


การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนโดยการกระตุ้นด้วย  $\text{KMnO}_4$   
เพื่อใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยการดูดซับร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิก



ว่าที่ร้อยตรีหญิงอมรรัตน์ ชัยเชื่อนจันทร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF ACTIVATED CARBON FROM JUVENILE DURIAN  
FRUIT BY ACTIVATION WITH  $\text{KMnO}_4$  FOR METHYLENEBLUE  
ADSORPTION ; USING ULTRASONIC



Acting Sub Lt.AMONRAT CHAIKHUNKHAN

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL  
ENGINEERING SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปริญญานิพนธ์เรื่อง การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนโดยการกระตุ้นด้วย  $\text{KMnO}_4$  เพื่อใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยการดูดซับร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิก


โดย ว่าที่ร้อยตรีหญิงอมรรัตน์ ชัยเชื่อนพันธ์


ปีการศึกษา 2566

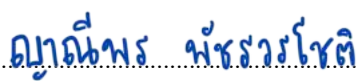
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์  
ผศ.ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม  
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

  
.....กรรมการ  
(ผศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทรมพร)

  
.....กรรมการ  
(รศ.ดร. ญาณิพร พัทธวรโชติ)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนโดยการกระตุ้นด้วย $KMnO_4$ เพื่อใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยการดูดซับร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิก
โดย	ว่าที่ร้อยตรีหญิงอมรรัตน์ ชัยเชื่อนพันธ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ ผศ.ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนเพื่อใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลูโดยการดูดซับร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิก โดยการนำลูกทุเรียนอ่อนที่ผ่านการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เข้าสู่กระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ถ่านชาร์ จากนั้นนำถ่านชาร์ไปกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ โดยแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในอัตราส่วน 10 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร แล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ ถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา ศึกษาการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM : D4607-94 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง FTIR และวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์โดยเครื่อง UV-vis Spectroscopy จากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา จะให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 548.8 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมตัวดูดซับ แสดงถึงถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงและรูพรุนเกิดมากที่สุด จึงเลือกถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.5 5 10 15 และ 20 ppm จากการทดลองพบว่าที่สภาวะความเข้มข้น 5 ppm เวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง และปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูอยู่ที่ 83.76 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช

**Report Title** Preparation of activated carbon from juvenile durian fruit by activation with  $\text{KMnO}_4$  for methylene blue adsorption ; using Ultrasonic

**By** Acting Sub Lt.Amonrat Chaikhunkhan

**Degree** Bachelor of Engineering

**Program** Chemical Engineering

**Year** 2023

**Advisor** Asst.Prof.Dr. Pornsawan Assawasaengrat  
Asst.Prof.Dr. Pongsert Sriprom

## ABSTRACT

This research studied the preparation of activated carbon from juvenile durian fruit for Methylene blue adsorption using Ultrasonic. The juvenile durians were dehumidified at 80 degrees Celsius for 12 hours and carbonized at 600 degrees Celsius for 2 hours to produce charcoal. The char was activated with 0.3 molar potassium permanganate by soaking the char in potassium permanganate at a ratio of 10 g: 100 mL and drying at 80 degrees Celsius for 2 hours and Carbonization at 500 degrees Celsius for 1 hour to produce three types of adsorbent are Char, Activated carbon after soaking potassium permanganate and Activated carbon after soaking potassium permanganate and Carbonization. ASTM : D4607-94 studied the iodine adsorption of activated carbon, surface functional groups of activated carbon were analyzed by FT-IR, and methylene blue adsorption was studied by UV-vis spectroscopy. After soaking potassium permanganate and Carbonization, it was found that activated carbon gives the highest iodine number,  $548.8 \text{ mg}_{\text{iodine}} / \text{mg}_{\text{adsorbent}}$ . It shows activated carbon has a high surface area and most pore volume. Therefore, choose activated carbon after soaking potassium permanganate and Carbonization to absorb methylene blue at the initial 2.5 5 10 15 and 20 ppm. It was found at the concentration condition of five ppm absorption time for 2 hours, and adsorbent quantity 2 g has an 83.76 percentage of adsorption in a study on Methylene blue adsorption isotherm with activated carbon after soaking potassium permanganate and Carbonization. It was found that adsorption isotherm, according to Freundlich, isotherm.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จจุลวงได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องด้วยจากการที่ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคลากรหลายท่าน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ และ ผศ.ดร. พงษ์เสริฐ ศรีพรหม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ทั้งในตำราความรู้ในการทำงาน การตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการทำงาน ทั้งยังอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์และของใช้ที่จำเป็นในการทำการศึกษา ผู้จัดทำขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วลัยรัตน์ จันทระอมพร และ รศ.ดร. ญาณิพร พิษวรโชติ กรรมการสอบหัวข้อปริญญาานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ และชี้แนะในปริญญาานิพนธ์ จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จจุลวงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ในทุกรายวิชาที่ใช้ในการศึกษา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยให้สำเร็จจุลวงลงได้

ขอขอบคุณ คุณ อธิพงษ์ ไพค่านาม ที่คอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนในด้านการศึกษารวมทั้งน้อง ๆ และพี่ ๆ ที่ทำปริญญาานิพนธ์พร้อมกัน ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ ซึ่งทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จจุลวงไปได้ด้วยดี โดยหากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีประโยชน์และคุณค่าทางการศึกษา ผู้วิจัยขอมอบแก่บิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้ที่มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การศึกษาอบรมสั่งสอนแก่ผู้วิจัย แต่หากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับความผิดพลาดไว้แต่เพียงผู้เดียว

ว่าที่ร้อยตรีหญิงอมรรัตน์ ชัยเชื่อนขันธุ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	V
ABSTRACT.....	VI
กิตติกรรมประกาศ.....	VII
สารบัญ.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
สารบัญตาราง.....	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>12</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขต.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>15</b>
2.1 ทูเรียน.....	15
2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	16
2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	18
2.4 การดูดซับ (Adsorption).....	21
2.5 กลไกการดูดซับ.....	22
2.6 สมดุลการดูดซับ.....	24
2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm).....	25
2.8 แบบจำลองการดูดซับ.....	27
2.9 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate).....	30
2.10 เมทิลีนบลู (Methylene blue).....	31
2.11 อัลตราโซนิก (Ultrasonic).....	32
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b> ขั้นตอนการทดลอง.....	<b>38</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	38
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
<b>บทที่ 4</b> ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	<b>43</b>
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติขององค์ประกอบตัวอย่าง ((Proximate analysis).....	43
4.2 การวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine Number).....	44
4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	45
4.4 ชนิดของตัวดูดซับ.....	46
4.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นเมทิลีนบลู.....	47
4.6 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ.....	48
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	<b>51</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ข.....	60

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ลูกทุเรียนอ่อนระยะ 4-5 สัปดาห์ หลังจากดอกบาน.....	16
รูปที่ 2.2 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์.....	20
รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์.....	24
รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ ที่สภาวะสมดุลตามระบบ IUPAC.....	25
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate).....	30
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู (Methylene blue).....	31
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของเครื่องอัลตราโซนิก.....	33
รูปที่ 4.1 กราฟแสดง FTIR Spectra ของถ่านกัมมันต์.....	45
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ 3 ชนิด.....	46
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นต่าง ๆ ของเมทิลีนบลูที่ใช้ถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียม เปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผาเป็นตัวดูดซับ.....	47
รูปที่ 4.4 กราฟไอโซเทอมการดูดซับ.....	48
รูปที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	49
รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช.....	49
รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลู.....	60

X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	18
ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์.....	18
ตารางที่ 2.3 สมบัติของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	22
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของตัวอย่าง.....	43
ตารางที่ 4.2 เลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	44
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับ.....	50
ตารางที่ ก.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลู.....	56
ตารางที่ ก.2.1 ถ่านชาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm.....	58
ตารางที่ ก.2.2 ถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm.....	58
ตารางที่ ก.2.3 ถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm.....	59
ตารางที่ ก.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของตัวอย่าง.....	59

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยถือว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งในเขตพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศก็มีการทำการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ซึ่งในภาพรวมพื้นที่ทำการเกษตรของประเทศมีการผลิต การเพาะปลูก และการส่งออกเป็นอย่างมาก "ทุเรียน" ถือเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญต่อภาคการเกษตรของไทย โดยสร้างรายได้มากเป็นอันดับที่ 2 ในสินค้ากลุ่มไม้ผลรองจากมะม่วง จากข้อมูลคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) [1] พบว่าในปี 2560 มูลค่าผลผลิตของทุเรียนอยู่ที่ 3,963.1 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 23.7 ของมูลค่าผลผลิตกลุ่มไม้ผล สูงเป็นอันดับที่ 2 รองจากมะม่วง ซึ่งการที่จะทำให้ทุเรียนมีผลผลิตที่สูงขึ้น ต้องมีการตัดแต่งช่อดอกเพื่อให้ได้ผลผลิตที่สูงและมีคุณภาพ ดังนั้นของเสียที่เหลือจากวัสดุทางการเกษตรที่มีมากของเกษตรกรนั้นก็คือ “ ลูกทุเรียนอ่อน ” ซึ่งเกษตรกรได้นำลูกทุเรียนอ่อนให้สลายไปเองโดยธรรมชาติ แต่เนื่องด้วยทุเรียนอ่อนสามารถทำให้เกิดมูลค่าเพิ่มได้ จึงมีแนวคิดที่จะนำทุเรียนอ่อนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ ที่ในปัจจุบันเป็นที่นิยมกันอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีต้นทุนที่ต่ำและสามารถหาได้ง่าย และนิยมนำวัสดุทางการเกษตรหรือวัสดุชีวมวลมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ อาทิเช่น แกลบ กะลามะพร้าว เปลือกมังคุด ทะลายปาล์มและกาบข้าวโพด ในกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ จะมี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการคาร์บอนเซชัน และกระบวนการกระตุ้น โดยกระบวนการกระตุ้นมี 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้นั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสารที่เป็นพิษอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญคือ อุตสาหกรรมสิ่งทอถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีมานานหลายศตวรรษ เพราะมนุษย์มีความจำเป็นในการสวมใส่เครื่องนุ่งห่ม ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัย 5 ในการดำรงชีวิต เนื่องจากการขยายตัวของตลาดอุตสาหกรรมสิ่งทอ ทำให้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่พบมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 50 มีการหลุดออกมาเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ส่วนใหญ่เกิดจากการย้อมสีซึ่งจะเกิดขึ้นเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อมสี ตั้งแต่การเตรียมผ้า การเตรียมสี และการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในการทำความสะอาดในทุก ๆ ขั้นตอน น้ำเสียที่ได้จากการฟอกย้อมสีจะมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารเคมีชนิดต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ปัจจุบัน

มีจำนวนของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั่วโลกมากกว่า 10,000 สี ซึ่งสีเหล่านี้จะมีการตกค้างและปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมากในน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิต

เมทิลินบลู เป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่มีประจุบวกที่ใช้กันทั่วไปและที่ส่วนประกอบสำคัญของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ [2] การได้รับเมทิลินบลูอาจเกิดการบาดเจ็บและเสียหายของดวงตาและผิวหนัง คลื่นไส้ อาเจียน ความผิดปกติของระบบการย่อยอาหาร อัตราการเต้นของหัวใจ และเนื้อร้ายที่อาจเกิดจากการกลืนเมทิลินบลูโดยตรง ดังนั้นการบำบัดและการกำจัดเมทิลินบลูออกจากน้ำเสียจึงถือว่ามีความสำคัญเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อมที่ปลอดภัยและสุขภาพที่ดี [6] โดยการบำบัดเมทิลินบลูมีหลายวิธี โดยเมทิลินบลูเป็นโครงสร้างใหญ่ต้องมีการอัลตราโซนิกมาช่วยในการสลายโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ EgbosubaTC และคณะ ที่ทำการศึกษาการดูดซับเมทิลินบลูด้วยการอัลตราโซนิกร่วม ทำให้เกิดการกระตุ้นพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

จากการศึกษาปัญหาข้างต้นที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อใช้ในการดูดซับเมทิลินบลูโดยการดูดซับร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิก

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนด้วยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลินบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากลูกทุเรียนอ่อน

## 1.3 ขอบเขต

1.3.1 เตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนด้วยการคาร์บอนไนเซชันที่ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ด้วยอัตราส่วน 10 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

