบริสุทธิ์ ด้วยเครื่องบวชเนอร์ แล้วปรับ pH เท่ากับน้ำบริสุทธิ์ นำไปอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน



### 3.5 การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมา

กระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยรังสีแกมมาถูกเตรียมโดยการชั่งถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา และยูคาลิปตัสอย่างละ 2 กรัม ผสมกับ 30% สารละลายแอมโมเนีย โดยใช้อัตราส่วน 1:1 ของแอมโมเนียกับน้ำบริสุทธิ์ (DI) นำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (GT Sonic) 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อากาศ เป็นเวลา 40 นาที และนำไปกระตุ้นด้วยการฉายรังสีแกมมา (โคบอลต์-60) 100 kGy ล้างสารด้วยน้ำบริสุทธิ์ จนได้ pH เท่ากับน้ำบริสุทธิ์

### 3.6 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวถ่านกัมมันต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

กระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลเตรียมโดยชั่งถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา และยูคาลิปตัสอย่างละ 2 กรัม ผสมกับ 30% สารละลายแอมโมเนีย โดยใช้อัตราส่วน 1:1 ของแอมโมเนียกับน้ำบริสุทธิ์ (DI) นำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (GT Sonic) 15 นาที และเครื่องกวนสาร 10 นาที นำสารใส่ในกระบอกเทฟลอนขนาด 100 มิลลิลิตร และไฮโดรเทอร์มอลรีแอกเตอร์ ตามลำดับ นำไปกระตุ้นด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลในตู้อบ 180 องศาเซลเซียส 18 ชั่วโมง ล้างสารด้วยน้ำบริสุทธิ์ จนได้ pH เท่ากับน้ำบริสุทธิ์

### 3.7 การศึกษาปริมาณการดูดซับสีย้อม

การศึกษาปริมาณการดูดซับสีย้อม โดยเตรียมเมทิลีนบลู (MB) 40 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นเตรียมถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ผสมกับเมทิลีนบลูทั้ง 5 ความเข้มข้น และนำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (ORBITAL SHAKER) โดยใช้ความเร็ว 150 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรองสารด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.45  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำสารที่ได้ไปวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดแบบอัลตราไวโอเล็ต (UV – Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 665 nm เพื่อคำนวณค่าร้อยละการดูดซับเมทิลีนบลู ตามสมการที่ (1)

$$\% \text{ removal} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู และ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นสมดุลของเมทิลีนบลู ( $\text{mg L}^{-1}$ )

### 3.8 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มเพื่อใช้อธิบายรูปแบบของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ประกอบด้วยสมการแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และสมการของฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) ดังสมการ ที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$q_e = + \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \dots (2)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม ( $\text{mg g}^{-1}$ )

$q_m$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่อิ่มตัวบนตัวดูดซับ 1 กรัม ( $\text{mg g}^{-1}$ )

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ( $\text{mg L}^{-1}$ )

$K_L$  คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง ( $\text{L mg}^{-1}$ )

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม ( $\text{mg g}^{-1}$ )

$n$  คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ( $\text{mg g}^{-1}$ )

$K_F$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนด์ลิชที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ ( $\text{L mg}^{-1}$ )

### 3.9 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (Dye adsorption kinetics)

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับถูกทดสอบโดยใช้เมทิลีนบลู 40 มิลลิกรัม ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัม/ลิตร และถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม มีการสู่วัดค่าดูดซับใน 9 ช่วงเวลา คือ 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, และ 360 นาที ตามลำดับ แล้วจึงนำไปกรองสารด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.45  $\mu\text{m}$  และนำไปวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดแบบอัลตราไวโอเล็ต (UV – Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร การศึกษาอัตราเร็วของการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูโดยใช้แบบจำลองเป็น แบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) ดังแสดงในสมการที่ 4 และ 5

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1 t}{2.303} \quad (4)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

$K_1$  คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ( $\text{min}^{-1}$ )

$K_2$  คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม [ $\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{min})$ ]

$K_p$  คือ ค่าคงที่ของการเข้าสู่รูพรุน ( $\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min}^{1/2}$ )

$q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่สมดุล ( $\text{mg}/\text{g}$ )

$q_t$  คือ ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ ( $\text{mg}/\text{g}$ )

$C$  คือ ค่าคงที่ ( $\text{mg}/\text{g}$ )



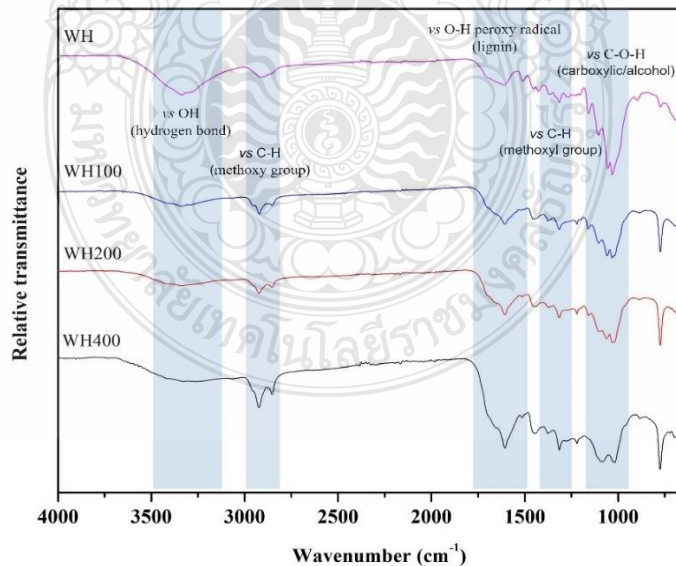
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 วิเคราะห์โครงสร้างชีวมวล หลังผ่านกระบวนการปรับสภาพ

4.1.1 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันชีวมวลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)

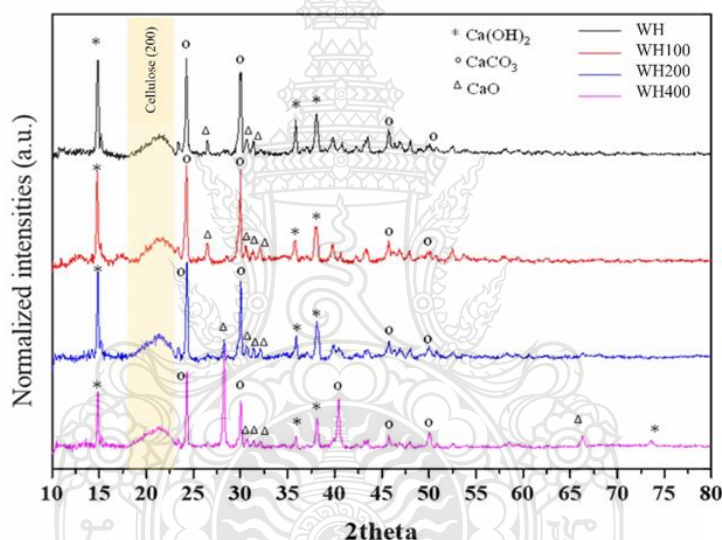
เทคนิค FTIR ใช้เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารชีวมวลจากผักตบชวา (WH) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สเปกตรัม FTIR ของชีวมวลจะแตกต่างกันหลังจากการปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอน (EBI) ที่ 0, 100, 200 และ 400 kGy โดยพบว่า พีคที่ 3440 - 3330 และ 1038  $\text{cm}^{-1}$  จะประกอบด้วย O-H stretching และ C-O stretching ของ hydrogen bonding ตามลำดับ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ต้านการเกิดอนุมูลอิสระของลิกนิน [65] เห็นได้ชัดว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ต่อมาพีคที่ 2920 - 2850  $\text{cm}^{-1}$  แสดง C-H stretching (Methoxyl Group และ Aldehyde Group) พีคที่ 1630  $\text{cm}^{-1}$  (C=O stretching) เป็นคอนจูเกตของโครงสร้างลิกนิน ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เกิดจากการแตกหักของโครงสร้างลิกนินเกิดเป็นหมู่ Peroxy radicals [66] พีคที่ 1320 และ 850  $\text{cm}^{-1}$  ประกอบด้วย C-H deformation (Methoxyl Group) และ O-C-O ซึ่งทั้งหมดเป็นโครงสร้างของ Glycosidic linkage



รูปที่ 4.1 กราฟ FTIR ของชีวมวลจากใบผักตบชวา ก่อน-หลังการปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอน

#### 4.1.2 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray diffraction, XRD)

การวิเคราะห์ XRD เป็นการวิเคราะห์เพื่อทราบถึงการมีอยู่ของโครงสร้างความเป็นผลึก (Crystalline) หรืออสัณฐาน (Amorphous) ที่แตกต่างกัน หลังจากผ่านการปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอนที่ 0, 100, 200 และ 400 kGy สำหรับรูปแบบ XRD ของตัวอย่างผักตบชวา ที่เตรียมโดยปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าที่  $2\theta = 23^\circ$  (200) แสดงระนาบผลึกของกราไฟต์ในเซลลูโลส [67] ความเข้มจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มของรังสีอิเล็กตรอนจาก 0 เป็น 400 kGy นอกจากนี้พีคส่วนใหญ่ที่แสดงในกราฟ XRD เป็นพีคที่เกิดจากแคลไซต์ (Calcite) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่ธาตุตามธรรมชาติที่พบได้ในใบและลำต้นของผักตบชวา เช่น Ca, Mg, Al, Si, P, S, K และ Cl เป็นต้น สามารถดูหลักฐานปริมาณแร่ธาตุเพิ่มเติมได้จากผลกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (SEM-EDS)

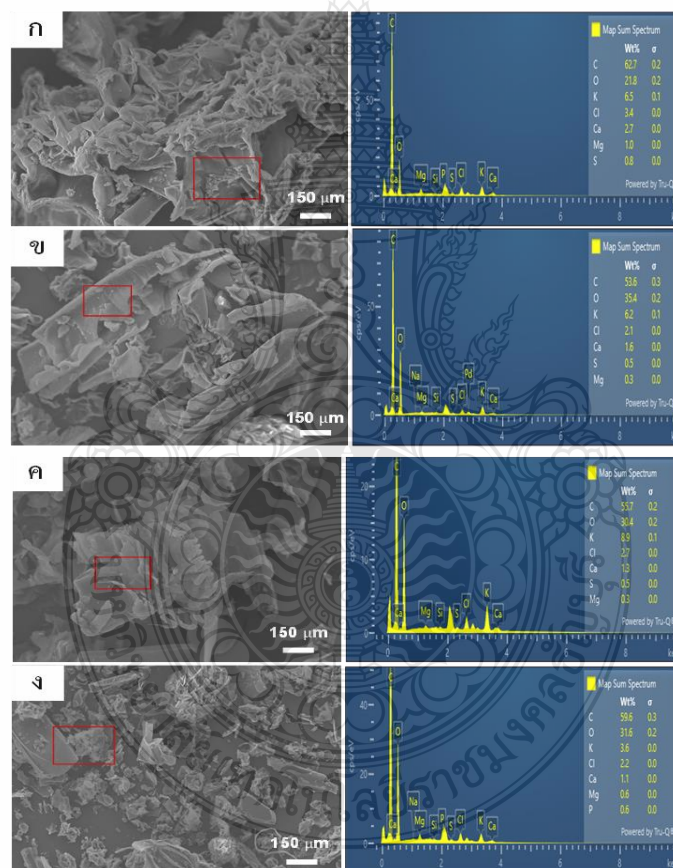


รูปที่ 4.2 กราฟ XRD ของชีวมวลจากใบผักตบชวา ก่อน-หลังการปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอน

4.1.3 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDS)

โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบแร่ธาตุของชีวมวลผ่านการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ (EDS) ตามลำดับ รูปที่ 4.3 แสดงรูปถ่ายของชีวมวลจากใบผักตบชวาทั้งปรับสภาพและไม่ปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอน แกรนูลของลิกนินที่ไม่ผ่านการฉายรังสีมีพื้นผิวเรียบ โครงสร้างลิกนินส่วนใหญ่แตกหักซึ่งอาจเกิดจากแรงเฉือน

ระหว่างการบดให้มีขนาดเล็กลง แต่เมื่อลิกนินได้รับการปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอน จะเกิดรอยร้าวบนพื้นผิว ขนาดและปริมาณของรอยร้าวเพิ่มขึ้นตามปริมาณของรังสี ซึ่งรังสีอิเล็กตรอนจะทำให้ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ที่ปริมาณรังสี 400 kGy รอยแตกจะเด่นชัดมากเมื่อเทียบกับลิกนินที่ฉายรังสีในปริมาณต่ำกว่า และลิกนินดั้งเดิม นอกจากนี้ยังเน้นส่วนของเนื้อหาให้เห็นถึงองค์ประกอบต่างๆ ของแร่ธาตุที่ปกคลุมอยู่ตามพื้นผิวของผักตบชวา ซึ่งจะสังเกตเห็นก้อนกลมๆ สีขาวกระจายอยู่ตามพื้นผิว เช่น Ca, Si, Cl K และMg แต่อย่างไรก็ตามปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์ EDS ของตัวอย่างสาร พบว่าพื้นผิวส่วนใหญ่จะถูกครอบคลุมด้วยธาตุคาร์บอน ดังแสดงตามตารางที่ 4.1 ในส่วนของลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของต่างๆ จะมีการศึกษาเพิ่มเติมในหัวข้อ 4.2 ที่มีการเปลี่ยนแปลงชีวมวลเป็นถ่านชีวภาพรวมถึงการดัดแปลงเคมีพื้นผิวด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างชีวมวลจากผักตบชวาและการวิเคราะห์ปริมาณสารในตัวอย่าง (ก) WH (ข) WH100 (ค) WH200 และ (ง) WH400

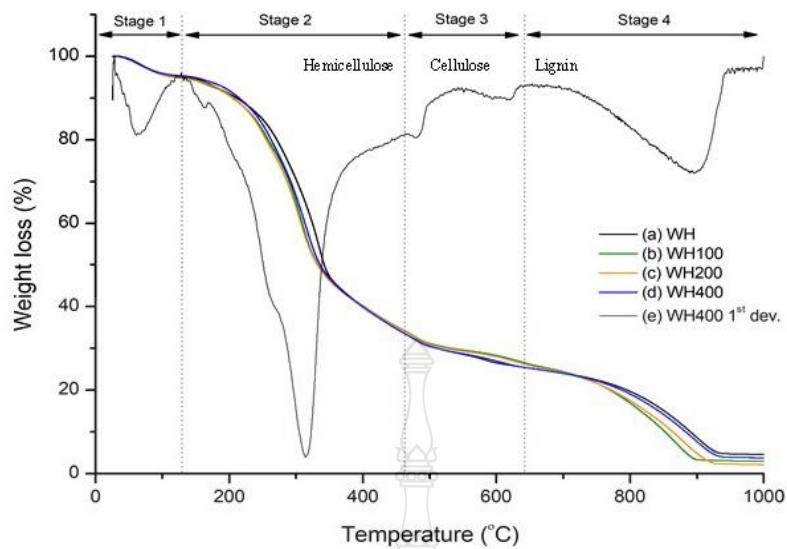
**ตารางที่ 4.1** เปอร์เซนต์แร่ธาตุในตัวอย่างชีวมวลจากผักตบชวา ก่อน-หลังการปรับสภาพ

Element	wt%			
	WH	WH100	WH200	WH400
C	62.7	53.6	55.7	59.6
O	21.8	35.4	30.4	31.6
Ca	2.7	1.6	1.3	1.1
Cl	3.4	2.1	2.7	2.2
K	6.5	6.2	8.9	3.6
Mg	1.0	0.3	0.3	0.6
P	-	-	-	0.6
S	0.8	0.5	0.5	-

#### 4.1.4 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA)

โดยทั่วไป TGA เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือการระเหยของน้ำ การตกผลึก (Crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส และการแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) ผลจากการวิเคราะห์ (รูปที่ 4.4) พบว่า เฟสที่ 1 เกิดจากการระเหยของน้ำ หรือความชื้นที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งจะเริ่มสูญเสียมวลในช่วงอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (<130°C) ประมาณ 5% ในเฟสที่ 2 และ 3 เป็นช่วงที่เอมิเซลลูโลส และเซลลูโลสเกิดการเสื่อมสภาพ โดยช่วงอุณหภูมิปานกลางตั้งแต่ 130 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 345 องศาเซลเซียส เอมิเซลลูโลส สลายตัวอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ 460 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะเริ่มมีการเสื่อมสภาพ ไปจนถึงสลายตัว ที่อุณหภูมิ 460 - 640 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงเริ่มต้นของการย่อยสลายลิกนินโดยตัวอย่างผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอนเสื่อมสภาพภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า และเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนแปลงในระดับสายโซ่โมเลกุลของชีวมวล จนไปถึงช่วงอุณหภูมิสูงในการสลายตัวของลิกนินคือ 640 - 940 °C (ประมาณ 19-25%) ลิกนินมีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ที่มีคุณสมบัติในการต้านการเกิดออกซิเดชัน จะเป็นเฟสที่เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ภายใต้อุณหภูมิไพโรไลซิสที่ 800 องศาเซลเซียส ตัวอย่างชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพ 100, 200 และ 400 kGy โครงสร้างของลิกนินเสื่อมสภาพมากกว่าตัวอย่างชีวมวลแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ ตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าลิกนินจะเสื่อมสภาพ และสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ดังนั้นในส่วนของการกระบวนการไพโรไลซิสของถ่านชีวภาพ ยังคงเหลือโครงสร้างบางส่วนของลิกนินในบริเวณที่มีความหนาแน่นสูง





รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ ชีวมวลจากผักตบชวา (ก) WH (ข) WH100 (ค) WH200 และ (ง) WH400

ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชีวมวลก่อน-หลังการปรับสภาพด้วยเทคนิค TGA

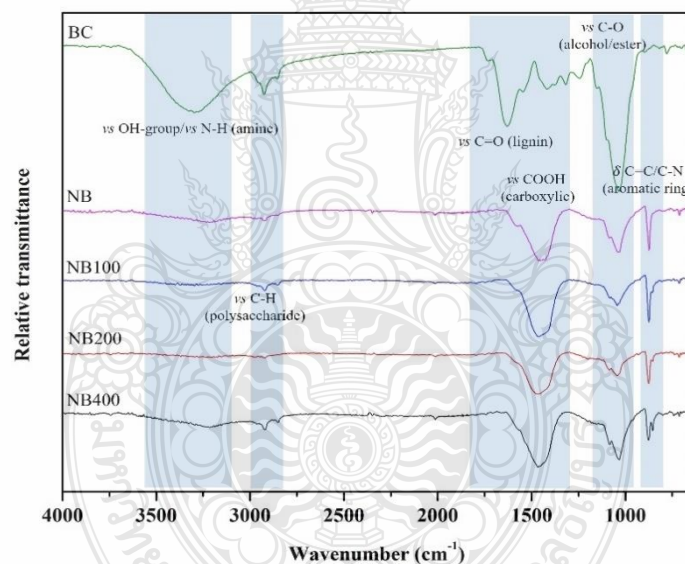
Biomass	Water and high volatile compound (Stage 1)		Stable volatile compound hemicellulose and cellulose (Stage 2,3)		Lignin (Stage 4)		High thermal stability lignin and residue	
	Weight loss (%)	T (°C)	Weight loss (%)	T (°C)	Weight loss (%)	T (°C)	Weight loss (%)	T (°C)
WH	5	< 130	61	130-460	15	460-640	19	640-940
WH100	5	< 130	62	130-440	8	440-640	25	640-940
WH200	5	< 130	62	130-440	9	440-640	24	640-940
WH400	5	< 130	62	130-440	11	440-640	22	640-940



## 4.2 วิเคราะห์โครงสร้างถ่านชีวภาพหลังกระบวนการปรับปรุงสมบัติเคมีพื้นผิวด้วยยูเรีย

4.2.1 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันชีวมวลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันชีวมวล (รูปที่ 4.5) เผยให้เห็นว่าถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปลงเคมีพื้นผิวด้วยยูเรีย (NBC) แสดงแถบดูดซับที่  $3440-3240\text{ cm}^{-1}$  (O-H/N-H stretching),  $2920-2850\text{ cm}^{-1}$  (C-H stretching  $\text{sp}^2$ ),  $1465\text{ cm}^{-1}$  COOH stretching (carboxyl group),  $1038\text{ cm}^{-1}$  C-O stretching (ester, carboxyl, phenol) และ  $850\text{ cm}^{-1}$  C-N stretching (aromatic ring) นอกจากนี้ในส่วนของตัวเองถ่านชีวภาพ (BC) ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปลงเคมีพื้นผิวผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแสดงโครงสร้างที่  $1630\text{ cm}^{-1}$  C=O stretching (lignin) [68] ซึ่งเป็นช่วงบริเวณโครงสร้างที่มีความหนาแน่นของลิกนินสูง โดยไม่เสื่อมสภาพภายใต้การไพโรไลซิส 800 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ของ TGA ในหัวข้อที่ 4.1.4

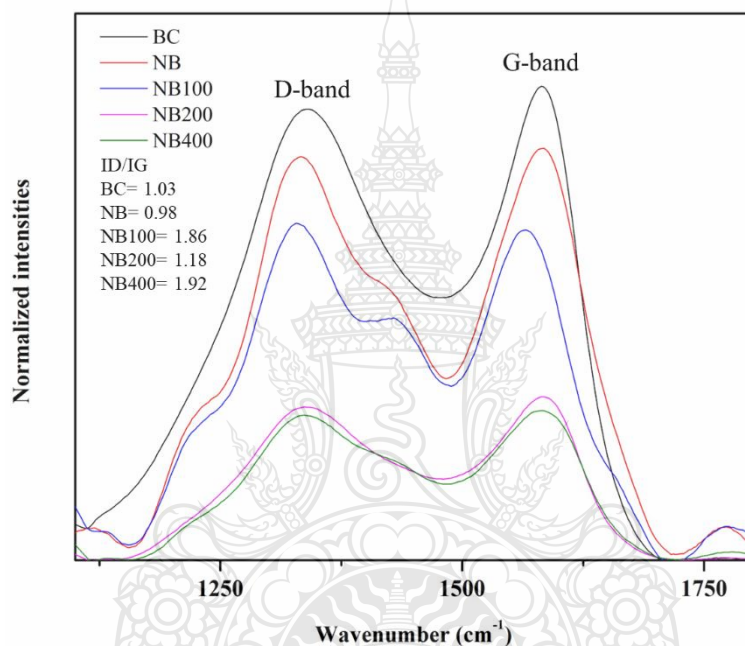


รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของถ่านชีวภาพก่อน-หลังกระบวนการดัดแปลงคุณสมบัติเคมีพื้นผิว

4.2.2 วิเคราะห์ปริมาณโครงสร้างคาร์บอนอสัณฐานด้วยเทคนิครามาน สเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy)

รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมรามาน สเปกโตรสโคปีของถ่านชีวภาพก่อน และหลังการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยยูเรียผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สเปกตรัมแสดงแถบ D-band และแถบ G-band อยู่ที่  $1350\text{ cm}^{-1}$  และ  $1587\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ เป็นที่ทราบกันดีว่าแถบ D-band ที่  $1350\text{ cm}^{-1}$

สอดคล้องกับบริเวณโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบของคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วย  $sp^3$ - hybridization ในทางกลับกัน G-band แถบที่  $1587\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับโครงสร้างของคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในชั้นของกราฟไฟท์ที่มี  $sp^2$  - hybridization [69] ดังนั้นอัตราส่วน ID/IG จึงบ่งบอกถึงระดับอสัณฐานของวัสดุ จากผลที่ได้แสดงอัตราส่วน ID/IG ส่วนใหญ่เพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงคุณสมบัติถ่านชีวภาพด้วยยูเรียผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ค่าที่สังเกตได้คือ 1.03 (BC), 0.98 (NB), 1.86 (NB100), 1.18 (NB200) และ 1.92 (NB400) ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นระเบียบของพื้นผิวหรือระดับอสัณฐานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนนี้จะช่วยเพิ่มความพรุนในโครงสร้าง NBC ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 รามาน สเปกตรัมของถ่านชีวภาพก่อน-หลังกระบวนการดัดแปลงคุณสมบัติเคมีพื้นผิวด้วยยูเรีย

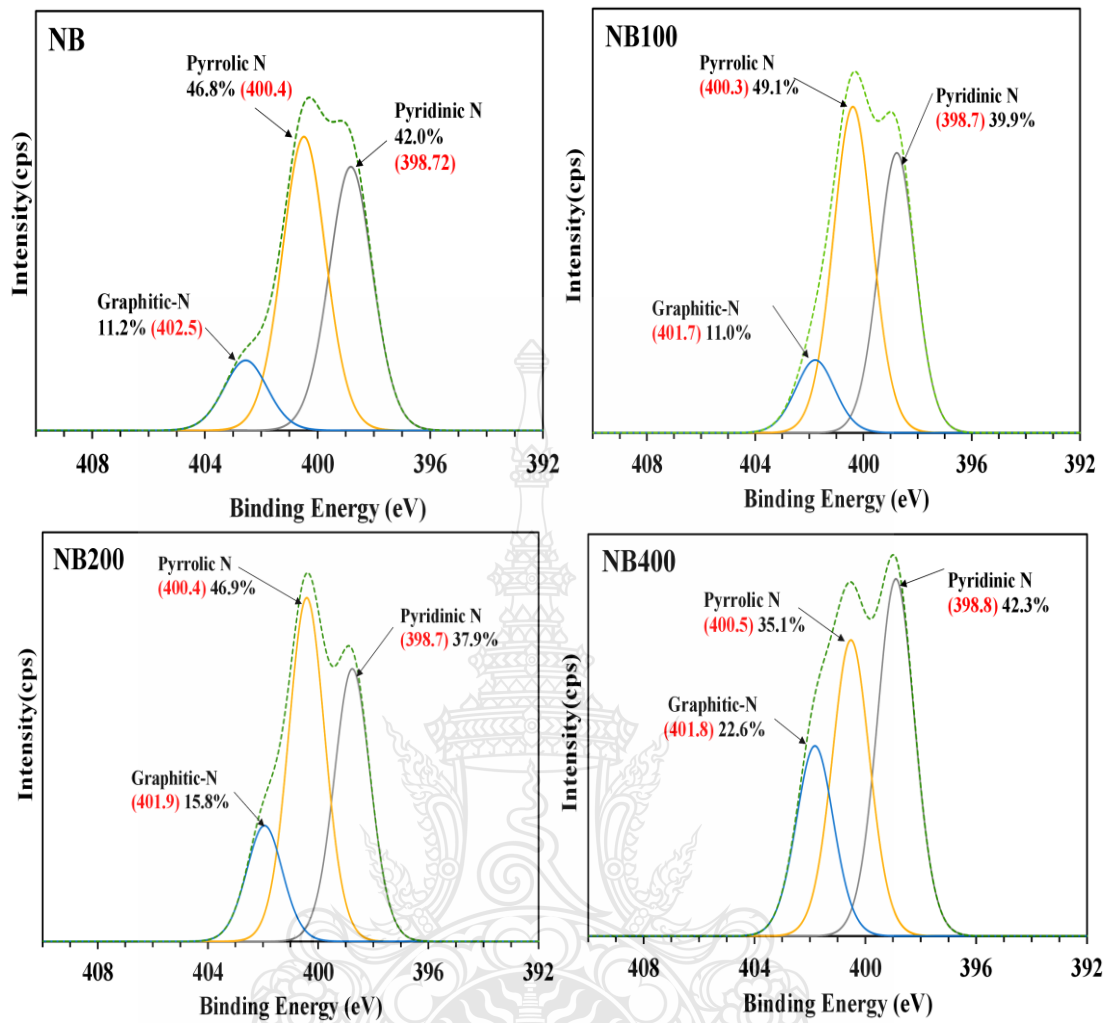
#### 4.2.3 วิเคราะห์ผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

องค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ (ตารางที่ 4.3) ยืนยันการอยู่ร่วมกันของ C, O และ N เห็นได้ชัดว่าการดัดแปลงด้วยยูเรียส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนในองค์ประกอบของถ่านชีวภาพ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3% นอกจากนี้ สเปกตรัม N1s สามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนประกอบไปด้วยพีคที่ 398.4, 400.0 และ 400.9 eV (รูปที่ 4.7) ซึ่งสอดคล้องกับ ไพริดีน (Pyridine-N), ไพโรลิก (Pyrrolic-N) และ กราไฟท์ (Graphitic-N) ตามลำดับ โดยสัดส่วนโครงสร้างอะตอมไนโตรเจนและอื่นๆ ของตัวอย่างสามารถดูเพิ่มเติมในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้พีค C1s ของ NB, NB100, NB200 และ NB400 (รูปที่ 4.8) จะปรากฏเป็นหกพีค คือพีคที่ 283.0, 283.8, 284.9, 286.1, 287.4 และ 288.8 eV ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ C-H, C-C, C=C, C-(O, N) และ C=O/O-C=O (คาร์บอนิล, ควิโนน

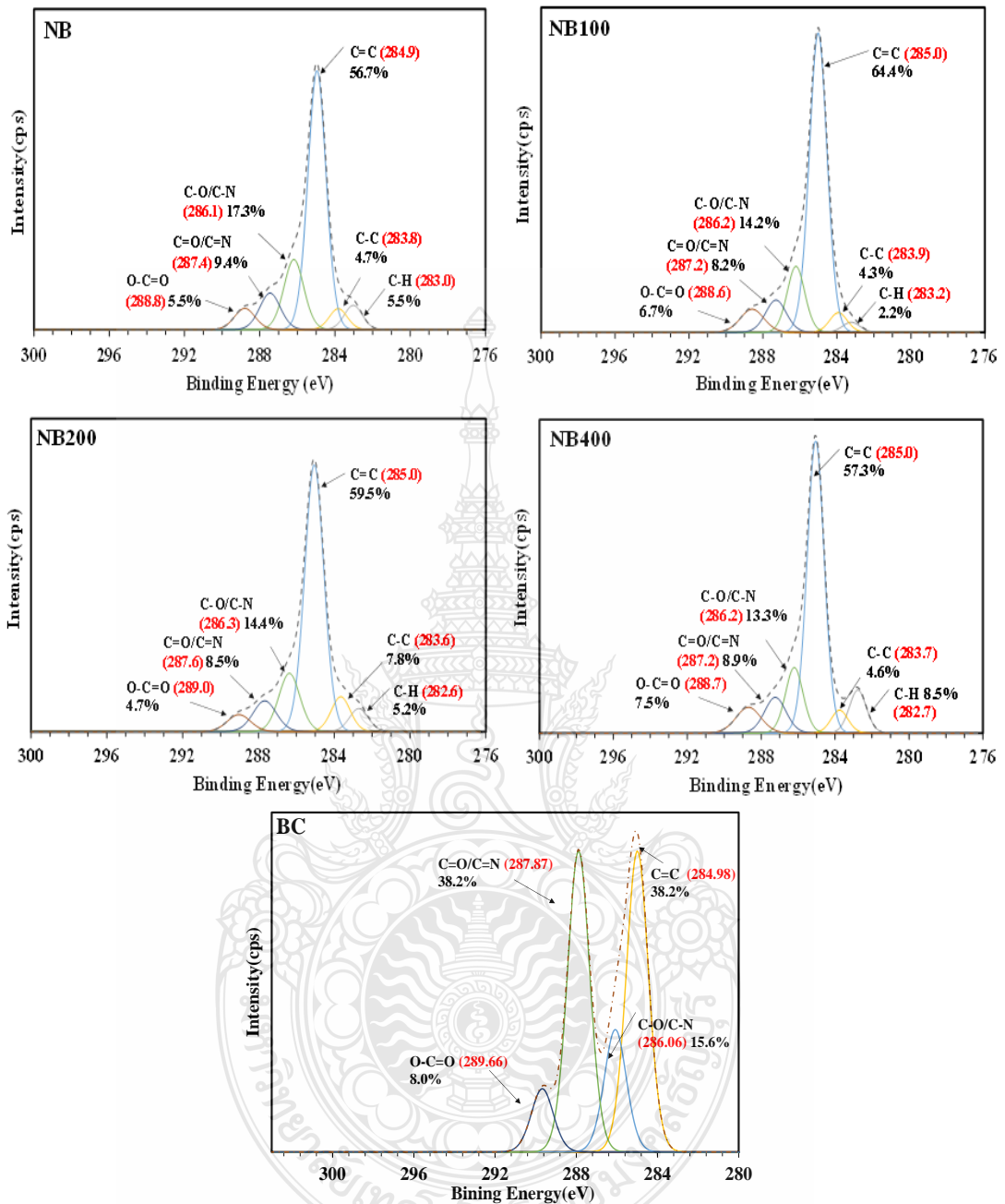
อัลดีไฮด์ และคีโตน) และในส่วนของ O 1s ในรูปที่ 4.9 จะประกอบไปด้วย 5 พีค คือ 531.8 และ 532.8 eV, สอดคล้องกับ C–OH และ C=O ที่ 531.8 และ 532.8 eV แสดงถึงกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจน (oxygen functional groups) และที่ 530.5 eV แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน ketone (C=O) จากตารางจะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอะตอม N เป็นผลโดยตรงต่อการลดลงของอะตอม O เนื่องจากอนุโมลอิสระของ NH<sub>2</sub> จะเข้าทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอกซิลิก หรือกลุ่มออกซิเจนอื่นๆ ในโครงสร้างของถ่านชีวภาพ การฉายรังสีที่ปริมาณต่างกันมีผลต่อโครงสร้างอะตอมของไนโตรเจน โดยจะเห็นได้ชัดว่าปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มในการเพิ่มโครงสร้าง Graphitic-N และในทางตรงกันข้ามลดระดับการเกิดโครงสร้างแบบ Pyrrolic-N ซึ่งโครงสร้างของไนโตรเจนมักจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพการดูดซับ CO<sub>2</sub> โดยไนโตรเจนแบบ Pyrrolic-N เป็นโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนตำแหน่งพื้นฐานในโครงสร้างคาร์บอน และสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรด-เบสได้ดี ซึ่งจะทำให้พื้นผิวถ่านกัมมันต์มีความเป็นด่างมากขึ้น และสามารถเพิ่มความจุในการดูดซับ CO<sub>2</sub>