1.3.2 ศึกษาผลการดูดซับเมทิลินบลูโดยการดูดซับร่วมกับกระบวนการอัลตราโซนิก

1.3.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

1.3.4 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเมทิลินบลูของถ่านกัมมันต์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้แนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์

1.4.2 เป็นแนวทางการส่งเสริมให้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ในการ  
ดูดซับ เช่น การบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากสีย้อม



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทูเรียน

ทูเรียน ได้รับฉายาว่าเป็น “ ราชาแห่งผลไม้ ” (King of fruits) เป็นไม้ผลยืนต้นขนาดใหญ่ สามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีในเขตที่มีสภาพอากาศร้อนชื้น ซึ่งจากข้อมูลของ กลุ่มพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานกอนนโยบายการสร้างเสริมความเข้มแข็งทางการค้า สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า [3] พบว่าทูเรียนถือเป็นผลไม้สำคัญของประเทศไทยที่นอกจากการบริโภคในประเทศแล้วยังสามารถส่งออกทำรายได้ให้กับประเทศในแต่ละปีจำนวนมาก โดยในปี 2562 การส่งออกทูเรียนและผลิตภัณฑ์ (ทูเรียนสด, ทูเรียนแช่แข็ง, ทูเรียนอบแห้ง และทูเรียนกวน) มีปริมาณ 680,872.5 ตัน และมีมูลค่ารวม 51,035.7 ล้านบาท และในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา ทูเรียนมีมูลค่าส่งออกเฉลี่ย 94,988 ล้านบาท (อัตราการเติบโตร้อยละ 29.55) โดยในครึ่งปีแรกของปี 2566 ไทยส่งออกทูเรียนได้ 102,184 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อนหน้าประมาณร้อยละ 30.77 เนื่องจากตลาดจีนมีความต้องการทูเรียนไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับสถานการณ์โควิด-19 คลี่คลาย ทำให้การส่งออกไม่มีปัญหาด้านโลจิสติกส์ ทำให้การส่งออกทูเรียนไทยเพิ่มขึ้น

จึงเป็นปัจจัยที่ทำให้เกษตรกรขยายพื้นที่เพาะปลูกจากเดิม 755,000 ไร่ เพิ่มขึ้นเป็น 1,341,000 ไร่ ซึ่งในการเพาะปลูกทูเรียนเพื่อให้ได้ผลผลิตที่สูงนั้น ขึ้นอยู่กับการดูแลทูเรียนในระยะติดผลจนถึงเก็บการดูแลทูเรียนในระยะ 10 วันหลังจากดอกบานจนถึงระยะไขไก่ (หรือระยะ 4-5 สัปดาห์หลังจากดอกบาน) ซึ่งในระยะนี้เป็นระยะสำคัญที่ทูเรียนกำลังเข้าสู่การพัฒนาเปลือกและเมล็ด จึงต้องมีการตัดแต่งช่อดอก ผลทูเรียนที่ไม่สมบูรณ์และผลที่อยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมออกคงเหลือไว้แค่ 2-3 เท่าของจำนวนผลที่ต้องการ เพื่อควบคุมคุณภาพและปริมาณของเนื้อทูเรียน ที่มีรูปทรงเบี้ยว ก้นจิบ หรือขนาดเล็กเกินไป และทำให้การดูแลรักษาและการเก็บเกี่ยวได้ผลผลิตที่สูงและทำได้ง่าย

ดังนั้นจึงมีความสนใจในการนำ “ ลูกทูเรียนอ่อน ” จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่พบมากในเขตพื้นที่มาผลิตถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีเมทิลีนบลู (MB) โดยการใช้อัตราโซนิกมาช่วยในการดูดซับ



รูปที่ 2.1 ลูกทุเรียนอ่อนระยะ 4-5 สัปดาห์ หลังจากดอกบาน

ที่มา : <https://www.youtube.com/watch?v=kOMeh-pQX7U>

## 2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Active carbon) เป็นวัสดุที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูงมาก จึงเป็นตัวดูดซับที่ดีทั้งในกระบวนการดูดซับแก๊สและของเหลว ส่วนประกอบหลัก คือ คาร์บอน จึงจัดเป็นประเภทหนึ่งของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ผลิตได้จากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาก่อกัมมันต์หรือกระตุ้น (Activation) เพื่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวภายในผิวจำเพาะภายในสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์มีมากกว่าแกรไฟต์ โดยโครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกของแกรไฟต์ โดยจะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยถ่านกัมมันต์นั้นจะมีคาร์บอนประกอบหลักร้อยละ 87 – 90 เปอร์เซ็นต์ และมีธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (Hydrogen) ออกซิเจน (Oxygen) ซัลเฟอร์ (Sulfur) และไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นองค์ประกอบด้วย ปริมาณที่พบจะมีมากหรือน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ นอกจากนี้แล้ว ธาตุเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มาจากสัตว์หรือวัสดุทางการเกษตร เช่น ถ่านหิน ถ่านพีท ถ่านลิกไนต์ ไม้ พืชทะเลสาบพร้าว แกลบ ชานอ้อย กาบข้าวโพด ดอกทานตะวัน เปลือกมังคุด [16] ทลายปาล์มเปล่า และ ชี้อ้อย เป็นต้น

ในปัจจุบันสามารถผลิตถ่านออกมาได้หลายรูปแบบ ซึ่งสามารถจัดแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ออกตามลักษณะทางกายภาพ ได้ 3 ชนิดหลัก ๆ ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered activated carbon ; PAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกบดจนมีขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร) มีขนาดรูพรุน 5 – 150 อังสตรอม ส่วนใหญ่แบบผงใช้กับของเหลว เมื่อมีการดูดซับแล้วจะแยกถ่านกัมมันต์ออกโดยวิธีการตกตะกอนและการกรองแยก ผงถ่านที่เปียกหรืออิมพัลส์แล้วไม่สามารถนำมาฟื้นฟูสภาพได้ แต่กำจัดได้โดยการเผาหรือการฝังกลบ

2. ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular activated carbon ; GAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นจากการบดหรือการร่อนคัดขนาด มีขนาดตั้งแต่ 0.2 – 0.5 มิลลิเมตร ข้อได้เปรียบของแบบเกล็ดมีมากกว่าแบบผง เรื่องความแข็งแรงและการใช้งานได้ในระยะยาวกว่าแบบผง สามารถบำบัดหรือกรองแก๊สหรือของเหลวในปริมาณมาก ๆ ด้วยประสิทธิภาพที่แน่นอน และสามารถนำกลับมาฟื้นฟูสภาพ เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลาย ๆ ครั้ง

3. ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded activated carbon ; EAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 – 5 มิลลิเมตร ได้จากการอัดรีด แบบอัดแท่งเหมาะกับการใช้งานหนัก ส่วนใหญ่ใช้ในแก๊สเฟส การฟอกอากาศ กรองคลอรีน รส และกลิ่น

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีรูพรุนขนาดตั้งแต่ 20 – 20,000 อังสตรอม โดยปกติวัสดุรูพรุนสามารถจำแนกขนาดของรูพรุนตามข้อกำหนดของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) คือ รูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
2. รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) คือ รูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร
3. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) คือ รูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร

เนื่องจากวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันของขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จึงมีความแตกต่างกัน จากคุณสมบัติของรูพรุนที่อยู่ภายใน โดยสมบัติของตัวดูดซับจะต้องมีพื้นที่ผิว (Pore surface area) จำเพาะมาก ปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) ขนาดเล็กที่มาก และการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) จะต้องมีความสัมพันธ์เชื่อมกันระหว่างรูพรุนเป็นโครงสร้างตาข่าย เพื่อที่จะให้โมเลกุลของตัวดูดซับสามารถเคลื่อนที่ได้ และความสามารถในการดูดซับที่สูง ทำให้ถ่านกัมมันต์นิยมนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในงานด้านสิ่งแวดล้อม ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีสมบัติที่ดี เหมาะกับการใช้งาน ราคาไม่แพง ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของถ่านกัมมันต์ [14]

พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area)	500 - 2,500 m <sup>2</sup> /g
ปริมาตรรูพรุนรวม (Total pore volume)	0.5 - 2.5 cm <sup>3</sup> /g
ความแข็งแรงของอนุภาค (Hardness number)	50 - 100
ปริมาณเถ้า (Ash content)	1 - 20 wt%
ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number)	500 - 1,200
ค่าการดูดซับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl <sub>4</sub> activity)	35 - 125
ค่าการดูดซับบิวเทน (Butane working capacity)	4 - 14
ค่าการเก็บความร้อนที่ 100 °C (Heat capacity at 100 °C)	0.84 - 1.3 J/g-K
ค่าการนำความร้อน (Thermal conduction)	0.05 - 0.10 W/m-K

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์ [15]

Raw material	Carbon	Volatiles	Ash	Density	Texture of Activated carbon
	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(g/cm <sup>3</sup> )	
Soft wood	40 - 45	55 - 60	0.3 - 1.1	0.4 - 0.5	Soft, large pore volume
Hard wood	40 - 42	55 - 60	0.3 - 1.2	0.55 - 0.80	Soft, large pore volume
Lignin	35 - 40	58 - 60	-	0.3 - 0.4	Soft, large pore volume
Nutshells	40 - 45	55 - 60	-	1.4	Hard, large micropore volume
Lignite	55 - 70	25 - 40	5 - 6	1.0 - 1.35	Hard, small pore volume
Soft coal	65 - 80	20 - 30	2 - 12	1.25 - 1.5	Medium hard, medium pore volume
Petroleum coke	70 - 85	15 - 20	0.5 - 0.7	1.35	Medium hard, medium pore volume
Semi-hard coal	70 - 75	10 - 15	5 - 15	1.45	Hard, large pore volume
Hard coal	85 - 95	5 - 10	2 - 15	1.5 - 1.8	Hard, large pore volume

### 2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน ได้แก่ คาร์บอนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น (Activation) รายละเอียดแสดงในรูปที่ 2.2 การเลือกวัตถุดิบต้องพิจารณาจากสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ สมบัติของวัตถุดิบ แสดงดังตารางที่ 2.2

### 2.3.1 กระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization)

กระบวนการคาร์บอนเซชันเป็นกระบวนการแบบไพโรไลซิส ทำโดยการเผาวัตถุดิบในที่ อับอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท ได้แก่ ถ่านที่มี ลักษณะสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ส่วนที่เป็นในส่วนของเหลว เรียกว่า ทาร์ (Tar) และแก๊ส คาร์บอนเซชันเป็นขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในตัววัตถุดิบโดยกระบวนการทางความร้อน ทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน (Hydrogen) ออกซิเจน (Oxygen) และไนโตรเจน (Nitrogen) ให้ออกมาในรูปของเหลวและแก๊ส ส่งผลให้ถ่านชาร์มีปริมาณ คาร์บอนสูงขึ้นกว่าวัตถุดิบ แต่ยังมีสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะยังมีทาร์ตกค้างอยู่ในรูพรุน หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นต่อไป