**ตารางที่ 4.3** การสแกน XPS ตำแหน่งองค์ประกอบเคมีแบบกว้างของถ่านชีวภาพ

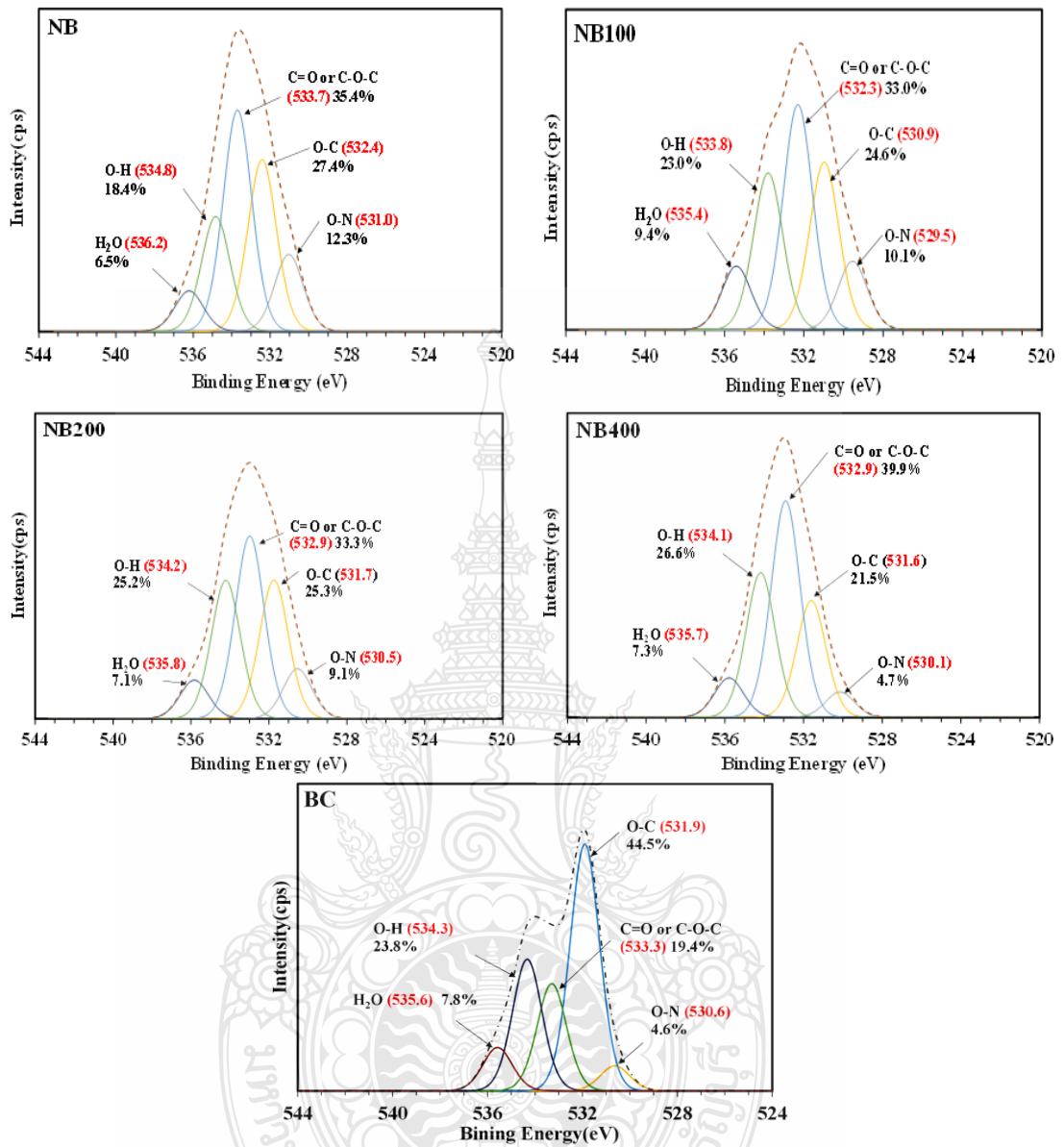
ตัวอย่าง	ตำแหน่ง				
	C1s	O1s	N1s	Ca2p	Si2p
BC	285.0	532.0	-	348.0	-
NB	285.0	533.0	399	349.0	102.0
NB100	285.0	534.0	400	350.0	104.0
NB200	285.0	532.0	400	349.0	103.0
NB400	285.0	533.0	400	349.0	103.0



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของไนโตรเจน N1s ในตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปลงเคมีพื้นผิว



รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของไนโตรเจน C1s ในตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปลงเคมีพื้นผิว



รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของไนโตรเจน O1s ในตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านการดัดแปลงเคมีพื้นผิว

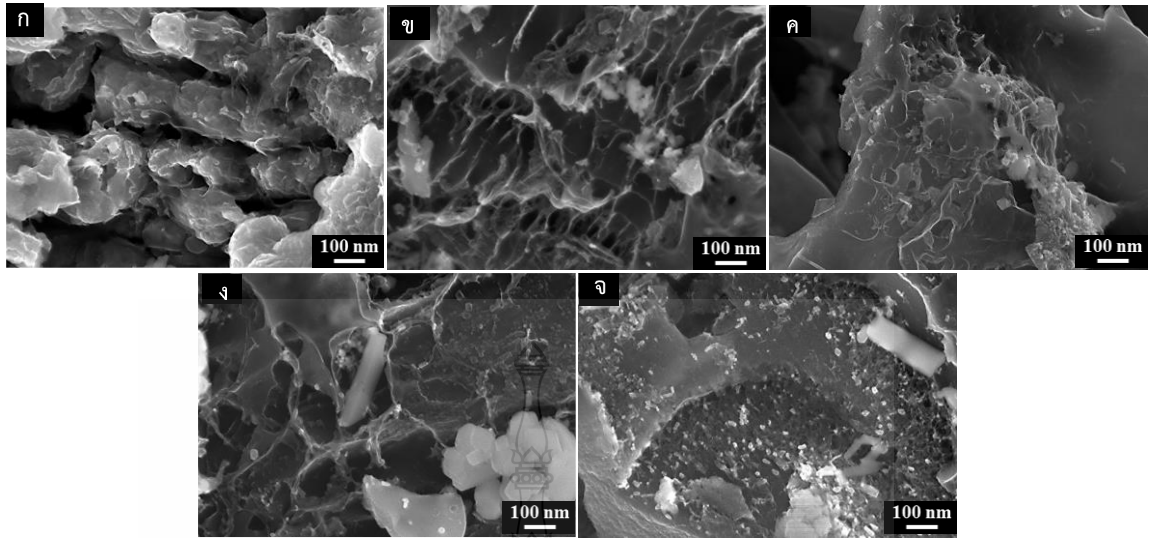
**ตารางที่ 4.4** องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีพื้นผิวของถ่านชีวภาพที่ได้จากผักตบชวา

ตัวอย่าง	Pyridinic-N	Pyrrolic-N	Graphitic-N	Total Nitrogen (at%)	Carbon content (at%)	Oxygen content (at%)
BC	-	-	-	-	41.14	26.71
NB	42.0	46.8	11.2	2.37	70.75	19.59
NB100	39.9	49.1	11.0	3.41	76.12	15.57
NB200	37.9	46.9	15.8	3.94	70.52	19.53
NB400	42.3	35.1	22.6	2.71	69.66	17.65

4.2.4 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ภาพ SEM ของตัวอย่าง BC แสดงในรูปที่ 4.10 (ก) ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นผิวมีลักษณะเป็นบล็อกที่สมบูรณ์ที่มีพื้นผิวเรียบ โดยจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนค่อนข้างต่ำ (มีรอยแตกและข้อบกพร่องของพื้นผิวน้อย) หลังจากการตัดแปลงโครงสร้างพื้นผิวโดยยูเรียในบรรดาตัวอย่าง NBC (รูปที่ 4.10 (ข ค ง จ)) แสดงโครงสร้างรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการแทรกตัวของก๊าซจำนวนมากภายในพื้นผิวของถ่านชีวภาพในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล นอกจากนี้ ตัวอย่าง NB400 อาจเกิดจากการที่ได้ปริมาณความเข้มข้นยูเรียสูงขึ้น ส่งผลให้พบโครงสร้างรูพรุนมากขึ้น (รูปที่ 4.10 (จ))



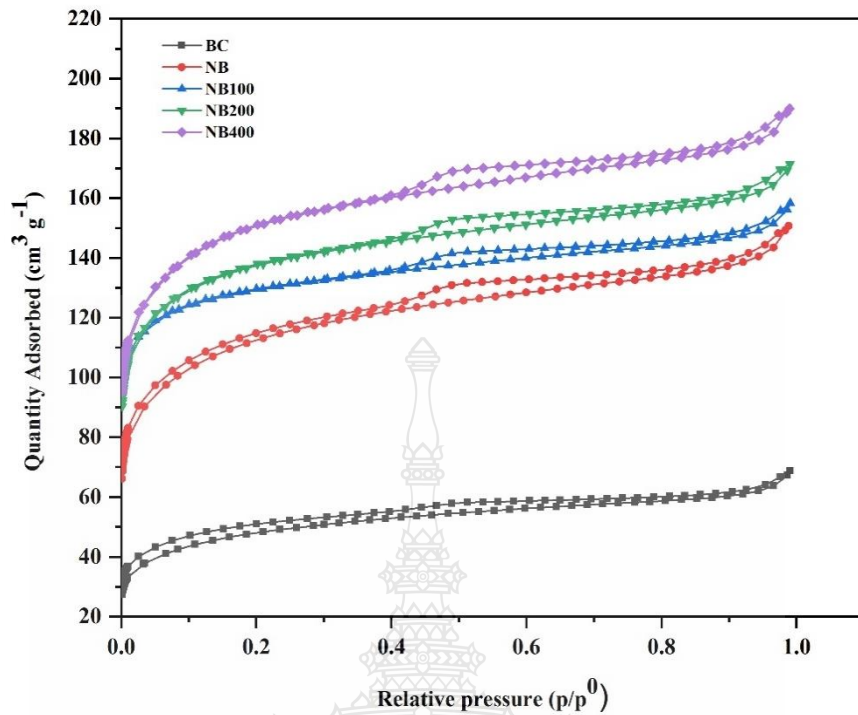


รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM แสดงถึงลักษณะพื้นผิวถ่านชีวภาพ หลังกระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิว (ก) BC (ข) NB (ค) NB100 (ง) NB200 และ (จ) NB400

#### 4.2.5 วิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer, BET)

ไอโซเทอร์มการดูดซับและคายการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ BC และ NBC ตรงกับไอโซเทอร์มชนิด IV ซึ่งเป็นการดูดซับหลายชั้นตามการควบแน่นของมีโซพอร์ (รูปที่ 4.11) นอกจากนี้ฮิสเทรีซิสลูปยังระบุรูพรุนหรืออนุภาคที่มีลักษณะเป็นร่องแคบๆ ที่มีช่องว่างภายในที่มีรูปร่างผิดปกติ ตัวอย่าง NBC มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ใหญ่กว่าตัวอย่าง BC (152.3 ตร.ม./กรัม) ซึ่งพบว่าในตัวอย่าง NB400 พบพื้นที่ผิวสูงสุด (462.5 ตร.ม./กรัม) และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (0.26) นอกจากนี้ ในตารางที่ 4.5 ยังพบว่าปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและปริมาตรความเป็นรูพรุนทั้งหมดของ NBC (NB400>NB200>NB100>NB) สอดคล้องกับภาพถ่ายแสดงสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.10





รูปที่ 4.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับคายซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

ตารางที่ 4.5 โครงสร้างความเป็นรูพรุน และคุณสมบัติพื้นผิวของตัวอย่างถ่านชีวภาพจากผักตบชวา

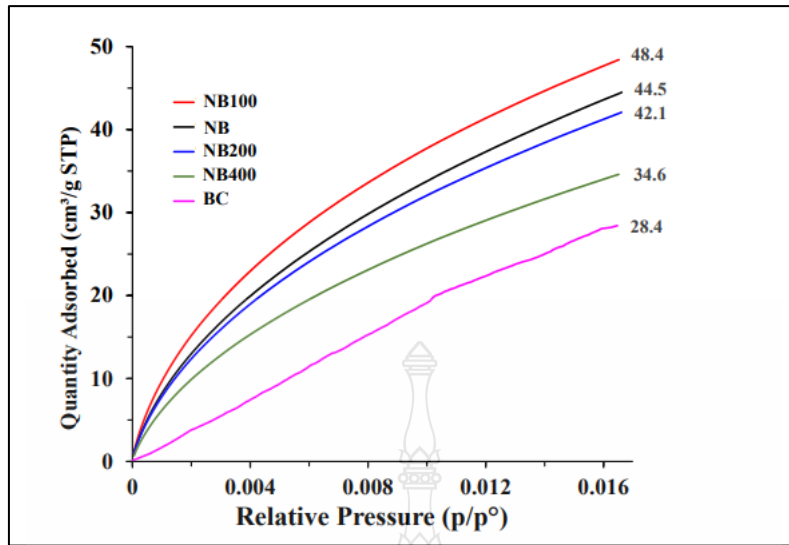
Samples	<sup>a</sup> BET SA (m <sup>2</sup> /g)	<sup>b</sup> A <sub>micro</sub> (m <sup>2</sup> /g)	<sup>c</sup> A <sub>meso</sub> (m <sup>2</sup> /g)	<sup>d</sup> V <sub>total</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	<sup>b</sup> V <sub>micro</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	<sup>c</sup> V <sub>meso</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	Avg.pore size <sup>e</sup> d <sub>1</sub> /f <sub>2</sub> (nm)
BC	352.76	192.58	119.76	0.12	0.10	0.15	1.46/5.75
NB	353.14	164.45	141.71	0.12	0.09	0.12	1.40/3.41
NB100	388.29	282.26	67.04	0.16	0.15	0.07	1.70/4.31
NB200	419.39	257.40	95.03	0.16	0.14	0.09	1.55/3.84
NB400	462.50	261.19	115.16	0.17	0.14	0.11	1.49/3.74

### 4.3 วิเคราะห์ผลกระบวนการดูดซับของถ่านชีวภาพ

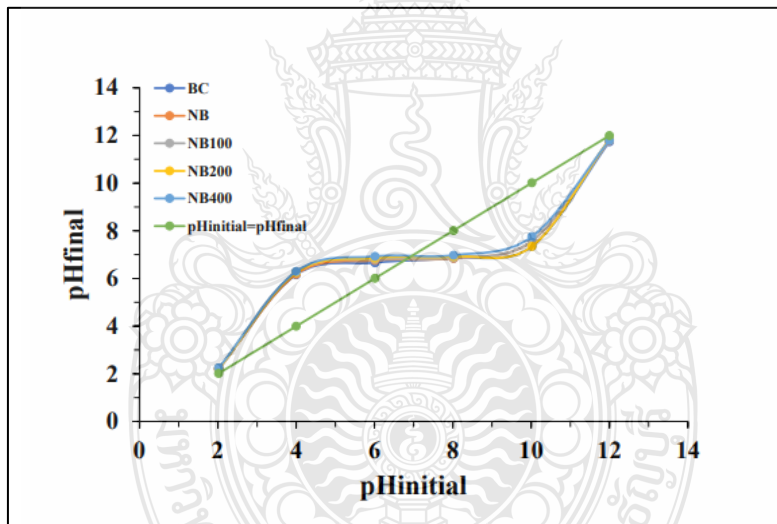
#### 4.3.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การวัดการดูดซับ  $\text{CO}_2$  ถูกตรวจสอบที่ 298 K (อุณหภูมิห้อง) เพื่อจำลองและพิจารณาการดูดกลืน  $\text{CO}_2$  เหมือนกับสถานการณ์จริง จากผลการทดสอบพบว่า BC มีค่าการดูดซับ  $\text{CO}_2$  ต่ำสุด และในตัวอย่าง NBC ที่ผ่านการปรับสภาพที่ปริมาณรังสีแตกต่างกัน ตัวอย่าง NB มีค่าการดูดซับ  $\text{CO}_2$  สูงสุดที่ 298 K (รูปที่ 4.12) ในทางตรงกันข้าม ตัวอย่าง NB400 แสดงความสามารถในการดูดซับ  $\text{CO}_2$  ที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นไปได้ว่าเคมีพื้นผิวและโครงสร้างอะตอมไนโตรเจนของตัวอย่าง NBC มีอิทธิพลต่อปริมาณการดูดซับ  $\text{CO}_2$  มากกว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน แม้ว่า NB400 จะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด แต่ก็ได้รับความสามารถในการดูดซับ  $\text{CO}_2$  ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ฉายรังสี จากผลการทดสอบสอดคล้องกับรายงานของ *Jinhao Li* และคณะ ที่รายงานว่า โครงสร้าง Graphitic-N ในสัดส่วนที่สูง มักจะทำให้พื้นผิวดูดซับกลายเป็นกรด ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ  $\text{CO}_2$  ของตัวดูดซับลดลง [70] ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของโครงสร้าง Graphitic-N ในตัวอย่าง (NB400 > NB200 > NB > NB100) นอกจากนี้ยังพบรายงานที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของ Pyrrolic-N (NB400 < NB200 < NB < NB100) ที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ  $\text{CO}_2$  เนื่องจากมีลักษณะที่เป็นวงแหวนห้าส่วนในโครงสร้างถ่านชีวภาพ ทำให้ถ่านชีวภาพแสดงพฤติกรรมการให้อิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่เป็นพื้นโครงสร้างพื้นฐานในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นกรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [70,71] นอกจากนี้ จุดที่ประจุเป็นศูนย์ (Points of Zero Charge) ของตัวอย่าง BC และ NB มีค่า pH คล้ายกัน ( $\text{pH}_{\text{pzc}} = 6.8$ ) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 ผลการทดสอบนี้ทำให้เห็นว่า แรดิคอลของไนโตรเจนบนพื้นผิวดตัวอย่าง NB สามารถส่งเสริมพื้นผิวที่มีประจุลบและเพิ่มแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตระหว่าง MB (สีย้อมติดประจุบวก) และที่ความเข้มข้น MB 150 มก./ลิตร ความสามารถในการดูดซับ MB เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสี

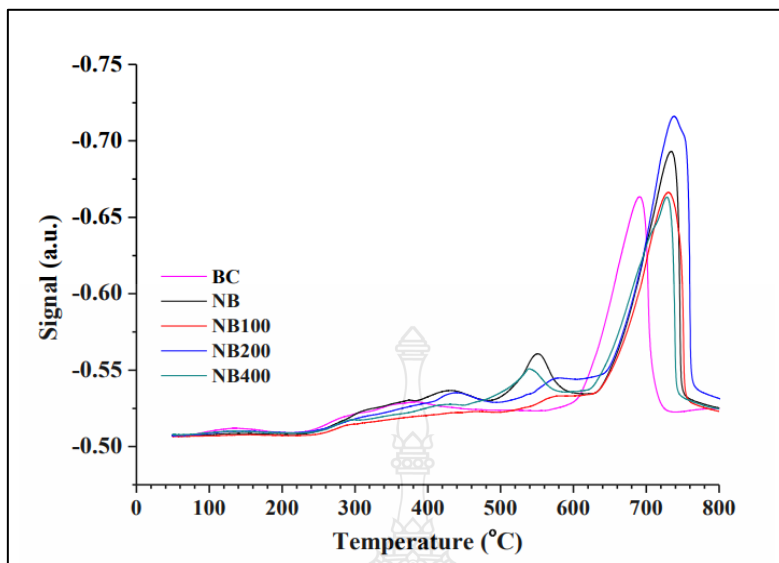
การทดลองดูดซับ  $\text{CO}_2$ -TPD ยังสามารถตรวจสอบบริเวณที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวอย่าง BC และ NB โดยมีการวัดในช่วง 25 ถึง 800 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า ที่ประมาณ 140 °C แสดงถึงพื้นที่ผิวที่ทำปฏิกิริยาก่อนข้างอ่อนแอ พีกกว้างขนาดใหญ่ที่ 360 °C แสดงในลักษณะเดียวกันคือพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยาที่อ่อนแอ และปานกลาง ปริมาณการดูดซับ  $\text{CO}_2$  สูงสุดอยู่ที่จุดศูนย์กลางที่ 690 °C อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่าง NB การคาย  $\text{CO}_2$  ที่อุณหภูมิ 420 °C (weak and broad) ที่ 550 °C (strong) และ 740 °C (the strongest) จากผลการทดลอง ตัวอย่าง NB แสดงพื้นผิวที่มีบริเวณความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่า BC



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอร์มการดูดซับ CO<sub>2</sub> ของ ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา ที่ 298 K



รูปที่ 4.13 จุดที่ประจุเป็นศูนย์ (Points of zero charge) ของตัวอย่าง BC และ NB



รูปที่ 4.14 กราฟ CO<sub>2</sub>-TPD ของตัวอย่าง BC, NB, NB100, NB200 and NB400

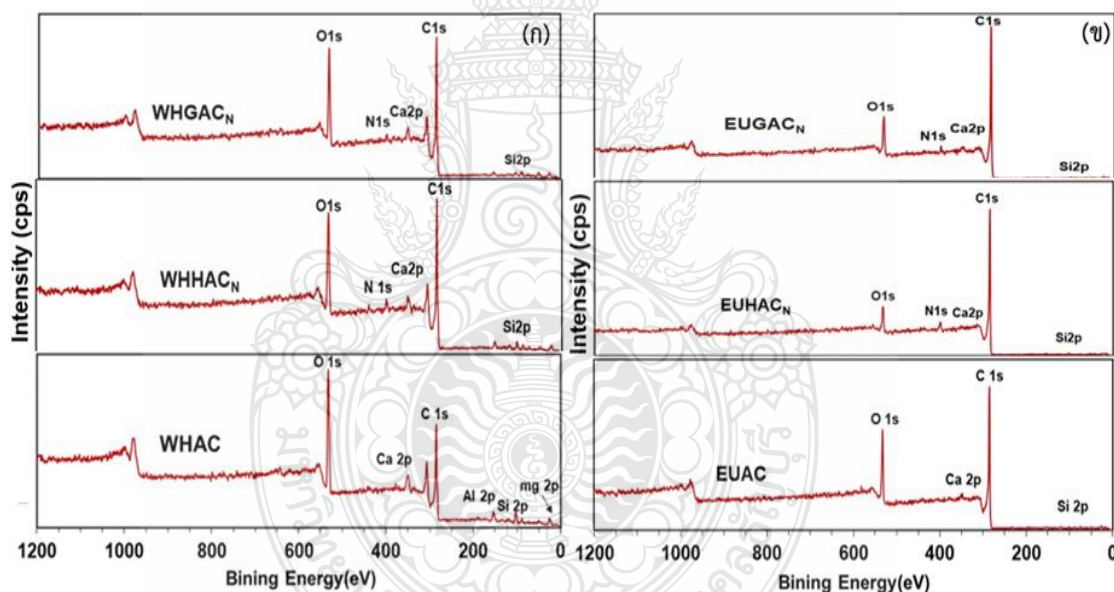
#### 4.4 วิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์

การนำถ่านชีวภาพจากผักตบชวา และถ่านยูคาลิปตัสจากวิสาหกิจชุมชนมากระตุ้นเพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านกัมมันต์ แล้วดัดแปลงเคมีพื้นผิว โดยจะมุ่งเน้นให้เห็นถึงองค์ประกอบทางเคมี พื้นผิว และความบริสุทธิ์ รวมไปถึงความสามารถในการดูดซับ โดยเปรียบเทียบระหว่างสองกระบวนการดัดแปลงหลัก คือ วิธีฉายรังสีแกมมา และวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งจะมีเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 เทคนิควิเคราะห์ผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

หลังจากการทดสอบสมบัติด้วยเทคนิค XPS เพื่อศึกษาปริมาณไนโตรเจนและความหนาแน่นของไนโตรเจนสองประเภท ได้แก่ pyridinic-N (398.5 -399.6 eV) และ pyrrolic-N (400.2-400.8 eV) (รูปที่ 4.16) ในส่วนสเปกตรัม O1s (รูปที่ 4.17) จะประกอบด้วย C=O (529.1-530.0 eV), C-O (530.6-533.7 eV) และ OH-groups (534.4-535.1 eV) และ C1s (รูปที่ 4.18) ประกอบด้วย คาร์บอน C-H (282.0-282.3 eV), C=C ของวงแหวนอะโรมาติก (283.1-285.0 eV), C-O (285.7-287.2 eV) และ C=O (288.0-289.2 eV) ซึ่งทั้งหมดถูกระบุโดยการสแกน XPS ความละเอียดสูงดังแสดงในรูปที่ 4.15 นอกจากนี้ยังพบว่าหลังกระบวนการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ องค์ประกอบของคาร์บอนในถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น และสูงมากขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิวด้วยรังสีแกมมา และไฮโดรเทอร์มอล จากผล XPS วิถีไฮโดรเทอร์มอลแสดงปริมาณไนโตรเจนที่สูงกว่าวิธีการ

ฉายรังสีแกมมา เนื่องจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีแนวโน้มที่จะทำให้สารกลุ่มไนโตรเจนเกิดการแตกตัวจากความร้อนเป็นกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากผลวิเคราะห์ในตัวอย่าง WHAC และ EUAC จะเห็นได้ว่าเป็นพื้นผิวที่อุดมไปด้วยออกซิเจน แต่ปริมาณออกซิเจนจะลดลงหลังจากการดัดแปลงสมบัติในตัวอย่างของ WHGAC<sub>N</sub>, WHHAC<sub>N</sub>, EUGAC<sub>N</sub> และ EUHAC<sub>N</sub> เนื่องจากภายใต้การดัดแปลงโดยการฉายรังสีแกมมาและวิธีการไฮโดรเทอร์มอล โครงสร้างของ NH<sub>3</sub> จะสลายตัวเกิดเป็นอนุโมลอิสระและทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอกซิลิก และออกซิเจนอื่นๆของคาร์บอนเพื่อสร้างกลุ่มฟังก์ชันไนโตรเจนของ Pyridinic-N และ Pyrrolic-N ดังแสดงในรูปที่ 4.16 หลังกระบวนการดัดแปลงเคมีพื้นผิวในตัวอย่าง WHHAC<sub>N</sub> มีแนวโน้มในการพัฒนาโครงสร้างแบบ Pyridinic-N มากกว่า Pyrrolic-N ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการมีอยู่ของกลุ่มไนโตรเจนทั้งสองแล้ว กลุ่มไนโตรเจนของ Pyrrolic-N มีแนวโน้มแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ดีกว่า ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มสูงขึ้น [72]



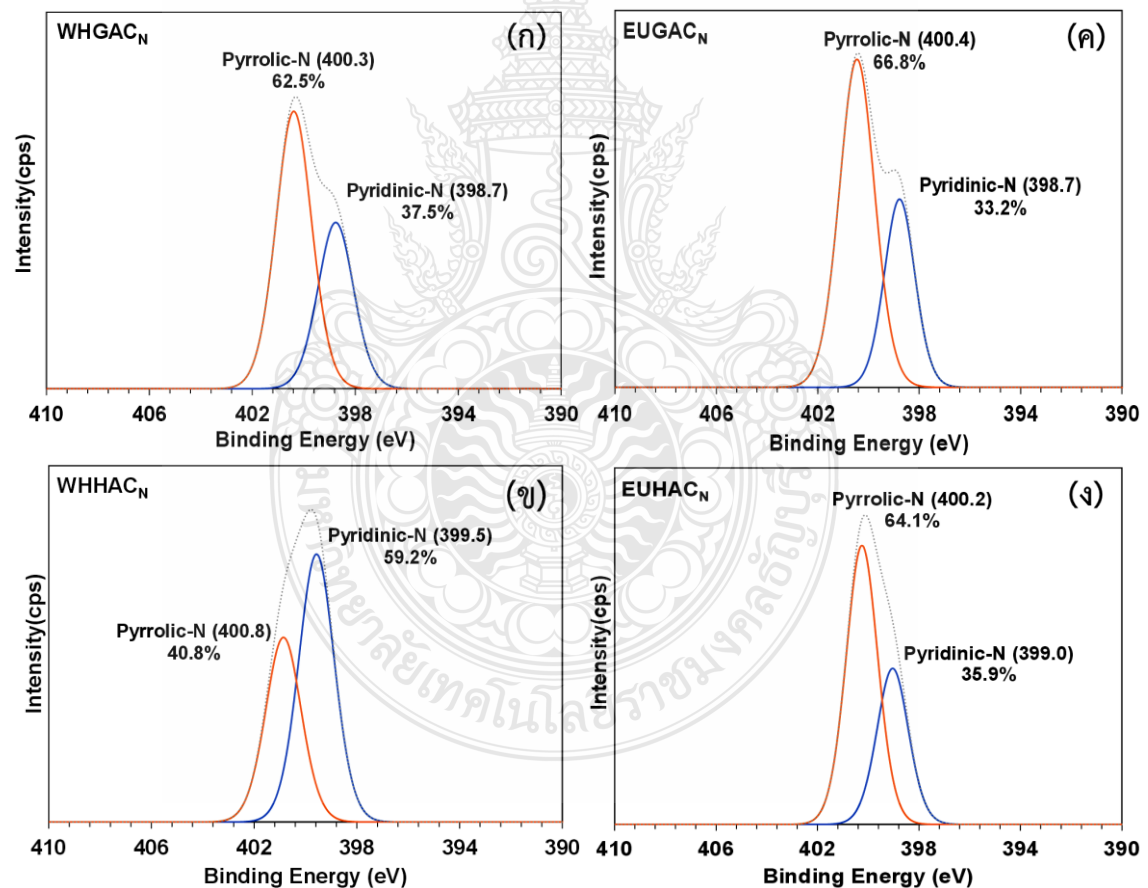
รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วย XPS หลังจากการดัดแปลง NH<sub>3</sub> โดยการฉายรังสีแกมมาและวิธีไฮโดรเทอร์มอล (ก) ผักตบชวา และ (ข) ยูคาลิปตัส

ที่มา: [72]

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของธาตุไนโตรเจนในถ่านกัมมันต์วิเคราะห์โดยเทคนิค XPS