### 2.3.2 กระบวนการกระตุ้น (Activation)

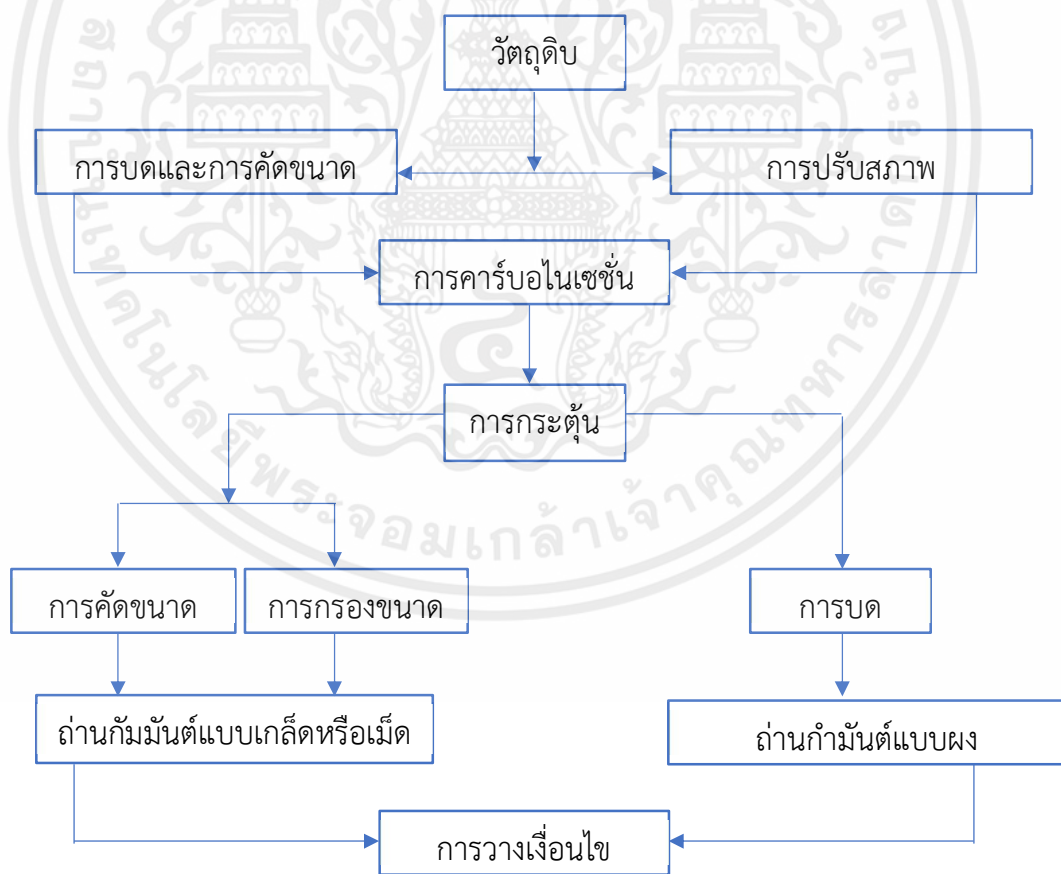
กระบวนการกระตุ้นเป็นการเปลี่ยนถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งขั้นตอนการกระตุ้นเป็น การทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีความพรุนมากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับได้มากขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้พื้นที่ผิวมีความว่องไวมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปฏิกิริยา เคมีในขั้นตอนการกระตุ้น ช่วยให้คาร์บอนจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับ สูงขึ้น โดยวิธีการกระตุ้นแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี

#### 2.3.2.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

การกระตุ้นทางกายภาพเป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยทำให้ผิวคาร์บอนเกิดการ เปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การเกิดรูพรุนขนาดต่าง ๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น โดยทั่วไปสารที่ใช้ใน การกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ไอน้ำ อากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความ ร้อน ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้ คือ ไม่มีสารตกค้างหลังจากกระตุ้น สามารถนำถ่านไปใช้งานได้ทันที แต่ข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมีที่อุณหภูมิ 700 – 1,200 องศาเซลเซียส

### 2.3.2.2 การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

การกระตุ้นทางเคมีนิยมใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ที่มีวัตถุดิบเป็นสารประกอบคาร์บอนที่มาจากพืชและชีวมวล เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนด้วยสารเคมี โดยทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิในช่วง 400 – 800 องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบและสารที่นำมาใช้ในการกระตุ้น สารเคมีที่ใช้กันมากได้แก่ กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid ;  $H_3PO_4$ ) ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride ;  $ZnCl_2$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide ;  $KOH$ ) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate ;  $K_2CO_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide ;  $NaOH$ ) เป็นต้น ข้อดีของวิธีการกระตุ้นทางเคมี คือ ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ต้นทุนต่ำ ประหยัดพลังงาน นอกจากนั้นการกระตุ้นด้วยวิธีนี้จะทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง แต่ข้อเสีย คือ อาจมีสารตกค้างในถ่านกัมมันต์และต้องนำไปล้างสารตกค้างออกจนกว่าจะมีคุณสมบัติเป็นกลางจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 2.2 แผนผังสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป

## 2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส เมื่อมีสารสองชนิดมาสัมผัสกันและมีความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นระหว่างสารสองสถานะ (Phase) เช่น ของแข็งกับของแข็ง ของแข็งกับของเหลว ของแข็งกับแก๊ส และของเหลวกับแก๊ส เป็นต้น สารที่สามารถดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลของสารอื่น เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) และอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ปริมาณการดูดซับนั้นจะเกิดขึ้นกับหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ เช่น ธรรมชาติของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ พื้นที่ผิวของสารดูดซับ พลังงานกระตุ้นของสารดูดซับ สมบัติของสารตัวดูดซับ สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น การดูดซับอาจจะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) หรือทางเคมี (Chemisorption) ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่ก่อให้เกิดการดูดซับ ส่วนกระบวนการที่ทำให้สารถูกดูดซับหลุดออกจากผิวของสารดูดซับ เรียกว่า การคายการดูดซับ (Desorption)

### 2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอ่อน ๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (Activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยกว่าการกำจัดตัวสารถูกดูดซับออกจากผิวตัวสารดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดซ้อนกันได้หลายชั้น (Multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ที่อุณหภูมิต่ำ การดูดซับแบบนี้ เป็นกระบวนการแบบผันกลับได้

### 2.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวสารถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยพันธะเคมีที่แข็งแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ

มีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงกว่าการกำจัดตัวสารดูดซับออกจากผิวตัวสารดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) การดูดซับแบบนี้ เป็นกระบวนการแบบไม่ผันกลับได้ คือที่อุณหภูมิต่ำ ๆ จะไม่เกิดการคายการดูดซับ (Desorption) แต่จะทำให้เกิดการคายการดูดซับได้ต้องใช้อุณหภูมิสูง ๆ และลดความดันลงมาก ๆ

ตารางที่ 2.3 สมบัติของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ น้อยกว่าหรือประมาณ 20 KJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับ 50 – 400 KJ/mol
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอ่อน ๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดแข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)
ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ	มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
เกิดการดูดซับหลายชั้น	เกิดการดูดซับชั้นเดียว
เกิดการผันกลับได้	ไม่เกิดการผันกลับ
เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ	เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้ การแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้วยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อสารดูดซับและสารถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับสารดูดซับที่มีประจุตรงข้ามกัน และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (Specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลสารถูกดูดซับกับสารดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

## 2.5 กลไกการดูดซับ

กระบวนการดูดซับโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้นตอนของการดูดซับ (Adsorption) และขั้นตอนการคืนสภาพของตัวดูดซับหรือเรียกว่า การคายการดูดซับ (Desorption) ในขั้นตอนการดูดซับนี้ สารละลายจะถูกส่งผ่านไปยังสารดูดซับอย่างต่อเนื่องกระทั่งเข้าสู่สมดุลการดูดซับ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้งานของสารดูดซับจึงมีการคืนสภาพให้กับสารดูดซับ ซึ่งทำได้ด้วยการเพิ่ม

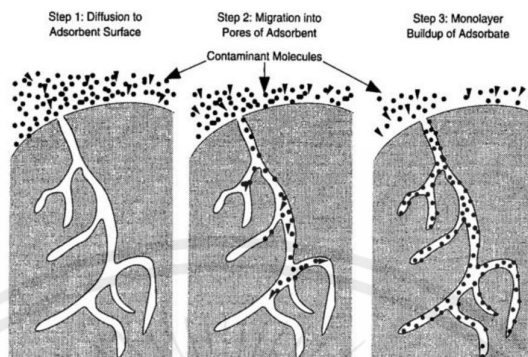
อุณหภูมิ หรือลดความดันของระบบ ภาพกลไกการดูดซับแสดงดังรูปที่ 2.3 ขั้นตอนการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** เป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าหาสารดูดซับ เป็นการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับให้เข้ามาติดกับผิวภายนอกของสารดูดซับ โดยที่สารมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จะเคลื่อนที่ตามธรรมชาติเข้าหาสารดูดซับหรือเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian and Fusion) ซึ่งการแพร่กระจายจะทำให้สารที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่าและมีโอกาสวิ่งเข้าหาถ่านกัมมันต์ได้มากกว่า แต่สำหรับสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน สารจะเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ตามทิศทางการไหลของของไหล การแพร่กระจายในระดับโมเลกุลจะเกิดขึ้นน้อยมาก โดยที่ขนาดและน้ำหนักของสารถูกดูดซับจะเข้ามามีบทบาทสำคัญ ในการสร้างกลไกแบบตตะกอนและติดค้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดการตตะกอนในทิศทางที่กำลังเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้นขนาดและการกระจายขนาด (Size Distribution) จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการเคลื่อนย้ายของสารดูดซับ

**ขั้นตอนที่ 2** ขั้นตอน Pre-Diffusion เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนภายในของถ่านกัมมันต์ โดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์จะมีฟิล์มของของไหลห่อหุ้มอยู่คล้ายเยื่อบางๆ โดยรอบ เมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้ามายังถ่านกัมมันต์โมเลกุลของสารต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้ จึงจะสามารถเข้าไปในผิวของถ่านกัมมันต์ได้จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ภายในโพรงที่เรียกว่า “ รูพรุน ” โดยภายในรูพรุนจะมีช่องเป็นโพรงคดเคี้ยวไปมา

**ขั้นตอนที่ 3** ขั้นตอนการเกาะติดโดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะต้องเกาะติดบนผิวภายในของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไปเป็นขั้นตอนที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการถือว่า เกิดการดูดซับที่ผิวภายในรูพรุนอย่างสมบูรณ์

## Adsorption Mechanism



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซับสารบนถ่านกัมมันต์

ที่มา : <https://www.slideserve.com/luisa/heterogeneous-catalysis>

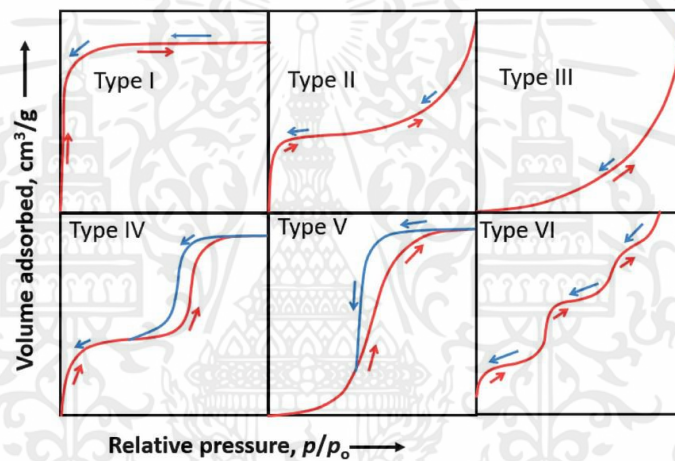
### 2.6 สมดุลการดูดซับ

สมดุลการดูดซับ จะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ โดยสารที่ถูกดูดซับมีการดูดซับและมีการคายการดูดซับ (Desorption) ไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้น เมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ โดยมีการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า “ ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ” ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของสารที่ถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุล และจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวของสารที่ถูกดูดซับอ่อนลง เนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้ โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่จะเกิดการดูดซับชั้นแรกเต็มทุกตำแหน่ง และในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการการดูดซับและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวสารดูดซับ

สมการที่นำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของกระบวนการดูดซับมีหลายกระบวนการ โดยเฉพาะในระบบของเหลวกับของแข็ง ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm)

## 2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นข้อมูลเชิงฟิสิกส์พื้นฐานที่สภาวะสมดุล การดูดซับที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับ ซึ่งกราฟไอโซเทอมจะแสดงความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งชนิดของไอโซเทอมการดูดซับ สามารถจำแนกตามระบบ IUPAC ได้ 6 แบบ ดังนี้



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ ที่สภาวะสมดุลตามระบบ IUPAC

ที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/Different-types-of-adsorption-isotherms-as-classified-by-IUPAC-25\\_fig6\\_331250869](https://www.researchgate.net/figure/Different-types-of-adsorption-isotherms-as-classified-by-IUPAC-25_fig6_331250869)

**แบบที่ 1 (Type I)** เป็นการดูดซับของโมเลกุลของตัวดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว (Monolayer adsorption) บางครั้งอาจเรียกว่า ไอโซเทอมที่มีรูปแบบแลงเมียร์ หรือ แบบแอล (Langmuir or L – Shaped) เป็นลักษณะการดูดซับของวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous) หรือมีความเป็นรูพรุนต่ำหรือพบในตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวภายนอก (External Surface Area) ต่ำ แต่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) เป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์ โดยตัวถูกดูดซับแก๊สจะถูกดูดซับจนเต็มรูพรุนและเข้าสู่สมดุลในช่วงความดันต่ำ ๆ อย่างรวดเร็ว

**แบบที่ 2 (Type II)** เป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer adsorption) บางครั้งอาจเรียกว่า ไอโซเทอมที่มีรูปแบบซิกมอยด์ หรือ แบบเอส (Sigmoid or S – Shaped) เกิด

กับการดูดซับของวัสดุไม่มีความพรุน (Nonporous) หรือมีการกระจายขนาดของรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) และขนาดใหญ่ (Macroporous) ลักษณะของไอโซเทอมมีจุดเปลี่ยนกราฟโค้ง จุด B (Break Through) ซึ่งเป็นสภาวะที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นจนเสร็จสมบูรณ์ ที่ช่วงความดันสูงกว่านี้ จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ จนถึงสภาวะที่ตัวถูกดูดซับเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่ง ( $P/P^0 \approx 1$ )

**แบบที่ 3 (Type III)** เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีลักษณะคล้ายกระจกเว้าแบบโค้งหงายหรือกราฟจะโค้งออก (Convex) เกิดกับการดูดซับของวัสดุที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous) หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) เป็นลักษณะการดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ คือ รูปแบบการดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก ทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่การดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบนี้ คือ การดูดซับของน้ำบนผิวถ่านหินที่ไม่มีรูพรุน

**แบบที่ 4 (Type IV)** เป็นลักษณะไอโซเทอมที่พบในวัสดุที่มีช่วงรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) 2 – 50 นาโนเมตร เป็นส่วนใหญ่ เส้นไอโซเทอมในช่วงเพิ่มความดัน (Adsorption branch) จะคล้ายกับแบบที่ 2 แต่ไอโซเทอมในช่วงลดความดันเพื่อคายการดูดซับ (Desorption branch) จากค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่งลงมาจะไม่ซ้อนทับกับเส้นไอโซเทอมในช่วงขาขึ้น ทำให้เกิดบริเวณหรือพื้นที่ที่เกิดวงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ซึ่งเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary condensation in pores) โดยที่ค่าความดันสัมพัทธ์ใกล้หนึ่ง (ความดันย่อยของตัวดูดซับในวัฏภาคแก๊สมีค่าใกล้กับค่าความดันไออิ่มตัว) ตัวถูกดูดซับจะอยู่ในสภาวะคล้ายของเหลวที่บรรจุอยู่ในหลอดหรือช่องของรูพรุน ซึ่งจะมีแรงดึงดูดตรงบริเวณที่สัมผัสกับผนังของรูพรุนเข้ามาเกี่ยวข้องการจะไล่ตัวถูกดูดซับออกจากรูพรุนจึงต้องลดความดันให้น้อยกว่าค่าความดันในช่วงขาขึ้น เพื่อเอาชนะแรงดึงดูดดังกล่าว เป็นสาเหตุให้เส้นไอโซเทอมของขาขึ้นและขาลงไม่ซ้อนทับกันเกิดเป็น loop ขึ้น พื้นที่ของวงฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) จะแปรตามสัดส่วนของปริมาตรรูพรุนขนาดกลางเมื่อเทียบกับปริมาตรทั้งหมดของตัวดูดซับ ตัวอย่างเช่น การดูดซับเบนซีน (Benzene) บนเจลของไอออนออกไซด์ (Iron (III) Oxide Gel) ที่อุณหภูมิต่ำ 47 องศาเซลเซียส

**แบบที่ 5 (Type V)** เป็นไอโซเทอมลักษณะพิเศษ จะพบในการดูดซับระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวของของแข็ง พบได้ทั้งในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) และขนาดเล็ก (Microporous) ลักษณะของไอโซเทอมจะคล้ายกับแบบที่ 3 แต่จะมีจุดเปลี่ยนกราฟที่ค่าความสัมพันธ์มากกว่า 0.5 หรืออาจมากกว่านั้น แต่แบบที่ 5 จะสามารถเกิดการควบแน่นของแก๊สภายในรูพรุนได้ ตัวดูดซับมีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกันและยังแสดงลักษณะของวงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis loop) เหมือนไอโซเทอมแบบที่ 4 เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การดูดซับไอน้ำบนถ่านหินที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ส่วนไอโซเทอมแบบที่ 3 และไอโซเทอมแบบที่ 5 นี้ เกิดกับระบบดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีค่าอ่อน จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยาก เนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ตัวอย่างได้แก่ การดูดซับไอน้ำ ซึ่งจัดเป็นสารที่มีขั้ว (Polar) โดยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar) เป็นต้น

**แบบที่ 6 (Type VI)** เป็นเส้นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (Stepped Isotherm) เกิดกับตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous) แบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) และมีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการดูดซับเป็นช่วง ๆ ตามความดันที่เพิ่มขึ้น โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ในชั้นนั้น ๆ ซึ่งจะแตกต่างจากไอโซเทอมแบบที่ 2 ที่มีการดูดซับเป็นชั้น ๆ อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่าง ได้แก่ การดูดซับของแก๊สคริปทอนบน Carbon black หรือผลึก Cadmium bromide เป็นต้น ซึ่งไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างคล้ายกัน (Uniform) โดยรูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ

## 2.8 แบบจำลองการดูดซับ

### 2.8.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวราบ (Monolayer adsorption) บนสมมติฐานที่ว่า

1. โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับในปริมาณที่แน่นอนและตำแหน่งที่แน่นอน
2. ตัวดูดซับแต่ละโมเลกุลจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น และไม่มีแรงกระทำระหว่างกันสำหรับโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน
3. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

4. ค่าความร้อนของการดูดซับจะเท่ากันและคงที่ตลอดพื้นที่การดูดซับ
5. ไม่มีแรงกระทำระหว่างกันสำหรับโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน
6. พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้ และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล หรือ ค่าการดูดซับที่สมดุล
- $q_m$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว
- $b$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)
- $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

จากสมการที่ 2.1 สามารถจัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  จะสามารถหาค่า  $q_m$  ได้จากความชันของกราฟ (Slope) และหาค่า  $b$  จากจุดตัดแกน (Intercept)

## 2.8.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Heterogeneous) หรือมีพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ โดยพื้นที่ผิวและพลังงานจะมีการกระจายตัวเป็นเลขชี้กำลัง ใช้กับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิชจะเป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.3)$$

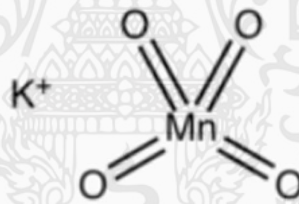
$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2.4)$$

เมื่อ	$C_e$	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
	$q_e$	คือ	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่สภาวะสมดุล
	$K_F$	คือ	ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)
	$n$	คือ	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  จากสมการการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช ความสามารถในการดูดซับจะพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  โดย ถ้าเส้นกราฟที่ได้ มีความชันมาก แสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ สำหรับค่า  $1/n$  จะใช้อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับจะเป็นแบบเส้นตรง แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 1 จะอธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับว่ามีปริมาณมากในการใช้ดูดซับ และถ้ามีค่าน้อยกว่า 1 จะอธิบายถึงปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับว่ามีปริมาณจำกัดในการดูดซับ

## 2.9 โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate)

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต หรือ ต่างทับทิม มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{KMnO}_4$  เป็นสารเคมีประเภทอนินทรีย์ (Inorganic) ที่มีลักษณะเป็นผลึกหรือเกล็ดสีม่วง สามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีม่วงหรือสีชมพูอมม่วงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้น โดยทางเคมีจะถือว่าต่างทับทิมเป็นเกลือชนิดหนึ่ง ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างอ่อน ๆ และมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิเดชัน (Oxidation) อย่างแรง ในปัจจุบันมีการนำต่างทับทิมมาใช้ประโยชน์ในครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การใช้เป็นสารออกซิเดชันในอุตสาหกรรมการฟอกย้อมสิ่งทอ อุตสาหกรรมย้อมสีไม้และผ้า หรือใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรคในผักและผลไม้ เป็นต้น ยังสามารถใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในทางการแพทย์ได้กับสภาพผิวได้หลายอย่าง ซึ่งรวมถึงการติดเชื้อราของเท้า ฟุพอง โรคตุ่มน้ำพอง และโรคผิวหนัง เป็นต้น นอกจากนี้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นสารเคมีในการฟื้นฟูเพื่อกำจัดเหล็กและไฮโดรเจนซัลไฟด์ (กลิ่นไข่เน่า) จากน้ำดีผ่านตัวกรองและยังใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย

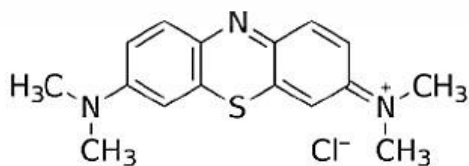


รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate)

ที่มา : [https://hmong.in.th/wiki/Potassium\\_permanganate](https://hmong.in.th/wiki/Potassium_permanganate)

## 2.10 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิค (Basic Dyes) ที่ละลายน้ำได้ มีสูตรทางเคมี คือ  $C_{16}H_{18}ClN_3S$  มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในสภาวะที่ให้สี ส่วนใหญ่นำไปใช้ประโยชน์โดยเป็นสีในกระดาษสีย้อมผม ผ้าย ขนสัตว์ย้อมสี เป็นต้น เมื่อสีมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดมลภาวะในแหล่งน้ำ ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดสีในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงแหล่งน้ำธรรมชาติ ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลู ด้วยวัสดุหลากหลายชนิด เช่น ไคโตซาน ผักตบชวา เป็นต้น การดูดซับเมทิลีนบลูเป็นค่าที่สามารถบ่งบอกถึงค่าการดูดซับของรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) คือ มีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร เป็นค่าที่สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด และโครงสร้างของโมเลกุลเมทิลีนบลู แสดงได้ดังภาพที่ 2.6 ในปัจจุบันมีการนำเมทิลีนบลูมาใช้ประโยชน์เป็นตัวบ่งชี้ปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยเมทิลีนบลูเป็นส่วนประกอบหนึ่งในสารละลายในการทดลองขวดสีน้ำเงิน ร่วมกับกลูโคสและโซดาไฟ นอกจากนี้ยังใช้ป้องกันเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราในปลาเลี้ยง โดยเฉพาะโรคจุดขาวที่เกิดจากโปรโตซัวชนิด *Ichthyophthirius multifiliis* และในทางการแพทย์ยังใช้เมทิลีนบลูเป็นยาดำเนิน ภาวะเป็นพิษคาร์บอนมอนอกไซด์ และการเป็นพิษจากไซยาไนด์ ถึงแม้จะไม่แนะนำให้ใช้เมทิลีนบลูในการรักษาภาวะเหล่านี้ แต่เมทิลีนบลูยังปรากฏเป็นยาดำเนินพิษในยาหลักขององค์การอนามัยโลก ปัจจุบันเมทิลีนบลูใช้เป็นยารักษาภาวะเมทฮีโมโกลบินในเลือด โดยเฉพาะในรายที่มีระดับเมทฮีโมโกลบินมากกว่า 30 % หรือไม่ตอบสนองต่อการรักษาด้วยออกซิเจน โดยให้ทางหลอดเลือดดำ ผลข้างเคียงของการใช้ยาเมทิลีนบลู ได้แก่ ปวดศีรษะ อาเจียน สับสน หายใจลำบาก ความดันโลหิตสูง และผลข้างเคียงอื่น ๆ รวมถึงการสลายของเม็ดเลือดแดงและภูมิแพ้ การใช้เมทิลีนบลูมักทำให้เหงื่อปัสสาวะ และอุจจาระมีสีน้ำเงินถึงเขียว เมทิลีนบลูมีคุณสมบัติยับยั้งเอนไซม์ออกซิเดส เอนไซม์ที่สลายสารสื่อประสาทเซโรโทนิน มีรายงานว่าผู้ป่วยที่ใช้เมทิลีนบลูร่วมกับยา Selective serotonin re-uptake inhibitors ประสบกับกลุ่มอาการเซโรโทนิน ไม่ควรใช้เมทิลีนบลูในการรักษาโรคพรวงเอนไซม์ G-6-PD เพราะจะทำให้เม็ดเลือดแดงสลาย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู (Methylene blue) ที่มา :