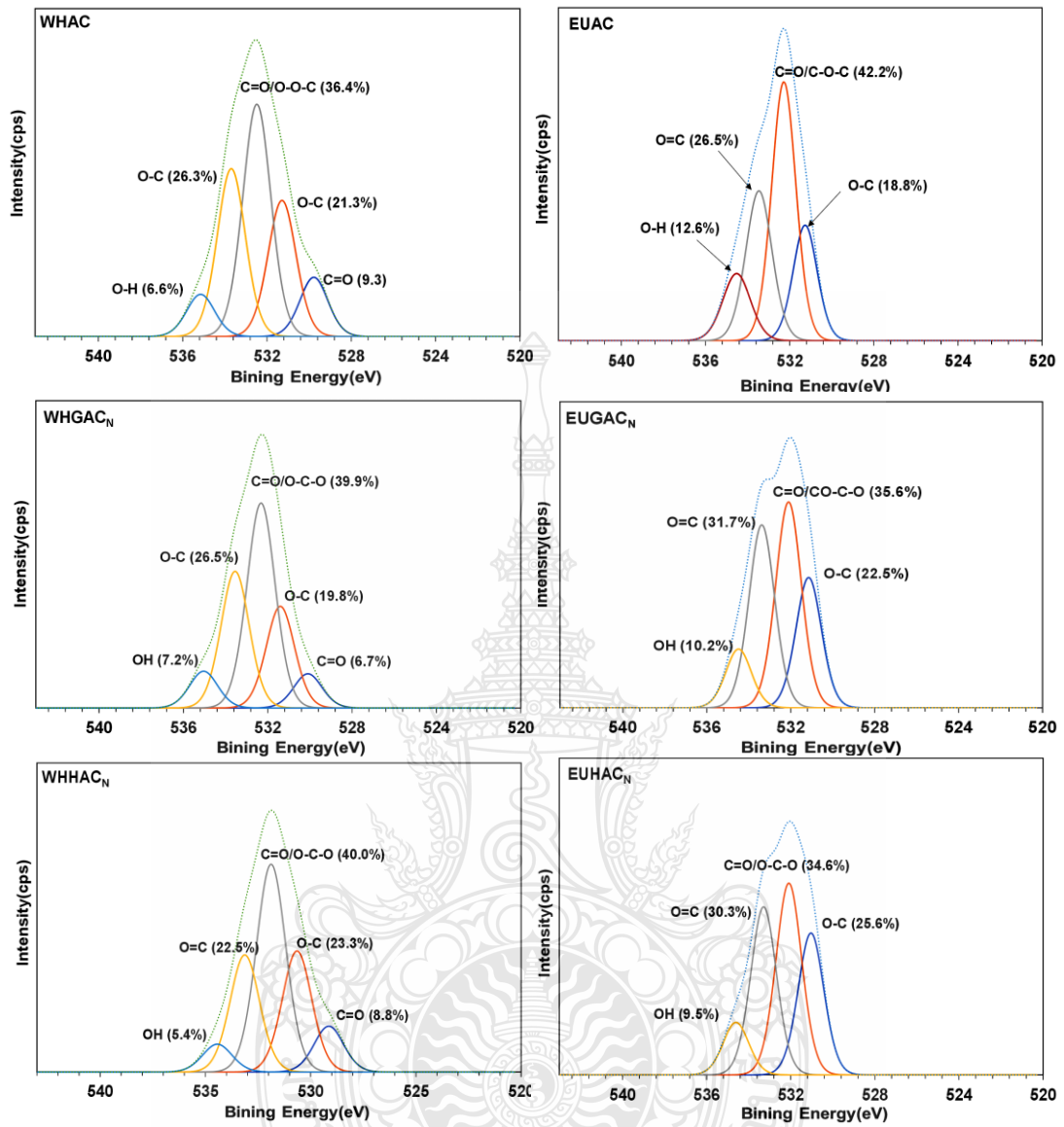
Peaks	Relative content %					
	WHAC	WHGAC <sub>N</sub>	WHHAC <sub>N</sub>	EUAC	EUGAC <sub>N</sub>	EUHAC <sub>N</sub>
C1s	60.63	73.65	70.89	85.27	87.26	88.38
O1s	26.22	18.47	19.06	12.79	10.97	6.70
N1s	-	2.15	3.04	-	1.56	4.02
Ca2p	2.67	1.16	1.53	0.50	0.22	0.21
Si2p	5.69	1.27	2.30	0.73	-	0.69

ที่มา: [72]



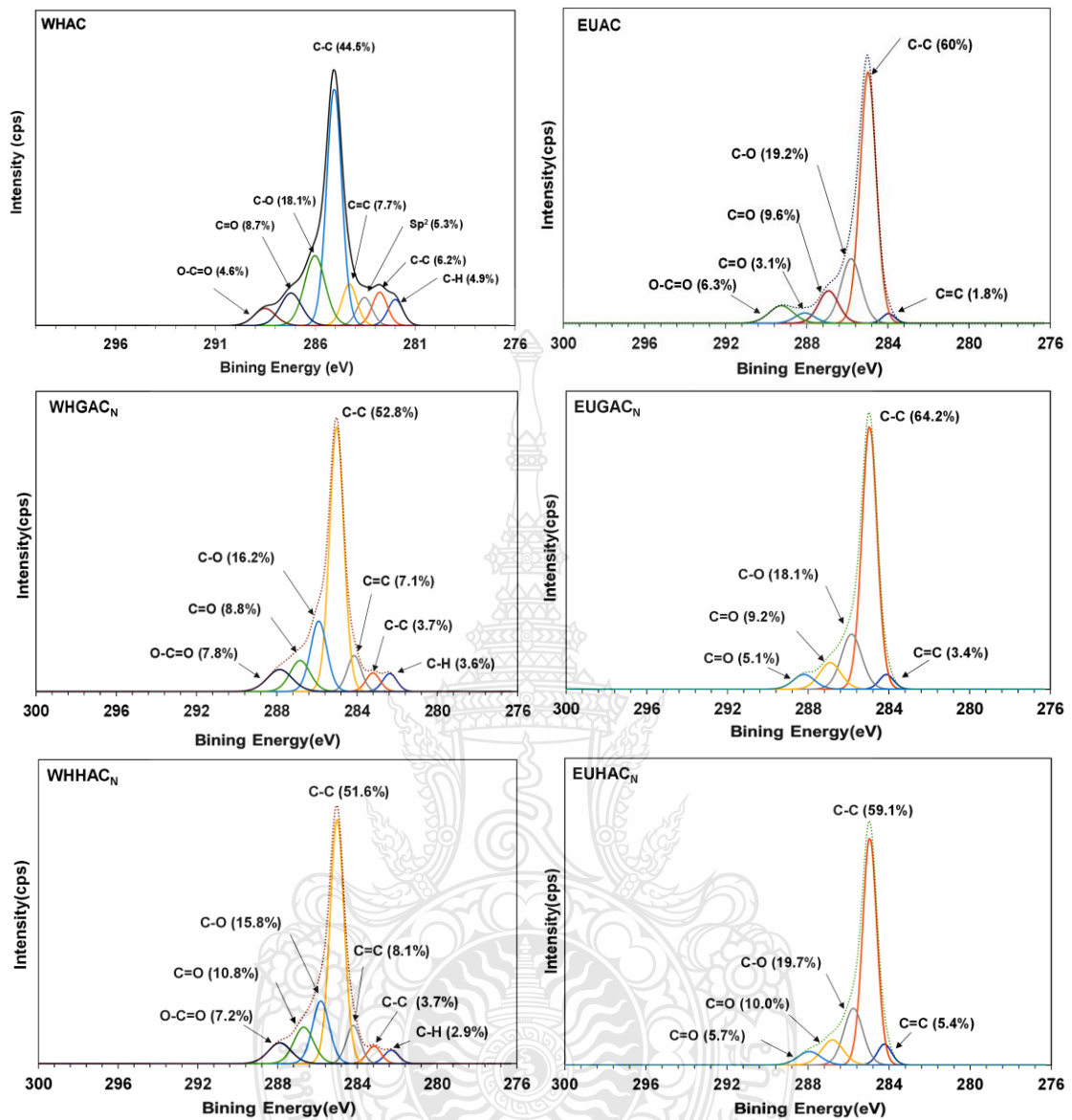
รูปที่ 4.16 องค์ประกอบของไนโตรเจน N1s ของ (ก) WHGAC<sub>N</sub>, (ข) WHHAC<sub>N</sub>, (ค) EUGAC<sub>N</sub>, และ (ง) EUHAC<sub>N</sub>

ที่มา: [72]



รูปที่ 4.17 องค์ประกอบของไนโตรเจน O1s ของ (ก) WHGAC<sub>N</sub>, (ข) WHHAC<sub>N</sub>, (ค) EUGAC<sub>N</sub>, และ (ง) EUHAC<sub>N</sub> ที่มา: [72]

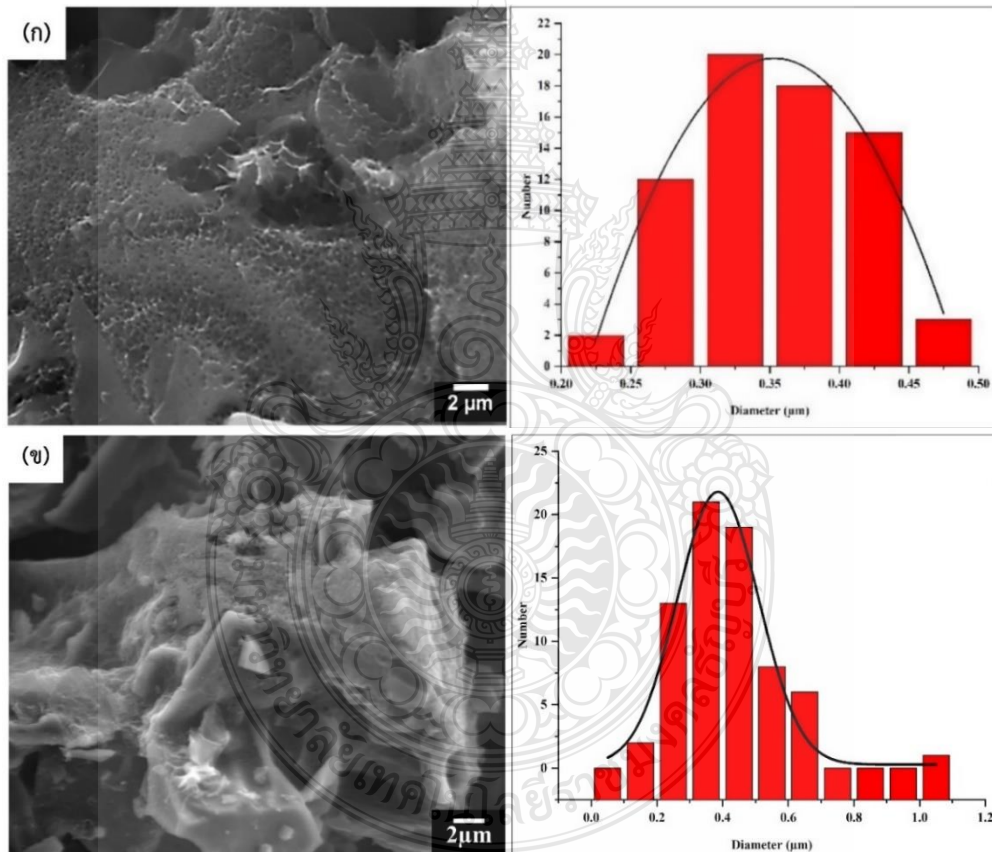




รูปที่ 4.18 องค์ประกอบของไนโตรเจน C1s ของ (ก) WHGAC<sub>N</sub>, (ข) WHHAC<sub>N</sub>, (ค) EUGAC<sub>N</sub>, และ (ง) EUHAC<sub>N</sub> ที่มา: [72]

#### 4.4.2 เทคนิควิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ (Scanning Electron Microscope, SEM)

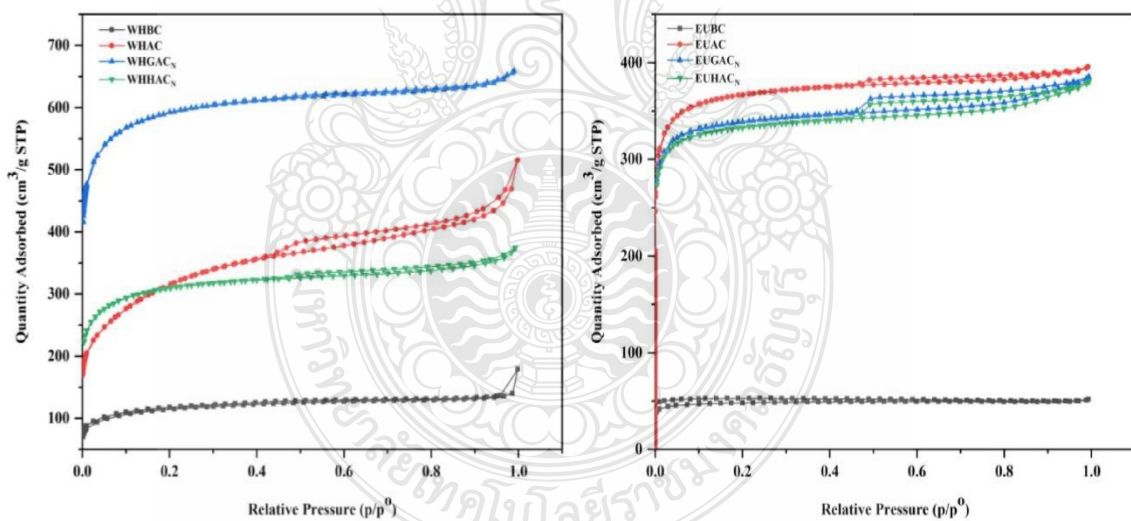
ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการตัดแปลงสมบัติด้วยรังสีแกมมาและวิธีการไฮโดรเทอร์มอล แสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า โครงสร้างรูพรุนส่วนใหญ่จะกระจายอยู่บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่เป็นแบบไมโครพอร์และมีโซพอร์ โครงสร้างมีโซพอร์บนพื้นผิวมีขนาดค่อนข้างเล็กมาก เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยประมาณ  $< 0.35 \mu\text{m}$  นอกจากนี้ หลังจากการปรับปรุงหรือตัดแปลงสมบัติโดยการฉายรังสีแกมมา ในตัวอย่างของ WHGAC<sub>N</sub> และ EUGAC<sub>N</sub> มีแนวโน้มที่จะพัฒนาโครงสร้างไมโครพอร์บนพื้นผิวมากกว่าวิธีไฮโดรเทอร์มอลในตัวอย่าง WHHAC<sub>N</sub> และ EUHAC<sub>N</sub> เนื่องจากภายใต้อุณหภูมิความร้อนของไฮโดรเทอร์มอลอาจส่งผลต่อการสูญเสียพื้นผิวในบางส่วน



รูปที่ 4.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ หลังปรับปรุงสมบัติ (ก) รังสีแกมมา (ข) ไฮโดรเทอร์มอล

#### 4.4.3 เทคนิควิเคราะห์คุณสมบัติของพื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของพื้นผิวในตารางที่ 4.7 และไอโซเทอร์มการดูดซับ/คายดูดซับของ  $N_2$  ที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วย KOH (EUAC, WHAC) นั้นสูงกว่าถ่านชีวภาพ (EUBC, WHBC) และพบว่าหลังจากดัดแปลงโดยการฉายรังสีแกมมาในตัวอย่าง WHGAC<sub>N</sub> จะเพิ่มพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยจาก 1038.7 เป็น 1765.5  $m^2/g$  และ 0.32 เป็น 0.73  $cm^3/g$  ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม EUGAC<sub>N</sub> มีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนลดลงเล็กน้อยหลังจากการดัดแปลงด้วยแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ซึ่งเผยให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคบางตัวถูกปิดกั้นหรืออาจเสื่อมโทรม สำหรับวิธีไฮโดรเทอร์มอล (WHHAC<sub>N</sub> และ EUHAC<sub>N</sub>) พื้นที่ผิว BET ( $S_{BET}$ ) และปริมาตรไมโครพอร์ ( $V_{micro}$ ) ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยแอมโมเนียดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่า พื้นที่ผิว ( $S_{BET}$ ) ของตัวอย่างที่ปรับปรุงสมบัติลดลงเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ได้ดัดแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแปรผันตรงกับการลดลงของปริมาณหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนในถ่านกัมมันต์ จากการศึกษาด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) ได้กำหนดไอโซเทอร์มการดูดซับ-การคายซับของถ่านกัมมันต์เป็นประเภท IV ไอโซเทอร์ม ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงการดูดซับหลายชั้น เช่นเดียวกันกับถ่านชีวภาพ