<https://images.app.goo.gl/1RP7G4wwWrsBhY6q6>

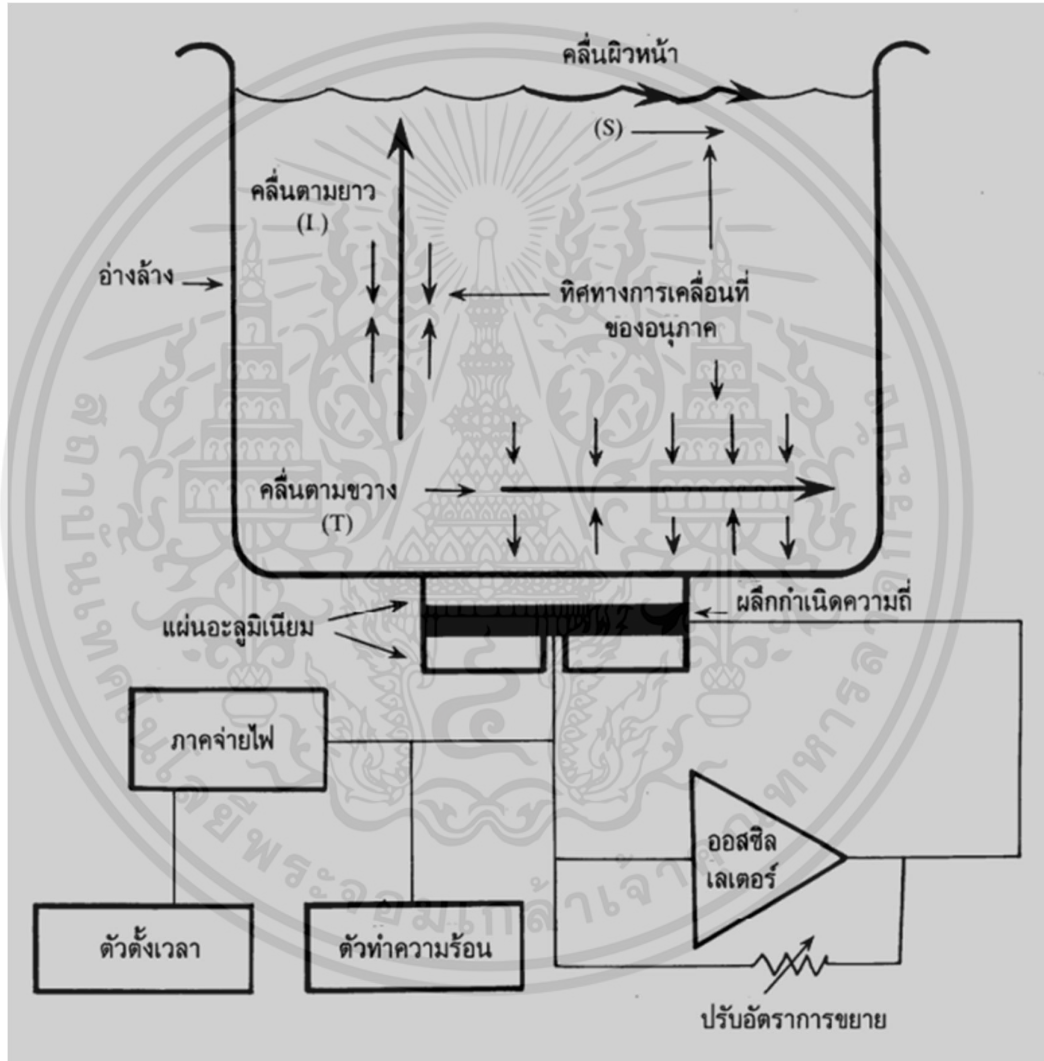
## 2.11 อัลตราโซนิก (Ultrasonic)

อัลตราโซนิก (Ultrasonic) หมายถึง คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์จะได้ยิน โดยทั่วไปแล้วหูของมนุษย์โดยเฉลี่ยจะได้ยินเสียงสูงถึงเพียงแค่ประมาณ 15 KHz เท่านั้น แต่พวกที่อายุน้อย ๆ อาจจะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่านี้ได้ ดังนั้นโดยปกติแล้วคำว่า อัลตราโซนิก จึงมักจะหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 KHz ขึ้นไป จะสูงขึ้นจนถึงเท่าใดไม่ได้ระบุจำกัดเอาไว้ สาเหตุที่มีการนำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิกมาใช้ก็เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้เราสามารถเล็งคลื่นเสียงไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจง เรื่องนี้เป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่งยังคลื่นมีความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นก็จะยิ่งสั้นลง ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่าช่องเปิด (ที่ให้เสียงนั้นออกมา) ของตัวกำเนิดเสียงความถี่นั้น เช่น คลื่นความถี่ 300 Hz ในอากาศจะมีความยาวถึงประมาณ 1 เมตรเศษ ๆ ซึ่งจะยาวกว่าช่องที่ให้คลื่นเสียงออกมาจากตัวกำเนิดเสียงโดยทั่วไปมากมายคลื่นจะหักเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงทำให้เกิดการกระจายทิศทางคลื่นแต่ถ้าความถี่สูงขึ้นมาอยู่ในย่านอัลตราโซนิก อย่างเช่น 40 KHz จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียงประมาณ 8 มิลลิเมตร เท่านั้นซึ่งเล็กกว่ารูเปิดของตัวที่ให้กำเนิดเสียงความถี่นี้มาก คลื่นเสียงจะไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งออกมาเป็นลำแคบ ๆ หรือที่เราเรียกว่า “ มีทิศทาง ”

การมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิกทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น นำไปใช้ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic remote control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic cleaner) โดยให้น้ำสั่นที่ความถี่สูง เครื่องวัดความหนาของวัตถุโดยส่งเกตรยะเวลาที่คลื่นสะท้อนกลับมา เครื่องวัดความลึกและทำแผนที่ใต้ท้องทะเล ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งอวัยวะบางส่วนในร่างกาย ใช้ทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น คลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศแล้วความถี่ที่ใช้ก็มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 KHz เพราะที่ความถี่สูงขึ้นกว่านี้ อากาศจะดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการใช้งานด้านการแพทย์ ซึ่งต้องการรัศมีทำการสั้น ๆ ก็อาจใช้ความถี่ในช่วง 1 MHz ถึง 10 MHz ขณะที่ความถี่เป็น GHz (10<sup>9</sup> Hz) ก็มีใช้กันหลาย ๆ การใช้งานที่ตัวกลางที่คลื่นเสียงเดินทางผ่านไม่ใช่อากาศ เช่น นำไปสร้างเครื่องวินิจฉัยเพศทารกในครรภ์ ใช้ตรวจรอยร้าวของกระดูก ใช้ตรวจการอุดตันของเส้นเลือดเลี้ยงหัวใจ ใช้ทำลายเซลล์มะเร็ง ใช้ทำให้ผนังเซลล์แตกเพื่อศึกษาองค์ประกอบของเซลล์ กำจัดคราบหินปูนที่ฟัน ส่วนในทางอุตสาหกรรมคลื่นเสียงอัลตราโซนิกถูกนำไปสร้างเป็นเครื่องเชื่อมพลาสติก เครื่องตรวจการรั่วของท่อ เครื่องตรวจการกัดกร่อนของ

โลหะ เครื่องชั่ง เครื่องล้างอัญมณี เครื่องล้างแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องวัดระดับ เครื่องวัดความหนาของแผ่นโลหะ และเครื่องผสมสารละลายคอลลอยด์ (Colloidal solution)

ในชีวิตประจำวันคลื่นเสียงอัลตราโซนิกถูกนำไปสร้างเป็น เครื่องซักผ้า เครื่องกันขโมย เครื่องล้างแว่นตา และเครื่องวัดระยะการถอยของรถยนต์ ฯลฯ



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของเครื่องอัลตราโซนิก

ที่มา : <https://home.kku.ac.th/chuare/12/ultrasoniccleaner.pdf>

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Chandra และคณะ (Chandra, Mirna, Sudaryanto, & Ismadji, 2007) ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน (Durian shell) เพื่อใช้ในการกำจัดเมทิลีนบลู (Methylene blue) ออกจากสารละลายน้ำซึ่งเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยมีการเผากระตุ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้การไหลเวียนของแก๊สไนโตรเจนที่อัตรา 150 cm<sup>3</sup> /min อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ KOH : Durian shell คือ 1 : 2 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าพื้นที่ผิว (Surface area) จำเพาะของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 991.82 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวของรูพรุนขนาดเล็ก 849.34 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก 0.368 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวม 0.471 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับเมทิลีนบลูพบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลง ไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์

ซึ่งถัดมาในปี 2009 (Chandra, Mirna, Sunarso, Sudaryanto, & Ismadji, 2009) นักวิจัยกลุ่มนี้ได้ทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนด้วยวิธีเดิม แต่ได้ทำการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ 6 ค่า คือ 400 - 650 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มขึ้นทีละ 50 องศาเซลเซียส และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมี (KOH) ต่อวัตถุดิบ (Durian shell) เป็น 1:4, 1:2 และ 1:1 เพื่อหาสถานะที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงสุด ผลปรากฏว่าที่อัตราส่วนสารเคมี (KOH) ต่อวัตถุดิบ (Durian shell) เป็น 1:4 เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารเคมี (KOH) ต่อวัตถุดิบ (Durian shell) เป็น 1:2 และ 1:1 ซึ่งหมายถึงการเพิ่มอัตราการซึมผ่านของสารกระตุ้น (Impregnation ratio) จะทำให้เกิดรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิ จาก 400 ไปเป็น 500 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น โดยที่ 500 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ในงานวิจัยนี้ยังชี้แนะเพิ่มเติมว่า KOH ไม่เพียงแต่ทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) เท่านั้นแต่ยังสามารถทำให้รูพรุนเปลี่ยนจากขนาดเล็กไปเป็นขนาดกลางได้อีกด้วย และได้สรุปว่า อัตราส่วนของ KOH : Durian shell ที่เหมาะสมคือ 0.5 และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและการกระจายตัวของรูพรุนได้ดีที่สุด

คือ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มเดียวกันกับผลของการทดลองของ Mohammed Danish และคณะ

Mohammed Danish และคณะ (Danish et al., 2014) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากเมล็ดอินทผลาล์ม (Date stone) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) โดยในงานวิจัยได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนเซชัน เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลาล์ม จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วย X-ray diffraction (XRD) การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) วัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคด้วย BET surface area และดูโครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค SEM จากการศึกษาได้พบว่า ความเข้มข้นของสารที่กระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นหรือเผาคาร์บอนเซชันนั้น ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพพื้นที่ผิว และผลผลิตของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นนั้น ใช้เวลาการกระตุ้นคงที่ 120 นาที เนื่องจากการศึกษาก่อนหน้านี้ได้พบว่า เวลาที่ใช้ในการเผาคาร์บอนเซชันที่นานเกิน 45 นาที ถึง 120 นาที ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แต่อย่างใด นอกจากนี้แล้วยังพบว่าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ความเข้มข้นของกรด  $H_3PO_4$  50% (8.674 mol/L) ที่อุณหภูมิกระตุ้น 900 องศาเซลเซียส ซึ่งพื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้นจาก  $216 \text{ m}^2/\text{g}$  ถึง  $1214 \text{ m}^2/\text{g}$  เมื่อเข้มข้นของกรด  $H_3PO_4$  เพิ่มขึ้นจาก 1.7% (0.298 mol/L) ถึง 50% (8.674 mol/L) ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาวิจัยนี้ได้แสดงแนวโน้มเดียวกันกับผลการศึกษาวิจัยในอดีตของ Vernersson และคณะ ในปี 2002 และสอดคล้องกับผลงานวิจัยในปี 2008 ของ Gratuito พร้อมคณะ (Gratuito, Panyathanmaporn, Chumnanklang, Sirinuntawittaya, & Dutta, 2008; Vernersson, Bonelli, Cerrella, & Cukierman, 2002) โดยที่ Vernersson และ คณะ นั้นเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีรายงานอื่น ๆ อีกมากมาย เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลที่ยังมีได้กล่าวถึงในที่นี้

Vernersson และคณะ ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ (Arundo donax cane) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นระหว่าง 400 – 550 องศาเซลเซียส พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง  $690 - 1,330 \text{ m}^2/\text{g}$  โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกรดฟอสฟอริกต่อวัตถุดิบจาก 1.5 : 1 เป็น 2 : 1 โดยน้ำหนัก จะทำให้ถ่านกัมมันต์มี

ปริมาณรพุนเพิ่มขึ้นและมีโครงสร้างรพุนเป็นแบบรพุนขนาดกลาง แต่เมื่ออัตราส่วนของกรดต่อ วัสดุบเพิ่มขึ้นเป็น 2.5 : 1 ทำให้ปริมาณรพุนลดลงเนื่องจากปริมาณกรดที่มากเกินไปได้เข้าไป ทำลายโครงสร้างรพุนของถ่านกัมมันต์

Nuithikul และคณะ ศึกษาถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน ซึ่งใช้ในการดูดซับสี Basic Green 4 โดยถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนจะถูกสังเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนหรือ การไฟโรไลซิสตามด้วยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็น การบำบัดร่วมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูก สังเคราะห์ภายใต้การไฟโรไลซิสจะแสดงคุณสมบัติที่ดีกว่า และความสามารถในการดูดซับดีกว่า ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน การไฟโรไลซิสไฮโดรคลอริกจะมีคุณสมบัติในการบำบัดและ ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในลำดับต่อมาทางจลนพลศาสตร์จะอธิบายการดูดซับสี ของ Basic Green 4 ได้ดีกว่า

Qianqian และคณะ ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการ ปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยนำรูปถ่ายที่ถูกแช่ด้วยกรดฟอสฟอริกไปผ่าน กระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกระตุ้น ด้วยต่างหัทิมในอัตราส่วน 5 : 1 กรัมต่อลิตร แล้วอบให้แห้ง พบว่าพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลงจาก 1,214.53 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 556.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับ Ning- chuan และคณะ

Ning-chuan และคณะ ทำการศึกษาการดูดซับไอออนของแคดเมียม (Cd (II)) ใน สารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากของหวงฉีที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกา เนต โดยนำกากของหวงฉีขนาด 40 เมช มาผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 80 นาที ก่อนนำมาผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในอัตราส่วน 10 : 1 กรัม ต่อลิตร แล้วอบให้แห้ง จะพบว่าพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลงจาก 1,519.53 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 774.13 ตารางเมตรต่อกรัม โดยในการลดลงของพื้นที่ผิวในการดูดซับนี้ จะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มี ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่ม มากขึ้น

EgboosiubaTC และคณะ ทำการศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลูที่เพิ่มขึ้นด้วยการอัลตราโซนิกบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากทะเลสาบปาล์มเปลา โดยนำทะเลสาบปาล์มเปลามารับกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ก่อนนำไปแช่โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ แล้วอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการดูดซับเมทิลีนบลู (MB) ด้วยการอัลตราโซนิกพร้อมและไม่ใช้อัลตราโซนิกพร้อม พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ใช้อัลตราโซนิกอยู่ที่ 1,036 ตารางเมตรต่อกรัม ในขณะที่การใช้อัลตราโซนิกพร้อมมีพื้นที่ผิวสูงกว่า 2,114 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวที่สูงขึ้นเนื่องมาจากการอัลตราโซนิกและขนาดของรูพรุนแบบขนาดกลาง (Mesopore) ช่วยในการดูดซับโมเลกุลของเมทิลีนบลูในสภาวะที่เหมาะสม ข้อมูลคุณภาพนี้ อธิบายได้ดีที่สุดโดยแบบจำลองของแลงเมียร์ บ่งชี้ว่าการดูดซับเมทิลีนบลูส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาที่รุนแรงระหว่างตัวดูดซับกับเมทิลีนบลู ความสามารถในการดูดซับขั้นเดียวสูงสุดแสดงไว้ที่ 400 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 435 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการดูดซับเมทิลีนบลูโดยไม่ใช้อัลตราโซนิกและใช้อัลตราโซนิกพร้อมตามลำดับ



## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ถูกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและการอัลตราโซนิกพร้อม โดยเน้นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ร่วมการใช้อัลตราโซนิกพร้อม ซึ่งในการดำเนินงานจะเริ่มตั้งแต่ การเตรียมวัตถุดิบจากลูกทุเรียนอ่อน การคาร์บอนเซชัน การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต การทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยการอัลตราโซนิกพร้อมและการวิเคราะห์ต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวกระตุ้น ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์ต่าง ๆ โดยจำแนกอุปกรณ์และเครื่องมือในขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์หลัก ๆ ดังนี้

##### 3.1.1 วัตถุดิบ

1. ลูกทุเรียนอ่อน จากการตัดแต่งช่อดอกจากจังหวัดระยองและจันทบุรี

##### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้

1. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Commercial grade, ศึกษาภัณฑ์พานิชย์, ประเทศไทย)
2. เมทิลีนบลู (AG grade, Merck KGaA, ประเทศเยอรมนี)
3. น้ำ DI

##### 3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องชั่งละเอียด (รุ่น CP225D, SATORIUS AG, ประเทศเยอรมนี)
2. ตู้อบ (บริษัท เคโมไซแอนซ์ (ประเทศ) จำกัด, ประเทศไทย)
3. เตาเผา (บริษัท Thermo scientific, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
4. เครื่อง Magnetic Stirrers

5. ตู้ดูดความชื้น
6. ปีกเกอร์ขนาด 50 100 500 และ 1,000 mL (Duran, ประเทศเยอรมนี)
7. ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 250 และ 1,000 mL (Duran, ประเทศเยอรมนี)
8. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 mL (Duran, ประเทศเยอรมนี)
9. Syring Filter ขนาด 0.45  $\mu\text{m}$
10. Vacuum Pump
11. Micropipete
12. Syring 10 cc
13. เครื่อง Visible Spectrophotometer (PG Instruments, สหราชอาณาจักร)
14. เครื่อง UV – Vis Spectrophotometer (Double beam)
15. เครื่อง Ultrasonics (รุ่น Elmasonic Easy 30H, ประเทศเยอรมนี)

## 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

### 3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบจากลูกทุเรียนอ่อน

นำลูกทุเรียนอ่อนมาล้างด้วยน้ำ DI เพื่อชะล้างสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำไปอบแห้ง เพื่อไล่น้ำออกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการคาร์บอนเซชันต่อไป

### 3.2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์

#### 3.2.2.1 การคาร์บอนเซชัน

นำลูกทุเรียนอ่อนที่เตรียมได้ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจนโดยใช้ทรายกลบ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิที่กำหนดทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วเก็บในตู้ดูดความชื้น

### 3.2.2.2 การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

นำลูกทุเรียนอ่อนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันแล้ว นำมาบดให้ได้ขนาด แล้วร่อนด้วยตะแกรงช่วงขนาด 6 – 12 เมช แล้วนำมาแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ด้วยอัตรา 10 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

### 3.2.3 การดูดซับเมทิลีนบลู

สำหรับการทดลองนี้ จะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากขั้นตอนการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มาใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลู โดยบรรจุถ่านลงในบีกเกอร์ ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายเมทิลีนบลู ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร บรรจุอยู่ ก่อนนำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก โดยศึกษาทั้งหมด 2 ปัจจัย คือ

1. ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (2.5 5 10 15 และ 20 ppm)
2. เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (0 2 5 10 15 30 60 90 และ 120 นาที)

ทำการวิเคราะห์การดูดซับด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร เพื่อหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสีย้อมเมทิลีนบลูโดย Calibration curve

### 3.2.4 การวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine Number)

1. เตรียมสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล สารละลายไอโอดีนที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล และน้ำแป้งสำหรับใช้เป็นอินดิเคเตอร์
2. นำถ่านชาร์หรือถ่านกัมมันต์ ชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 1 กรัม และใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลายไอโอดีนที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเขย่าแล้วทิ้งไว้ประมาณ 30 วินาที
4. ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำส่วนที่เป็นสารละลายมาใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

5. ไทเทรตสารละลายในขวดรูปชมพู่ ด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล โดยใช้น้ำแ่งเป็นอินดิเคเตอร์

6. ไทเทรตจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีใส บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ เพื่อใช้ในการคำนวณเลขไอโอดีน

### 3.2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์

ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อน 3 แบบ คือ ถ่านชาร์ ได้จากการผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน ถ่านกัมมันต์หลังแซฟโฟแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และถ่านกัมมันต์หลังแซฟโฟแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา แล้วนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

### 3.2.6 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture, M)

ทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยความชื้นในตัวอย่างถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3173-00 มีวิธีการดังนี้ ทำการบดและคัดขนาดตัวอย่าง แล้วอบด้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่สถานะเดียวกับตัวอย่างที่จะถูกอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น 30 นาที แล้วทำการชั่งน้ำหนัก ซึ่งตัวอย่างหนักประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง แล้วนำตัวอย่างที่อยู่ในถ้วยกระเบื้องไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนัก

### 3.2.7 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash, A)

ทำการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า โดยปริมาณเถ้าในตัวอย่างถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 2866-70 มีวิธีการดังนี้ ทำการบดและคัดขนาดตัวอย่าง แล้วเผาด้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่สถานะอุณหภูมิที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนัก ซึ่งตัวอย่างที่ถูกลอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่อบแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น หลังจากนั้นค่อยเปิดฝาโถดูดความชื้นเพื่อป้องกันการสูญเสียเถ้า แล้วชั่งน้ำหนักที่ได้

### 3.2.8 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter ,VM)

ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย โดยปริมาณสารระเหยในตัวอย่างถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 5832-98 มีวิธีการดังนี้ หาปริมาณความชื้นของตัวอย่างตามการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเผาด้วยกระบี่อ้อมพร้อมฝาที่สภาวะอุณหภูมิที่ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วทำการชั่งน้ำหนักชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัมใส่ในถ้วยกระบี่อ้อมพร้อมฝาปิด วางถ้วยกระบี่อ้อมพร้อมฝาปิดที่บรรจุสารตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่ได้



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อน โดยนำลูกทุเรียนอ่อนมาผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส หลังจากคาร์บอนเซชันกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลู วิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ โดยการวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine Number) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะขององค์ประกอบตัวอย่าง (Proximate analysis)

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะขององค์ประกอบของตัวอย่าง พบว่ามีองค์ประกอบของปริมาณความชื้นเท่ากับ 4.59 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าเท่ากับ 11.06 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารระเหยเท่ากับ 8.41 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 75.94 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4. 1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของตัวอย่าง

ตัวอย่าง	วิเคราะห์			
	ความชื้น (%)	ปริมาณเถ้า (%)	สารระเหย (%)	คาร์บอนคงตัว (%)
ลูกทุเรียนอ่อน	4.59	11.06	8.41	75.94
เปลือกทุเรียน	7.04	3.01	89.46	0.49

จากตารางที่ 4.1 พบว่าจากตัวอย่างลูกทุเรียนอ่อนและเปลือกทุเรียนมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนคงตัวสูง คือ ลูกทุเรียนอ่อนมีคาร์บอนคงตัวสูงกว่า ร้อยละ 75 ดังนั้นจึงเลือกลูกทุเรียนอ่อนเป็นวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะคาร์บอนคงตัวเป็นคาร์บอนที่สามารถทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิที่สูงได้ [13]

## 4.2 การวิเคราะห์เลขไอโอดีน (Iodine Number)

ในการเตรียมตัวดูดซับแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก การคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และขั้นตอนที่สอง การกระตุ้นถ่านชาร์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ตัวดูดซับที่เตรียมจากลูกทุเรียนอ่อน 3 แบบ คือ ถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา ทำการทดสอบเลขไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM : D4607-94 [11] แสดงดังตารางที่ 4.2