รูปที่ 4.20 ไอโซเทอร์มการดูดซับ-คายซับก๊าซไนโตรเจนของ (ก) ผักตบชวา และ (ข) ยูคาลิปตัส  
ที่มา: [72]

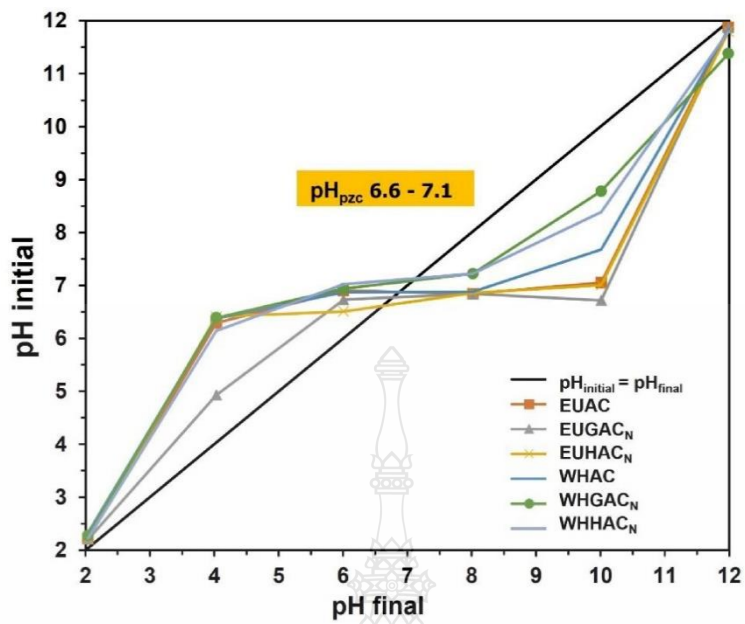
**ตารางที่ 4.7** โครงสร้างความเป็นรูพรุน และคุณสมบัติพื้นผิวของตัวอย่างถ่านชีวภาพ และถ่านกัมมันต์

Samples	<sup>a</sup> BET SA (m <sup>2</sup> /g)	<sup>b</sup> A <sub>micro</sub> (m <sup>2</sup> /g)	<sup>c</sup> A <sub>meso</sub> (m <sup>2</sup> /g)	<sup>d</sup> V <sub>total</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	<sup>b</sup> V <sub>micro</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	<sup>c</sup> V <sub>meso</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	Avg.pore size <sup>e</sup> d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub> (nm)
EUBC	143.70	121.61	13.42	0.07	0.06	0.01	2.13/2.78
EUAC	1150.15	975.63	105.29	0.60	0.49	0.08	2.10/3.05
EUGAC <sub>N</sub>	1059.66	902.47	93.22	0.58	0.45	0.11	2.20/4.47
EUHAC <sub>N</sub>	1013.16	856.76	93.68	0.57	0.44	0.11	2.27/4.80
WHBC	352.76	192.58	119.76	0.12	0.10	0.15	1.46/5.75
WHAC	1038.70	251.39	571.62	0.32	0.14	0.55	1.22/4.00
WHGAC <sub>N</sub>	1765.52	1301.16	241.84	0.73	0.71	0.20	1.67/3.16
WHHAC <sub>N</sub>	991.51	699.44	177.04	0.55	0.35	0.17	2.21/3.92

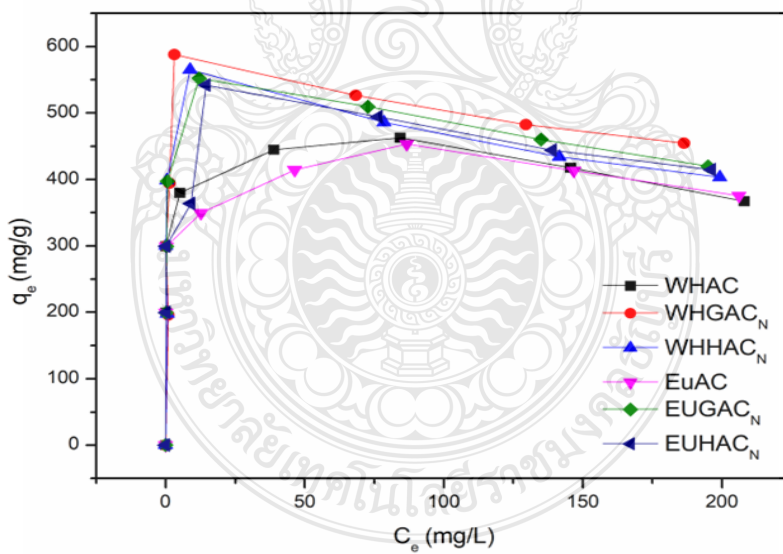
ที่มา: [72]

#### 4.4.4 วิเคราะห์ผลความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

จุดที่มีประจุเป็นศูนย์ ( $pH_{pzc}$ ) ของตัวอย่าง EU และ WH คือ 6.6 – 7.1 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ไอโซเทอร์มของการดูดซับถูกนำมาใช้เพื่อแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เมื่อ  $pH > pH_{pzc}$  บนประจุพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ และสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีประจุบวกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูดังแสดงในรูปที่ 4.22 หลังการกระตุ้นถ่านชีวภาพเป็นถ่านกัมมันต์และปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิว พบว่ามีความสามารถในการดูดซับ MB ( $q_e$ ) เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.8) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองกระบวนการดัดแปลง ถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปลงเคมีพื้นผิวด้วยการฉายรังสีแกมมามีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงกว่าวิธีไฮโดรเทอร์มอลและตัวที่ไม่ดัดแปลง การฉายรังสีแกมมาจะเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุน ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารเคมีแบบขั้นเดียวผ่านพันธะระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดของโมเลกุล-ไอออน นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นระหว่างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์และสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้เป็นอย่างดี [72]



รูปที่ 4.21 จุดของการชาร์จเป็นศูนย์ ( $pH_{pzc}$ ) ของ EUAC,  $EUGAC_N$ ,  $EUHAC_N$ , WHAC,  $WHGAC_N$  และ  $WHHAC_N$   
ที่มา: [72]



รูปที่ 4.22 ไอโซเทอร์มสมดุลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู 24 ชั่วโมง  
ที่มา: [72]

**ตารางที่ 4.8** ค่าการดูดซับ และไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ที่เวลาสมดุล 24 ชั่วโมง

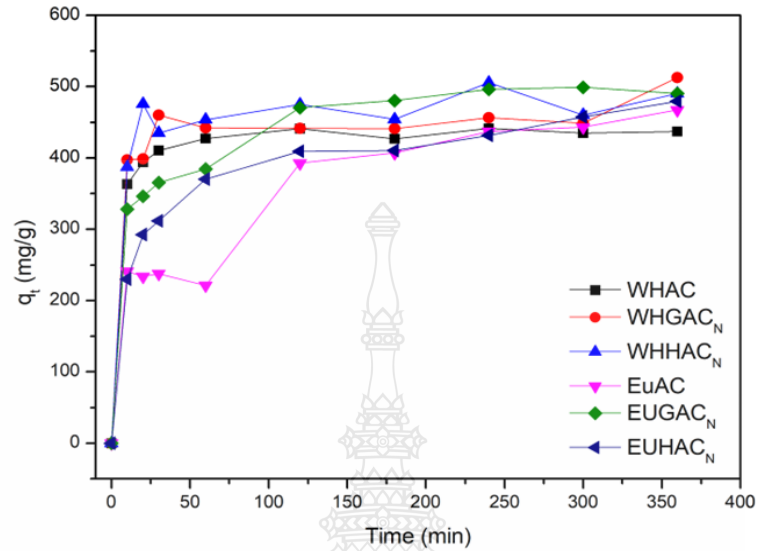
Samples	$q_e$ (mg/g)	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm			
		$Q_o$ (mg/g)	$K_L$	$R^2$	$R_L$	$K_f$	$1/n$	$R^2$
WHAC	462.98	384.62	-0.27	0.9906	-0.025	304.93	0.072	0.7135
WHGAC <sub>N</sub>	587.92	454.55	-0.88	0.9972	-0.008	345.94	0.076	0.3602
WHHAC <sub>N</sub>	565.15	416.67	-0.44	0.9954	-0.015	340.02	0.062	0.3340
EUAC	453.52	384.62	-0.43	0.9933	-0.016	288.67	0.077	0.8086
EUGAC <sub>N</sub>	552.16	434.78	-0.40	0.9948	-0.017	333.58	0.084	0.6131
EUHAC <sub>N</sub>	541.88	416.67	-0.49	0.9957	-0.014	317.03	0.085	0.6912

ที่มา: [72]

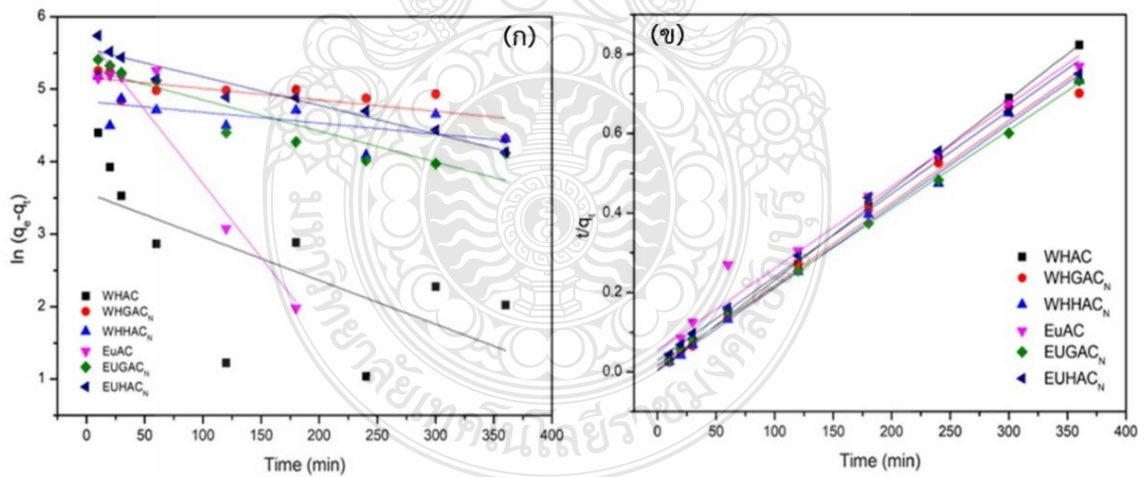
การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยใช้ความเข้มข้นของ MB แตกต่างกันไป 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 และ 300 ppm แสดงในรูปที่ 4.22 จากการศึกษาพบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์จาก EU และ WH จัดเป็นไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เนื่องจากค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากกว่าไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich) ซึ่งลักษณะของไอโซเทอร์มนั้นจะบ่งบอกถึงพฤติกรรมการดูดซับทางเคมีแบบชั้นเดียว ภายใต้ตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน โดยค่าความสามารถในการดูดซับ MB ของ WH และ EU สามารถดูเพิ่มเติมได้ในตารางที่ 4.8 การดูดซับทางจลนศาสตร์แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ MB ดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาที ถึง 180 นาที (รูปที่ 4.23) และถูกกำหนดให้เป็นการดูดซับตรงกับโมเดลลำดับที่สองเทียม ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ข) แสดงให้เห็นว่าการเป็นกรดูดซับทางเคมีที่เกิดจากไฟฟ้าสถิตในบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเท่านั้น

ความสามารถในการดูดซับ MB ของ WH และ EU ดังแสดงในตารางที่ 4.8 แสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับ MB ที่ขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มฟังก์ชันไนโตรเจน พื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ต่อมาในตารางที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ MB ของถ่านกัมมันต์ประเภทต่างๆ ตามการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ผลจากการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์จาก WH และ EU แสดงสมบัติที่ดีกว่ารายงานอื่นๆ ในแง่ของพื้นที่ผิวสูงและประสิทธิภาพการดูดซับ MB และที่สำคัญการฉายรังสีแกมมาเหมาะแก่การเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการดัดแปลงคุณสมบัติทางเคมี

ของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดสารเคมีอันตราย ความร้อน หรือของเสียทางเคมีตกค้างในกระบวนการ



รูปที่ 4.23 จลศาสตร์ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลู ที่สมดุล 6 ชั่วโมง  
ที่มา: [72]



รูปที่ 4.24 ไอโซเทอร์มจลศาสตร์การดูดซับของ (ก) โมเดลลำดับที่หนึ่งเทียม และ (ข) โมเดลลำดับที่สองเทียม

ที่มา: [72]



**ตารางที่ 4.9** แหล่งที่มาของชีวมวล วิธีการดัดแปลง และความสามารถในการดูดซับ MB ของถ่านกัมมันต์ตามการทบทวนวรรณกรรม

Activated carbon	Modification method	$S_{BET}$ ( $m^2/g$ )	$q_e$ (mg/g)	Ref.
Water hyacinth	$NH_3$ /Gamma irradiation	1765.5	587	This work
Eucalyptus	$NH_3$ /Gamma irradiation	1059.6	552	This work
Corn straw	$NH_3$ /pyrolysis 600-800 °C	418.7	436	[60]
Bamboo	Urea/ $KHCO_3$ activation	1693.0	499	[61]
Coffee grounds	HCl/ $CO_2$ activation	2407.0	678	[62]
Water hyacinth	Nitric acid/stems activation	-	286	[63]
Eucalyptus	Citric acid/heat 120 °C	-	175	[64]

ที่มา: [72]





## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่เทคโนโลยีในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยชีวมวลของผักตบชวา (WH) ถูกปรับสภาพด้วยรังสีอิเล็กตรอนและไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนให้เป็นถ่านชีวภาพ หลังจากนั้นมีการดัดแปลงคุณสมบัติทางเคมีด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลภายใต้สภาวะละลายยูเรีย รังสีอิเล็กตรอนมีผลต่อการเสื่อมสภาพในโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส แต่ในส่วนของลิกนินมีผลเฉพาะบริเวณที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ปริมาณการให้รังสีมีแนวโน้มทำลายโครงสร้างของลิกนินในส่วนนี้มากขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของสารชีวมวลมีขนาดเล็กลงหลังจากการฉายรังสีด้วยลำแสงอิเล็กตรอน เนื่องจากการสลายตัวของแอลกอฮอล์ ฟีนอล เอสเทอร์ อีเทอร์ และกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกในโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส สำหรับการไพโรไลซิสและปรับปรุงคุณสมบัติด้วยยูเรีย โครงสร้างของชิ้นส่วนกราฟไฟท์ที่ไม่เป็นระเบียบจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่ามีข้อบกพร่องของโครงสร้างเคมีพื้นผิวเกิดขึ้นระหว่างการเติมไนโตรเจน ปริมาณไนโตรเจนของ BC อยู่ที่ประมาณ 2% และเพิ่มขึ้นหลังจากการเติมยูเรียด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ประกอบด้วย Pyridinic-N, Pyrrolic-N และ Graphitic-N ไนโตรเจน ซึ่งเป็นไนโตรเจนที่สามารถเพิ่มไฟฟ้าสถิต พันธะไฮโดรเจน และ  $\pi$ - $\pi$  stacking ระหว่างโมเลกุลของถ่านชีวภาพและ CO<sub>2</sub> การฉายรังสีที่ 400 kGy (462 m<sup>2</sup>/g) ภายใต้การปรับสภาพยูเรียสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวได้ประมาณสามเท่าของ BC ที่ไม่ได้รับรังสี (152 m<sup>2</sup>/g) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม สำหรับความสามารถในการดูดซับ CO<sub>2</sub> เคมีพื้นผิวและโครงสร้างอะตอมไนโตรเจนมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ แม้ว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง NB400 สูงที่สุด แต่ก็ได้รับความสามารถในการดูดซับ CO<sub>2</sub> ต่ำที่สุดในกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติ

ถ่านชีวภาพจากผักตบชวา และถ่านยูคาลิปตัสถูกกระตุ้นด้วย KOH เปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ (AC) สำหรับการกำจัดเมทิลีนบลู (MB) กระบวนการกระตุ้นของถ่านกัมมันต์จาก WH และ EU ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หลังจากการดัดแปลงหรือปรับปรุงคุณสมบัติด้วยแอมโมเนียโดยการฉายรังสีแกมมาและวิธีการไฮโดรเทอร์มอล แอมโมเนียจะถูกแปลงเป็นโครงสร้างไนโตรเจนประเภท pyridinic-N และ pyrrolic-N ที่ติดอยู่กับโครงสร้างอะโรมาติกของคาร์บอน ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการดูดซับของ MB เช่นเดียวกับถ่านชีวภาพ วิธีไฮโดรเทอร์มอลมีแนวโน้มที่จะเพิ่มกลุ่มที่ประกอบด้วยไนโตรเจนมากกว่าการฉายรังสีแกมมา แต่ในจุดประสงค์ของการ

กำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู การฉายรังสีแกมมามีประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงกว่าวิธีไฮโดรเทอร์มอล จากการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด พบว่า WHAC ที่ดัดแปลงโดยการฉายรังสีแกมมา (593 mg/g) มีความสามารถในการดูดซับ MB ที่สูงกว่า EUAC (552 mg/g) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรไมโครพอร์/มีโซพอร์สูง นอกจากนี้พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปลงเคมีพื้นผิวสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากกว่าถ่านชีวภาพที่รายงานในการศึกษาก่อนหน้านี้ ความสำเร็จในการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันพื้นผิวดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้กับการกำจัดโลหะหนักหรือมลพิษทางน้ำที่มีประจุบวกได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเลือกใช้วัสดุดิบนั้น ควรเน้นไปที่การกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นชีวมวลหรือพืชที่อาจส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม เช่น ผักตบชวาหรือพืชรุกราน และมีปริมาณเหลือทิ้งจำนวนมาก เช่น กะลาปาล์ม และไม้โตเร็ว เป็นต้น มาผลิตเป็นถ่านชีวภาพหรือถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้เศษถ่านเหลือใช้จากชุมชนที่เหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวก็มาสารนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดมูลค่าเพิ่มด้วยการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์เช่นเดียวกัน

5.2.2 ควรศึกษาการเตรียมถ่านชีวภาพหรือถ่านกัมมันต์ทางเคมีโดยใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ เช่นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดซิตริก หรือกรดแอสติก เป็นต้น เพื่อศึกษาถึงบทบาทและกลไกของสารเคมีต่อการพัฒนาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน

5.2.3 ควรศึกษาวิธีปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพเพื่อเพิ่มชนิดและปริมาณของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวให้สามารถนำถ่านชีวภาพไปใช้ดูดซับสารต่าง ๆ จากแก๊สและสารละลายได้หลากหลายขึ้น เช่น วิตามินซี และ ระเบิดไอน้ำ เป็นต้น

5.2.4 ขนาดและอนุภาคของวัตถุดิบมีผลต่อผลิตผลที่ออกมาจากการไพโรไลซิส โดยขนาดวัตถุดิบที่ค่อนข้างละเอียด หรือเล็กกว่าจะมีมวลน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ทำให้ขนาดวัตถุดิบที่ 200 เมช ให้ค่าผลิตผลออกมาสูงกว่าที่ 150 เมช

5.2.5 อุณหภูมิในการไพโรไลซิสมีผลต่อผลิตผล และการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์อยู่ที่ 400–800 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยสารเคมีอยู่ที่ 400–900 องศาเซลเซียส การเพิ่มเวลากระตุ้นอาจทำให้สมบัติรูพรุนต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นการกระตุ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 900 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลากระตุ้นมากกว่า 60 นาที มักมีผลทำให้สมบัติความพรุนลดลง [73]

5.2.6 ความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างร้อยละน้ำหนักที่หายไปในช่วงตอนการกระตุ้น (ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิการกระตุ้น) กับพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน คือเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้ผลิตผลที่ได้ลดลง แต่พื้นที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5.2.7 ถ่านชีวภาพที่เตรียมจากผักตบชวาไม่เพียงแต่สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูหรือ CO<sub>2</sub> ได้ แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอาหารและยา ที่นำไปใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวกได้เป็นอย่างดี เนื่องจากในงานวิจัยได้รับความสำเร็จในการปรับปรุงพื้นผิวถ่านชีวภาพให้เต็มไปด้วยโครงสร้างที่เพิ่มแรงดึงดูด หรือเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพ และสารที่ถูกดูดซับ (ประจุบวก) เช่น Cu<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup>

5.2.8 สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการกำจัดสารละลายโลหะหนัก หรือเหล็กในน้ำได้ เช่น การกรองน้ำตามบ้านเรือนที่ใช้น้ำบาดาลเพราะพบสารละลายเหล็กค่อนข้างมาก

### 5.3 ต้นทุนในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

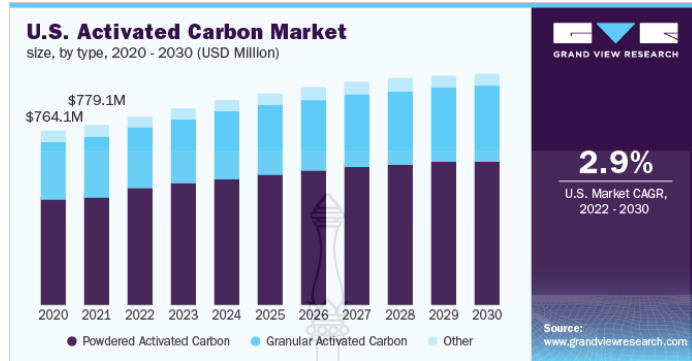
สูตรการคำนวณ

กำลังไฟฟ้า (วัตต์) × จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า ÷ 1000 × จำนวนชั่วโมงที่ใช้ใน 1 วัน = จำนวนหน่วยต่อวัน (ยูนิต) ดังนั้นการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่กำลังไฟฟ้า 5.2 kW จำนวน 1 เครื่อง ใช้เวลาทั้งหมด 12 ชั่วโมง เป็นดังนี้

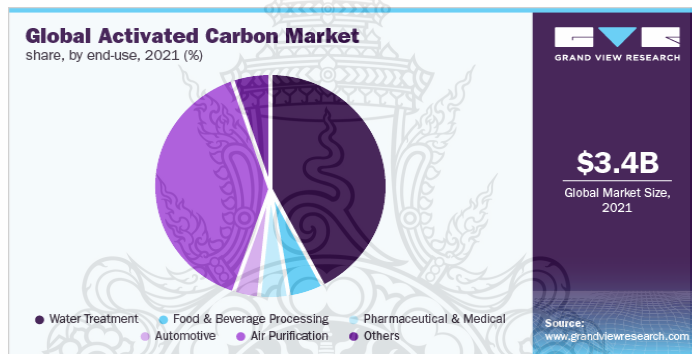
$$5200 \text{ W} \times 1 \div 1000 \times 12 = 62.4 \text{ หน่วยต่อวัน หรือ } 1872 \text{ หน่วยต่อเดือน}$$

ใน 1 เดือน การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง tube furnace (30–3000°C) จะใช้ไฟฟ้าอยู่ที่ 1872 หน่วย หรือคิดเป็นค่าปลดปล่อย CO<sub>2</sub> จากพลังงานไฟฟ้าคือ 2.9172 kg CO<sub>2</sub> eq/unit และค่าปริมาณเผาไหม้ก๊าซไนโตรเจน คือ 0.0573 kg CO<sub>2</sub> eq/unit แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพหรือถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมีความสามารถในการกักเก็บ CO<sub>2</sub> เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้มากมาย เช่น สังเคราะห์พลาสติก หรือยาง เป็นต้น ตามที่ผู้วิจัยได้ศึกษานั้น มีการคำนวณเฉพาะในองค์ประกอบหลักของการผลิต แต่ยังไม่ได้มีการคำนวณในส่วนของการขนส่งหรือจากสารเคมีต่างๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการ หากมีผู้วิจัยท่านอื่นสนใจอาจจะต้องมีการคำนวณให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพและถ่านกัมมันต์จะค่อนข้างสูง แต่ถึงอย่างไรก็ตามหากมุ่งเน้นไปที่ความคุ้มค่าต่อการนำของเสียทางการเกษตร หรือวัชพืชที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมมาประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายขึ้น ย่อมเป็นผลดีต่อการสร้างความยั่งยืนให้กับองค์กร อีกทั้งยังสร้างความรู้ และแหล่งข้อมูลใหม่ๆ ให้กับชุมชน โดยหากมีการเพิ่มมูลค่าจากเศษถ่านเหลือใช้จากวิสาหกิจชุมชนที่หลงเหลือจากการเก็บเกี่ยว และการนำไปขายที่ไม่มีมูลค่านั้น มาทำการกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ จะเป็นการเพิ่มมูลค่าอย่างมากในส่วนที่จะต้องทิ้งไป เนื่องจากพื้นที่ผิวความเป็นรูพรุนมากขึ้น จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายขึ้น เช่น ตัวกรองน้ำ ตัวเก็บประจุ ตัวกักเก็บพลังงาน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบรายงานจากตลาดโลกในช่วงปี 2020-2030 ถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มมูลค่าเพิ่มขึ้น 2.9%

ต่อปี (รูปที่ 5.1) โดยส่วนใหญ่เป็นการนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองน้ำ และกรองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เป็นต้น [74]



รูปที่ 5.1 แนวโน้มตลาดโลกของถ่านกัมมันต์ในช่วงปี 2020-2030  
ที่มา: [74]



รูปที่ 5.2 แนวโน้มในการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์  
ที่มา: [74]

## บรรณานุกรม

- [1] บุชบา อู่อรุณ. (2557). การศึกษาการลดปริมาณผักตบชวาเพื่อนำไปสร้างธุรกิจขนาดย่อมในชุมชนหลวงพรตท่านเลี่ยม เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี*, 8(17), 38-44.
- [2] รัชพล พะวงศ์รัตน์. (2558). กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2(1), 143-157.
- [3] Z. Lu, H. Zhang, A. Shahab, K. Zhang, H. Zeng, A. Bacha, I. Nabi, and H. Ullah, “Comparative study on characterization and adsorption properties of phosphoric acid activated biochar and nitrogen-containing modified biochar employing Eucalyptus as a precursor,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 303, 127046, Jun 2021.
- [4] W. Maulina, R. Kusumaningtyas, Z. Rachmawati, Supriyadi, A. Arkundato, I. Rohman, and E. Purwandari, “Carbonization Process of Water Hyacinth as an Alternative Renewable Energy Material for Biomass Cook Stoves Applications,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 239, 012035, Apr 2019.
- [5] A. S. Mestre, R. A. Pires, I. Aroso, E. M. Fernan-des, M. L. Pinto, R. L. Reis, M. A. Andrade, J. Pires, S. P. Silva, and A. P. Car-yalho, “Activated carbons prepared from industrial pre-treated cork:Sustainable adsorbents for pharmaceu-tical compounds removal,” *Chemical Eng-ineering Journal*, vol. 253, pp. 408-417, Oct 2014.
- [6] C. Monreno-Castilla, F. Carrasco-Marin, V. Lopez-Ramon, and M. A. Alvarez-Merino, “Chemical and physical activation of olive-mill waste water to produce activated carbons,” *Carbon*, vol. 39, pp. 1415-1420, Aug 2001.
- [7] H. M. Virginia, and B. P. Adrián, *Lignocellulosic Precursors used in the Synthesis of Activated Carbon: Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment*. ISBN, 2012.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] S. Mopoung, and N. Dejang, “Activated carbon preparation from eucalyptus wood chips using continuous carbonization–steam activation process in a batch intermittent rotary kiln,” *Scientific Reports*, vol. 11, 13948, Jul 2021.
- [9] Temtarasilp, P. (2008). Preparation and characterization of activated carbon from *Dendrocalamus asper* Backer and *Dendrocalamus Latiflorus*. (Master’s thesis, Kasetsart University, Thai Land)
- [10] N. A. Fathy, S. A. Sayed, and R. M. M. Abo El-enin, M. A, “Effect of activation temperature on textural and adsorptive properties for activated carbon derived from local reed biomass: Removal of p-Nitrophenol,” *Environmental Research, Engineering and Management*, vol. 59, pp. 10–22, Mar 2012.
- [11] F. Kaosuah, B. Kaouah, T. Berrama, M. Trai, and B. Bendjama, “Preparation and characterization of activated carbon from wild olive cores (oleaster) by  $H_3PO_4$  for the removal of Basic Red 46,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 54, pp. 296–306, Sep 2013.
- [12] J. M. Salman, V. O. Njoku, and B. H. Hameed, “Bentazon and carbofuran adsorption onto date seed activated carbon: Kinetics and equilibrium,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 173, pp. 361–368, Sep 2011.
- [13] M. M. Rahman, M. Adil, A. M. Yusof, Y. B. Kamaruzzaman, and R. H. Ansary, “Removal of heavy metal ions with acid activated carbons derived from oil palm and coconut shells,” *Materials*, vol. 7, pp. 3634–3650, May 2014.
- [14] ชีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล. (2560). ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ. *วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้*, 8(1), 196-214.
- [15] ข้อมูลผักตบชวาเบื้องต้น กรมโยธาธิการและผังเมือง, สืบค้นเมื่อ 15 สิงหาคม 2565 (ออนไลน์) ที่มา: <https://onedptportal.dpt.go.th>

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16] M. Dietrich, B. Bert van de, V. Anthony Bridgwater, C. Douglas Elliott, O. Anja, and P. Fernando, “State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 619–641, Apr 2013.
- [17] Y. fengcui, Junmeng, Q. xiangwang, W. mingzhang, X. yicheng, and W. fuchen, “Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China,” *Journal of Integrative Agriculture* Vol. 16, pp. 1064-1074, May 2017
- [18] ภควดี สุขอนันต์. (2551). การศึกษาพื้นที่ผิวของถ่านและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร. *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, 7(2), 30-36.
- [19] D. Pranjali Muley and B. Dorin, “Advances in biomass pretreatment and cellulosic bioethanol production using microwave heating,” *Proceedings of SEEP2017*, 2017, pp. 27-30.
- [20] N. P. Jindrayani, E. S. Felycia, L. Shi-Yow, J. Yi-Hsu, and I. Suryadi, Pretreatment and conversion of lignocellulose biomass into valuable chemicals. *RSC Advances*, 2016.
- [21] H. Chao, T. Chunyan, L. Chuanhao, Y. Jihui, T. Khanh-Quang, B. Quang-Vu, Q. Rongliang, and Y. Yanhui, “Wet torrefaction of biomass for high quality solid fuel production: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 259–271, Aug 2018.
- [22] L. Johannes, G. John, and R. Marco, “Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review,” *Published*, vol. 16, pp. 403-427, May 2006.
- [23] D. Mark, L. David, M. John, and P. Graeme, *A Roadmap for Alternative Fuels in Australia: Ending our Dependence on Oil*. National Roads & Motorists Association Limited, 2008.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [24] พชรินทร์ ฤชวรารักษ์ และ พันธุ์ทิพย์ ตาทอง. (2014). การเผาถ่าน วิธีดั้งเดิมของชุมชนท้องถิ่น สู่วิศวกรรมเทคโนโลยีพลังงานทางเลือก. วารสารวิชาการ มหาลัษราชภัฏบุรีรัมย์, 6(2), 52-71.
- [25] กุลนันทน์ วีรณรงค์กร และ อมรชัย อารณวิธานพ. (2558). หน่วยปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมกระบวนการเชิงคำนวณ. วารสารพลังงานและสิ่งแวดล้อม, 42(241), 61-64.
- [26] B. Amit, H. William, M. Marcia, and S. Mika, "An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications," Chemical Engineering Journal, vol. 219, pp. 499–511, Mar 2013.
- [27] C. Moreno-Castilla, M.A. Ferro-Garcia, J.P. Joly, I. Bautista-Toledo, F. Carrasco-Marin, and J. Rivera-Utrilla, "Activated carbon surface modifications by nitric acid, hydrogen peroxide, and ammonium peroxydisulfate treatments," Langmuir, vol. 11, pp. 4386–4392, Nov 1995.
- [28] Y. Otake, and R.G. Jenkins, "Characterization of oxygen-containing surface complexes created on a microporous carbon by air and nitric acid treatment," Carbon, vol. 31, pp. 109–121, Jul 1993.
- [29] M. Delamar, G. Désarmot, O. Fagebaume, R. Hitmi, J. Pinsonc, and J.M. Savéant, "Modification of carbon fiber surfaces by electrochemical reduction of aryl diazonium salts: application to carbon epoxy composites," Carbon, vol. 35, pp. 801–807, Jan 1997.
- [30] A.B. García, A. Martínez-Alonso, C.A. Leon y Leon, and J.M.D. Tascón, "Modification of the surface properties of an activated carbon by oxygen plasma treatment," Fuel, vol. 77, pp. 613–624, Apr 1998.
- [31] O.V. Belyaeva, T.A. Krasnova, and S.A. Semenova, "Effect of modification of granulated activated carbons with ozone on their properties," Russ. J. Appl. Chem, vol. 84, pp. 597–601, May 2011.
- [32] W. Shen, Z. Li, and Y. Liu, "Surface chemical functional groups modification of porous carbon," Rec. Patents Chem. Eng, vol. 1, pp. 27–40, Jan 2008.



## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] J.A. Menendez, J. Phillips, B. Xia, and L.R. Radovic, "On the modification and characterization of chemical surface properties of activated carbon: In the search of carbons with stable basic properties," *Langmuir*, vol. 12, pp. 4404–4410, Sep 1996.
- [34] C.L. Mangun, K.R. Benak, J. Economy, and K.L. Foster, "Surface chemistry, pore sizes and adsorption properties of activated carbon fibers and precursors treated with ammonia," *Carbon*, vol. 39, pp. 1809–1820, Oct 2001.
- [35] E. Raymundo-Pinero, D. Cazorla-Amoros, and A. Linares-Solano, "The role of different nitrogen functional groups on the removal of SO<sub>2</sub> from flue gases by N-doped activated carbon powders and fibres," *Carbon*, vol. 41, pp. 1925–1932, Apr 2003.
- [36] R.L. Vaughan Jr., and B.E. Reed, "Modeling As(V) removal by a iron oxide impregnated activated carbon using the surface complexation approach," *Water Res*, vol. 39, pp. 1005–1014, Mar 2005.
- [37] C.O. Ania, J.B. Parra, J.A. Menéndez, and J.J. Pis, "Effect of microwave and conventional regeneration on the microporous and mesoporous network and on the adsorptive capacity of activated carbons," *Micropor. Mesopor. Mater*, vol. 85, pp. 7–15, Oct 2005.
- [38] C.A. Zaror, "Enhanced oxidation of toxic effluents using simultaneous ozonation and activated carbon treatment," *J. Chem. Technol. Biotechnol.* Vol. 70, pp. 21–28, Jun 1997.
- [39] U. Jans, and J. Hoigné, "Activated carbon and carbon black catalyzed transformation of aqueous ozone into OH-radicals," *Ozone, Sci. Eng*, vol. 20, pp. 67–90, Apr 1998.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [40] J. Rivera-Utrilla, and M. Sanchez-Polo, "Ozonation of 1,3,6-naphthalenetrisulphonic acid catalysed by activated carbon in aqueous phase," *Appl. Cataly. B: Environ*, vol. 39, pp. 319–329, Dec 2002.
- [41] J. Rivera-Utrilla, and M. Sanchez-Polo, "The role of dispersive and electrostatic interactions in the aqueous phase adsorption of naphthalenesulphonic acids on ozone-treated activated carbons," *Carbon*, vol. 40, pp. 2685–2691, May 2002.
- [42] H.-D. Choi, W.-S. Jung, J.-M. Cho, B.-G. Ryu, J.-S. Yang, and K. Baek, "Adsorption of Cr(VI) onto cationic surfactant-modified activated carbon," *J. Hazard. Mater*, vol. 166, pp. 642–646, Jul 2009.
- [43] ฐิติมา คงรัตน์อาภรณ์, สุชาดา เสกสรรค์วิริยะ, วณิช ลิ้มโอภาสมณี, ทศพล แทนรินทร์ และเพชรจิ๋ม เข้มทอง, ผลของการฉายลาอิล็กตรอนและรังสีแกมมาต่อการเจริญเติบโตและการสร้างเม็ดสีของมอดยาสูบ. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 44(2), 105-108.
- [44] A. K. Mohd et al., *Irradiation Pretreatment of Tropical Biomass and Biofiber for Biofuel Production*. Published: 20th, 2016.
- [45] T. Kwamman, S. Anantachaisilp, P. Limmeechokchai, and K. Kanjana, "Enhancements of surface functional groups and degree of graphitization in gamma irradiated activated carbon as an electrode material," *Radiat. Phys. Chem*, vol. 195, pp. 110062, Jun 2022.
- [46] V-G. Inmaculada, J.J. López-Pen˜alver, S-P. Manuel, R-U. José, "Surface modifications of activated carbon by gamma irradiation," *CARBON*, vol, 67, pp. 236-249. Oct 2013.
- [47] N. A. Teck, R. Y. Brent, B. Rob, T. Matthew, K. A. Mohamed, and B. Saeid, "Oxidative hydrothermal surface modification of activated carbon for sevoflurane removal," vol. 264, Feb 2021.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [48] ผกามาศ ราชมนตรี. (2560). การย่อยสลายฟางข้าวโดยเชื้อจุลินทรีย์ทนร้อนที่มีความสามารถในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส, (รายงานการวิจัย). มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- [49] จีระศักดิ์ เพ็ญคุณ. (2557). การศึกษาทดลองการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยถ่านกัมมันต์และดูดซึมโดยน้ำ. (ปริญญามหาบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)
- [50] F. Xionghui, J. Wenbao, W. Junqi, C. Ting, and L. Yongsheng, “Study on enzymatic hydrolysis efficiency and physicochemical properties of cellulose and lignocellulose after pretreatment with electron beam irradiation,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 145, pp. 733-739, Feb 2020.
- [51] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. (2564). ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, สืบค้นจาก <https://sites.google.com/site/csicscitu>
- [52] สถาบันชินโครตรอน (องค์การมหาชน). (2564). ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, สืบค้นจาก <https://www.slri.or.th/bdd/th>
- [53] ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2564). ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์, สืบค้นจาก <https://www.thep-center.org>
- [54] S. Oliver, S. Irina, F. Elisabeth, S. Ivan, “Markus Bacher, and Antje Potthast, Lignin Resists High-Intensity Electron Beam Irradiation,” *Biomacromolecules*, vol. 22, pp. 4365–4372, Sep 2021.
- [55] N. Soudani, S. Souissi-najar, and A. Ouederni, “Influence of Nitric Acid Concentration on Characteristics of Olive Stone Based Activated Carbon,” *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 21, pp. 1425-1430, Dec 2013.
- [56] J. Przepiorski, “Enhanced adsorption of phenol from water by ammonia treated activated carbon,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 135, pp. 453–456, Jul 2006.
- [57] T. N. Ang, B. R. Young, R. Burrell, M. Taylor, M. K. Aroua, and S. Baroutian, “Oxidative hydrothermal surface modification of activated carbon for sevoflurane removal,” *Chemosphere*, vol. 264, Feb 2021.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [58] T. Thurakitseree, C. Kramberger, N. Chanlek, R. Supruangnet, A. Wisitsorraat, H. Nakajima, and S. Maruyama, "The influence of  $\gamma$ -irradiation on nitrogen configuration in nitrogen-doped single-walled carbon nanotubes," *Diamond and Related Materials*, vol. 101, pp. 107569, Jan 2020.
- [59] S. Shahkarami, R. Azargohar, A.K. Dalai, and J. Soltan, "Breakthrough CO<sub>2</sub> adsorption in bio-based activated carbons," *J Environ Sci (China)*, vol. 34, pp. 68–76, Aug 2015.
- [60] Z. Li, Xing, B. Ding, Y. Li, and Y. Wang, S, "A high-performance biochar produced from bamboo pyrolysis with in-situ nitrogen doping and activation for adsorption of phenol and methylene blue," *Chin. J. Chem. Eng.*, vol. 28, pp. 2872-2880, Nov 2020.
- [61] F. Lian, G. Cui, Z. Liu, L. Duo, G. Zhang, B. Xing, "One-step synthesis of a novel N-doped microporous biochar derived from crop straws with high dye adsorption capacity," *J. Environ. Manage.*, vol. 176, pp. 61-68. Jul 2016.
- [62] C.-H. CHIANG, J. CHEN, and J.-H. LIN, "Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, Aug 2020.
- [63] F. Amalina, A.S.A. Razak, S. Krishnan, A.W. Zularisam, and M. Nasrullah, "Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for organic contaminants removal in water – A review," *J. Hazard. Mater.*, vol.7, Aug 2022.
- [64] L. Sun, D. Chen, S. Wan, and Z. Yu, "Performance, kinetics, and equilibrium of methylene blue adsorption on biochar derived from eucalyptus saw dust modified with citric, tartaric, and acetic acids," *Bioresour Technol*, vol. 198, pp. 300-308. Dec 2015.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [65] P. S. Oliver, H. B. Robert, and P. Antje, "Tailoring Pulp Cellulose with Electron Beam Irradiation: Effects of Lignin and Hemicellulose," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 8, pp. 7235-7243, Apr 2020.
- [66] N. RAJESWARA RAO, T. VENKATAPPA RAO, S. V. S. RAMANA REDDY, and B. SANJEEVA RAO, "Effect Of Electron Beam On Thermal, Morphological And Antioxidant Properties Of Kraft Lignin," *Advanced Materials Letters*, vol. 6, pp. 560-565, Jun 2015.
- [67] S. S. SAHOO, V. K. VIJAY, R. CHANDRA, and H. KUMAR, "Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 3, Jul 2021.
- [68] J.-Y. LEE, B.-M. LEE, J. JEUN, and P.-H. KANG, "Pretreatment of Kenaf Core by Combined Electron Beam Irradiation and Water Steam for Enhanced Hydrolysis," *Korean Chemical Engineering Research*, vol. 52, pp. 113-118, Nov 2014.
- [69] K. KANJANA, P. HARDING, T. KWAMMAN, W. KINGKAM, and T. CHUTIMASAKUL, "Biomass-derived activated carbons with extremely narrow pore size distribution via eco-friendly synthesis for supercapacitor application," *Biomass and Bioenergy*, vol. 153, pp. 106206, Oct 2021.
- [70] J. LI, A. BAO, J. CHEN, and Y. BAO, "A green route to CO<sub>2</sub> adsorption on biomass chitosan derived nitrogen-doped micropore-dominated carbon nanosheets by different activators," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 10, Feb 2022.
- [71] S.-H. LIU, and Y.-Y. HUANG, "Valorization of coffee grounds to biochar-derived adsorbents for CO<sub>2</sub> adsorption," *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, pp. 354-360, Feb 2018.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [72] T. Phonlam, B. Weerasuk, P. Sataman, T. Duangmanee, S. Thongphanit, K. Nilgumhang, S. Anantachaisilp, T. Chutimasakul, T. Kwamman, V. Chobpattana, “Ammonia modification of activated carbon derived from biomass via gamma irradiation vs. hydrothermal method for methylene blue removal,” South African Journal of Chemical Engineering, vol. 43, pp. 67-78, Jan 2023.
- [73] ณัฐยา พูนสถาวรณ. (2546). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลและการวัดสมบัติโครงสร้างรูพรุน, (รายงานการวิจัย). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [74] Activated Carbon Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Powdered, Granular), By Application (Liquid Phase, Gas Phase) By End Use (Water Treatment, Air Purification), By Region, And Segment Forecasts, 2022 – 2030, สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2565 (ออนไลน์) ที่มา: <https://www.grandviewresearch.com>



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
กระบวนการปรับสภาพ





## 1. กระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment)

การเตรียมผงผักตบชวาสำหรับการสังเคราะห์ถ่านชีวภาพ มีขั้นตอนดังนี้

1.1 เลือกผักตบชวาที่มีลำต้นค่อนข้างสมบูรณ์ เพื่อนำใบไปทำให้เป็นผง

1.2 แยกใบออกจากลำต้น แล้วนำไปล้างในน้ำสะอาด



รูปที่ ก.1 ใบผักตบชวา

1.3 นำใบที่ทำการตัดแยกมาตากแดด 3 วัน



รูปที่ ก.2 ผักตบชวาลังตากแห้งครบสามวัน

1.4 หลังจากที่ได้ตากแห้งเป็นระยะเวลา 3 วัน เอาไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ ก.3 ตู้อบแห้งผักตบชวาก่อนการอบ

1.5 เอาส่วนที่อบมาบดเป็นผง แล้วร่อนละเอียดผ่านตะแกรง 200 เมช

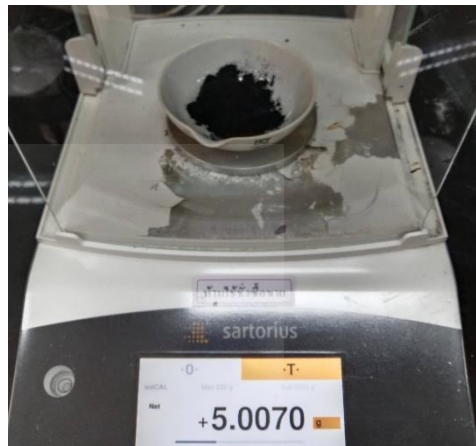
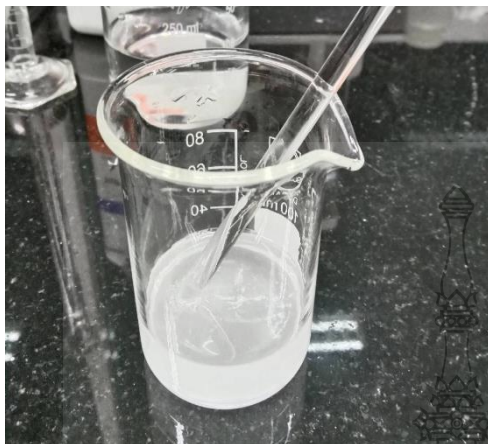


(ก) เครื่องบดผักตบชวา (ข) ผงผักตบชวาล้างร่อนผ่านตะแกรง 200 เมช

รูปที่ ก.4 กระบวนการเตรียมผงผักตบชวา (ก) เครื่องบดใบผักตบชวา (ข) ผงใบผักตบชวาล้างร่อนผ่าน ตะแกรง 200 เมช

## 2. กระบวนการกระตุ้นถ่านชีวภาพเป็นถ่านกัมมันต์

2.1 เตรียมถ่านชีวภาพ 5 กรัม ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วน 2:1



รูปที่ ก.5 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กับถ่านชีวภาพ

2.2 ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปอบ 80 องศาเซลเซียส 3 วัน



รูปที่ ก.6 ถ่านกัมมันต์หลังผสม KOH แล้วอบแห้ง 3 วัน



2.3 นำสารที่ได้จากการเตรียมเข้าไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ ก.7 เครื่องเตาเผาปฏิกิริยา



รูปที่ ก.8 ถ่านกัมมันต์ หลังกระบวนการกระตุ้น

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวชินัดดา พลกล้า
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ. 2538
ที่อยู่	2/1 หมู่ 1 ตำบล วังม่วง อำเภอ เปือยน้อย จังหวัด ขอนแก่น ไปรษณีย์ 10340
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ-พลาสติก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ในปีการศึกษา 2562
ประสบการณ์การทำงานวิจัย	มิถุนายน พ.ศ. 2563 - พฤษภาคม พ.ศ. 2565 : สถาบันเทคโนโลยี นิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย กรกฎาคม พ.ศ. 2565 -ปัจจุบัน : บริษัท ฟาร์มาแพค แพลน เทคโนโลยี จำกัด ในแผนก พัฒนาธุรกิจ ตำแหน่ง RD Engineer
เบอร์โทรศัพท์	097-1621952
อีเมล	1159104720431@mail.rmutt.ac.th , Tinutda.1995@gmail.com