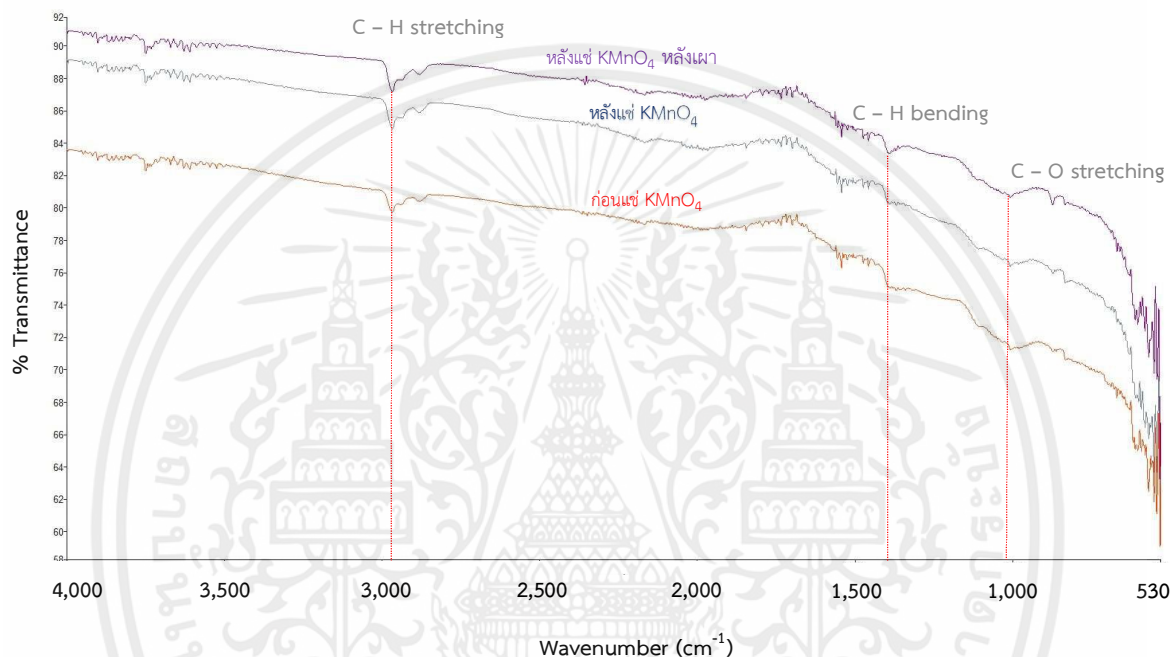
ตารางที่ 4. 2 เลขไอโอดีนของถ่านมันต์

ชนิดของตัวดูดซับ	เลขไอโอดีน ( $\text{mg}_{\text{Iodine}}/\text{g}_{\text{Biochar}}$ )
ถ่านชาร์	442.7
ถ่านกัมมันต์หลังแช่ $\text{KMnO}_4$	534.9
ถ่านกัมมันต์หลังแช่ $\text{KMnO}_4$ หลังเผา	548.8

จากตารางที่ 4.2 พบว่าตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา จะมีเลขไอโอดีนมากที่สุด ซึ่งให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากถ่านชาร์ที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งส่งผลทำให้รูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตยังช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ แต่บางส่วนอาจจะไปอุดตันภายในรูได้ ดังนั้นหลังจากการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้วมาผ่านการเผาอีกรอบจะทำให้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่อุดตันรูหลุดออกไปจากตัวถ่านกัมมันต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ จะส่งผลให้เกิดการดูดซับไอโอดีนที่เพิ่มมากขึ้น [20]

### 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดด้วยเครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) ในช่วงเลขคลื่น 530 – 4,000  $\text{cm}^{-1}$  ดังรูปที่ 4.1

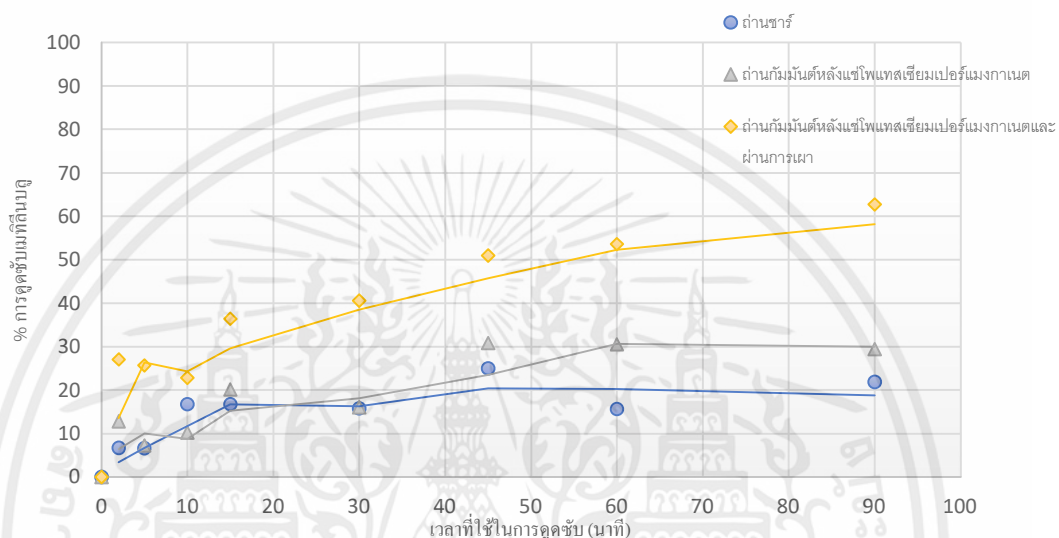


รูปที่ 4.1 กราฟแสดง FTIR Spectra ของถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา กราฟมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน พีคที่ตำแหน่งในช่วง 2,850 – 2,918  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึง C – H stretching พีคที่ตำแหน่ง 1,477  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึง C – H bending และพีคที่ตำแหน่ง 1,025  $\text{cm}^{-1}$  ตรงกับ C – O stretching [19] จากงานวิจัยของ Sumrit รายงานว่า Mn – O vibration จะเกิดที่ตำแหน่ง 460  $\text{cm}^{-1}$  ดังนั้นจากรูป 4.1 จึงไม่สามารถแสดงการมีอยู่ของ  $\text{KMnO}_4$  ในตัวดูดซับได้ [19] [21]

#### 4.4 ชนิดของตัวดูดซับ

ศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้นที่ 10 ppm ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 4.2



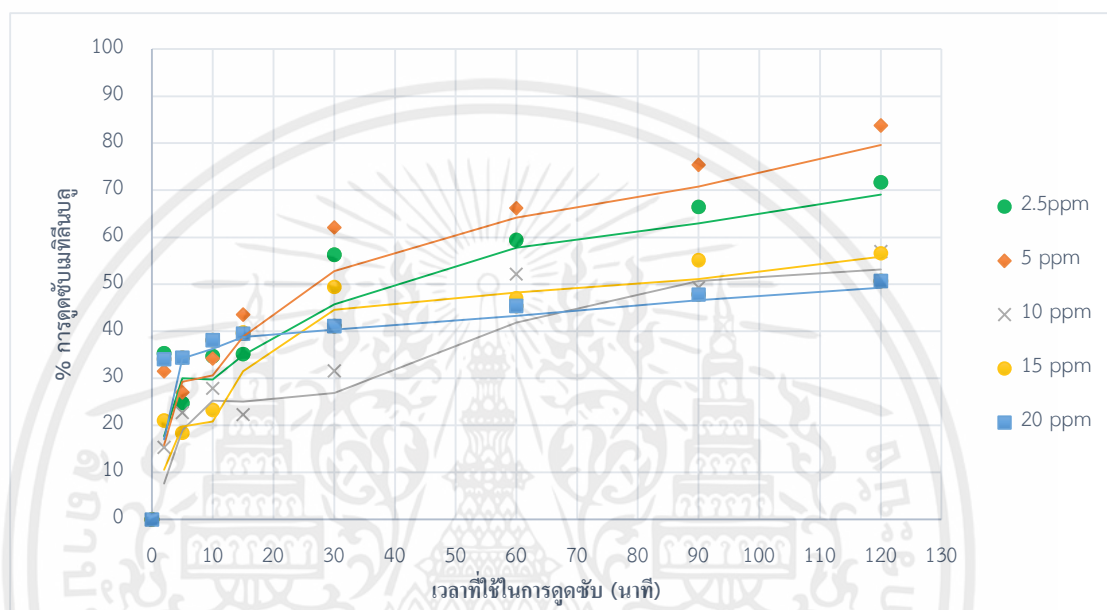
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ 3 ชนิด

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ ถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์หลังแซ็พโทเทสซีมเปอร์แมงกานेट และถ่านกัมมันต์หลังแซ็พโทเทสซีมเปอร์แมงกานेटและผ่านการเผา พบว่า ที่เวลา 90 นาที ถ่านกัมมันต์หลังแซ็พโทเทสซีมเปอร์แมงกานेटและผ่านการเผา มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูสูงที่สุดอยู่ที่ 56.4 เปอร์เซ็นต์ มากกว่าของถ่านชาร์ และถ่านกัมมันต์หลังแซ็พโทเทสซีมเปอร์แมงกานेटที่ 21.9 เปอร์เซ็นต์ และ 29.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจากการผ่านการเผา [6] [9]

ดังนั้นในการทดลองถัดไป งานวิจัยนี้เลือกถ่านกัมมันต์หลังแซ็พโทเทสซีมเปอร์แมงกานेटและผ่านการเผา เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลู

#### 4.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นเมทิลีนบลู

ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลูที่ 2.5 5 10 15 และ 20 ppm โดยใช้ ถ่านกัมมันต์แบบหลังแซโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผาเป็นตัวดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.3

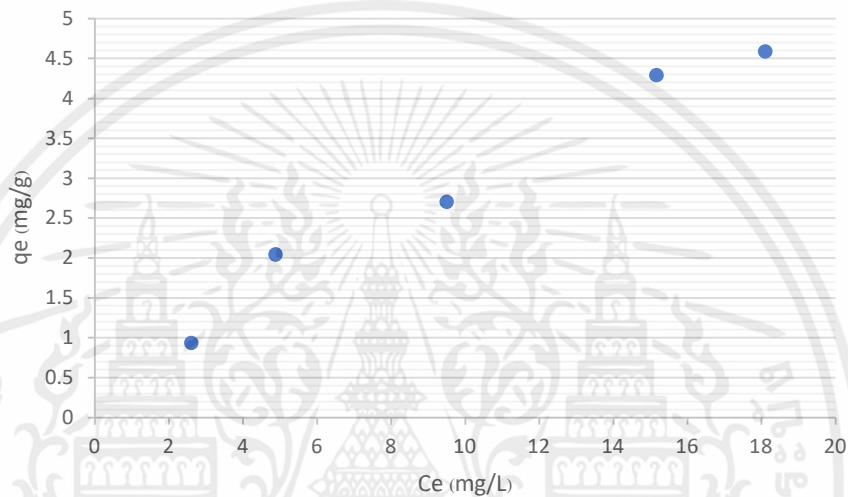


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของความเข้มข้นต่าง ๆ ของเมทิลีนบลูที่ใช้ถ่านกัมมันต์หลังแซโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผาเป็นตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นช่วง 5 นาทีแรก เปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากผ่านไป 60 นาที เปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ที่เวลา 2 ชั่วโมงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.5 5 10 15 และ 20 ppm มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 71.6 เปอร์เซ็นต์ 83.7 เปอร์เซ็นต์ 56.9 เปอร์เซ็นต์ 56.6 เปอร์เซ็นต์ และ 51.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูสูงที่สุดที่ 83.7 เปอร์เซ็นต์ อยู่ที่สภาวะ 5 ppm ที่มีปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัม และเวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 120 นาที [6]

#### 4.6 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

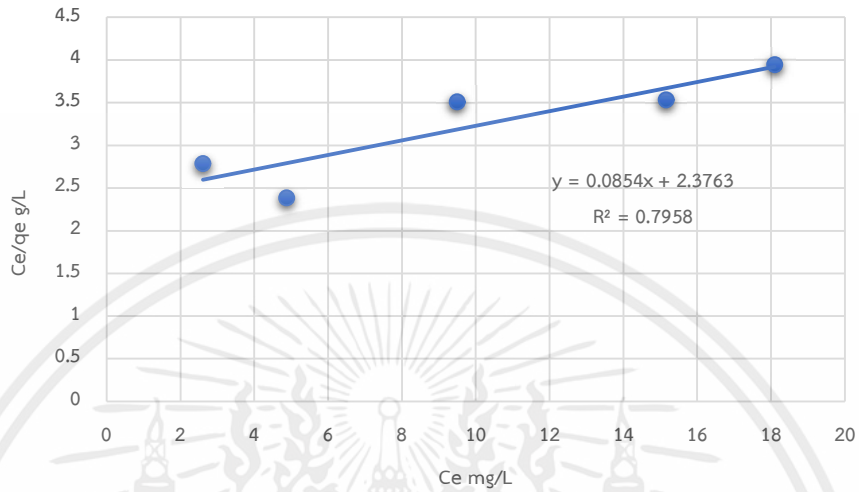
ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่สภาวะสมดุล ด้วยตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา จำนวน 2 กรัม ที่ความเข้มข้นเมทิลีนบลู 5 ค่า เริ่มต้นจาก 2.5 5 10 15 และ 20 ppm แสดงดังรูปที่ 4.4



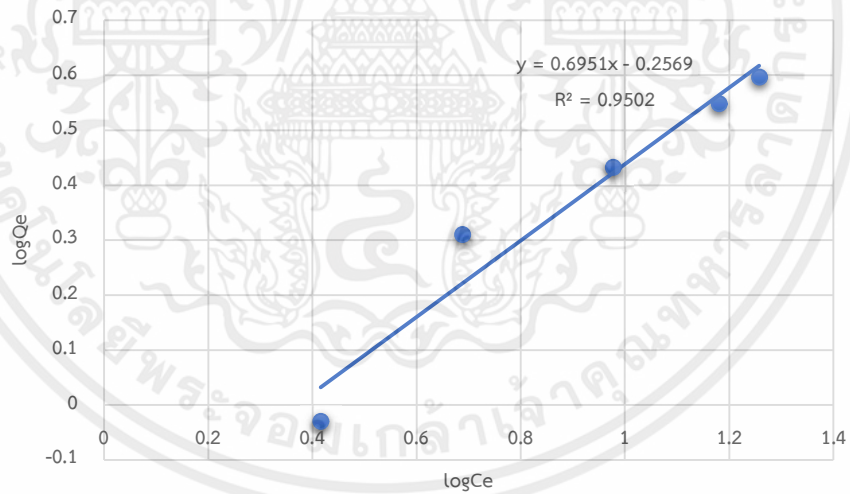
รูปที่ 4.4 กราฟไอโซเทอมการดูดซับ

จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อความเข้มข้นที่สมดุลเพิ่มขึ้น ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น

ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์หลังแซโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผาจะใช้แบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์และแบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนด์ลิช รูปที่ 4.5 แสดงไอโซเทอมของแลงเมียร์ มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.796  $q_m$  เท่ากับ 11.710 mg/g และค่า  $b$  เท่ากับ 0.036 L/mg และรูปที่ 4.6 แสดงไอโซเทอมของฟรุนด์ลิช มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.950  $k_f$  เท่ากับ 0.553 mg/g และค่า  $n$  เท่ากับ 1.439 ดังสรุปในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอม	ค่าคงที่
แลงเมียร์ $\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bq_m} + \frac{C_e}{q_m}$	$R^2 = 0.796$
	$q_m = 11.710 \text{ mg/g}$
	$b = 0.036 \text{ L/mg}$
ฟรอนด์ลิช $\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$	$R^2 = 0.950$
	$k_f = 0.553 \text{ mg/g}$
	$n = 1.439$

จากตารางที่ 4.2 พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับที่ได้ของถ่านกัมมันต์มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชมากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ [22] โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์  $R^2$  ซึ่งเท่ากับ 0.950 มากกว่าค่า  $R^2$  ของแลงเมียร์ที่มีค่าเท่ากับ 0.796 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น เกิดขึ้นหลายชั้น [23]

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุเรียนอ่อนโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และศึกษาความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากลูกทุเรียนอ่อน เตรียมตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ ถ่านชาร์ ถ่านกัมมันต์หลังแฮโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และถ่านกัมมันต์หลังแฮโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา ทดสอบการดูดซับไอโอดีนของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผา จะมีค่าไอโอดีนมากที่สุด เท่ากับ 548.8 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมตัวดูดซับ แสดงถึงถ่านกัมมันต์ที่ได้ มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงและรูพรุนเกิดมากที่สุด จึงเลือกถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 2.5 5 10 15 และ 20 ppm จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการดูดซับนานขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูลดลง พบว่าที่สภาวะความเข้มข้น 5 ppm เวลาในการดูดซับที่ 2 ชั่วโมง และปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูอยู่ที่ 83.76 เปอร์เซ็นต์ ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์พบว่ามีไอโซเทอมของการดูดซับของถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรอนด์ลิซมากกว่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เวลาในการทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลู อาจปรับแก้ด้วยการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการดูดซับให้มากขึ้น เพื่อยืนยันประสิทธิภาพกระบวนการดูดซับถึงจุดสมดุล

5.2.2 วิธีในการวิเคราะห์ผลอื่น ๆ เพื่อให้ได้ผลที่ได้ความถูกต้องมากที่สุด เช่น การตรวจหาพื้นที่ผิวจำเพาะในการดูดซับ BET (Brunauer-Emmett-Teller) การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อระบุชนิดของสารประกอบและโครงสร้างผลึก XRD (X-ray Diffractometer) เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศิริดา ศิริเบญจพฤษ์, ธนากรแห่งประเทศไทย, ทูเรียนไทยกับความท้าทายที่ไม่ควรมองข้าม, (2561).
- [2] จิรวุฒิ มากมี, ณัฐวัตร ท้วมเทียบ, ณัฐวัชร์ ถาวรวงษ์, การบำบัดน้ำเสียอ้อมเมทิลีนบลูจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยพลาสติกอะลูมิเนียมดำ, (2559).
- [3] สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า, ทูเรียน ราชอาณาจักรแห่งผลไม้ไทย ถูกใจคนต่างแดน, (2563). [http://www.tpsoc.moc.go.th/sites/default/files/thueriyn\\_240863.pdf](http://www.tpsoc.moc.go.th/sites/default/files/thueriyn_240863.pdf)
- [4] Methylene Blue, (2564). <https://www.pobpad.com/methylene-blue>
- [5] Mohd Azmier, Nur Ayshah Rosli, Mohd Edeerozey Abd Manaf, Adsorption of Cationic Methylene Blue Dye Using Microwave-Assisted Activated Carbon Derived from Acacia Wood, (2021).
- [6] T.C. Egbosiuba, A.S. Abdulkareem, A.S. Kovo, E.A. Afolabi, J.O. Tijani, M. Auta, W.D. Roos, Ultrasonic Enhanced Adsorption of Methylene Blue onto the Optimized Surface Area of Activated Carbon: Adsorption Isotherm, Kinetics and Thermodynamics, (2019).
- [7] Q. Shi, J. Zhang, C. Zhang, Wei Nie, Bo Zhang, H. Zhang, Adsorption of Basic Violet 14 in aqueous solutions using  $\text{KMnO}_4$ -modified activated carbon, (2010).
- [8] N. FENG, Wei FAN, Mei-lin ZHU, Xue-yi GUO, Adsorption of  $\text{Cd}^{2+}$  in aqueous solutions using  $\text{KMnO}_4$ -modified activated carbon derived from Astragalus residue, (2018).
- [9] Y. Wang, X. Wang, Xin Wang, Mian Liu, L. Yang, Zhen Wu, Siqing Xia, Jianfu Zhao, Adsorption of  $\text{Pb(II)}$  in aqueous solutions by bamboo charcoal modified with  $\text{KMnO}_4$  via microwave irradiation, (2012).

- [10] G. Zhang, Y. Sun, P. Zhao, Ying Xu, AiTing Su, Jiangwen Qu, Characteristics of activated carbon modified with alkaline  $\text{KMnO}_4$  and its performance in catalytic reforming of greenhouse gases  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ , (2017).
- [11] Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon, (2006).
- [12] Merck, IR Spectrum Table & Chart, (2021). <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table>.
- [13] T. C. Chandra, M Maria Mirna, J. Sunarso, Y. Sudaryanto, Suryadi Ismadji, Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization, (2009)
- [14] Tangsathitkulchai, C. and Tangsathitkulchai, M., Study of Slag Deposit Formation Using Synthetic Coals, Taipei, Taiwan, (1996).
- [15] Tangsathitkulchai, M. and Austin, L.G., Studies of Slag Deposit Formation Using a Laboratory Furnace, USA, (1985).
- [16] สุภาพร รัตนพันธ์ และคณะ, การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด, (2018)
- [17] ชีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล, ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ, (2017).
- [18] C. Tangsathitkulchai, C. Kuvarananchareon, and M. Tangsathitkulchai, Sintering Study of Thai Lignite Ashes, KMITT, (1994).
- [19] Sumrit M. and Thaksaphon B.,  $\text{KMnO}_4$  Modified Carbon Prepared from Waste of Pineapple Leaf Fiber Production Processing for Removal of Ferric Ion from Aqueous Solution, (2016).

- [20] T.F. Fatemeh, H. Tavanai and A.H. Hosseini, An investigation on the effect of  $\text{KMnO}_4$  on the pore characteristics of pistachio nut shell based activated carbon, (2016).
- [21] M. Mylarappa, V. Venkata Lakshmi, K.R. Vishnu Mahesh, H.P. Nagaswarupa and N. Raghavendra, A facile hydrothermal recovery of nano sealed  $\text{MnO}_2$  particle from waste batteries : An advanced material for electrochemical and environmental applications, (2016).
- [22] Hatice Karaer Yagmur and Ismet Kaya, Synthesis and characterization of magnetic  $\text{ZnCl}_2$  - activated carbon produced from coconut shell for the adsorption of methylene blue, (2021).
- [23] T. Xing, Y. Wu, Q. Wang, A. Sadrnia, A. Behmaneshfar and E. Niculina Dragoi, Adsorption of ibuprofen using waste coffee derived carbon architecture: Experimental, kinetic modeling, statistical and bio-inspired optimization, (2023).



## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลการทดลอง

#### ก.1 การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ก.1 เปอร์เซ็นต์การดูดซับของเมทิลีนบลู

Adsorbent load (g)	MB Concentration (ppm)	Time (min)	% Removal
2	2.5	0	0
2	5	0	0
2	10	0	0
2	15	0	0
2	20	0	0
2	2.5	2	35.37
2	5	2	31.52
2	10	2	15.31
2	15	2	21.04
2	20	2	35.00
2	2.5	5	24.72
2	5	5	27.03
2	10	5	22.65
2	15	5	18.39
2	20	5	35.35
2	2.5	10	34.69
2	5	10	34.18
2	10	10	27.88
2	15	10	23.23
2	20	10	38.98

Adsorbent load (g)	MB Concentration (ppm)	Time (min)	% Removal
2	2.5	15	35.15
2	5	15	43.52
2	10	15	22.28
2	15	15	39.75
2	20	15	40.37
2	2.5	30	56.24
2	5	30	62.06
2	10	30	31.55
2	15	30	49.42
2	20	30	41.97
2	2.5	60	59.41
2	5	60	66.18
2	10	60	52.15
2	15	60	47.08
2	20	60	46.19
2	2.5	90	66.44
2	5	90	75.39
2	10	90	49.24
2	15	90	55.11
2	20	90	48.57
2	2.5	120	71.66
2	5	120	83.76
2	10	120	56.94
2	15	120	56.59
2	20	120	51.40

## ก.2 ชนิดตัวดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ก.2.1 ถ่านชาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm

Time (min)	Abs.	[ ] ppm	% Removal
0	1.612	9.52	0
2	1.503	8.88	6.76
5	1.505	8.89	6.64
10	1.342	7.93	16.75
15	1.342	7.93	16.75
30	1.357	8.02	15.82
45	1.209	7.14	25.00
60	1.360	8.03	15.63
90	1.259	7.44	21.90

ตารางที่ ก.2.2 ถ่านกัมมันต์หลังแซ็พแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm

Time (min)	Abs.	[ ] ppm	% Removal
0	1.537	9.08	0
2	1.340	7.91	12.82
5	1.425	8.42	7.29
10	1.379	8.14	10.28
15	1.227	7.25	20.17
30	1.290	7.62	16.07
45	1.063	6.28	30.84
60	1.068	6.31	30.51
90	1.085	6.41	29.41

ตารางที่ ก.2.3 ถ่านกัมมันต์หลังแช่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 ppm

Time (min)	Abs.	[ ] ppm	% Removal
0	1.591	9.40	0
2	1.160	6.85	27.09
5	1.182	6.98	25.71
10	1.227	7.24	22.88
15	1.012	5.98	36.39
30	0.945	5.58	40.60
45	0.780	4.61	50.97
60	0.738	4.36	53.61
90	0.593	3.50	62.73

### ก.3 การวิเคราะห์ Proximate analysis

ตารางที่ ก.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของตัวอย่าง

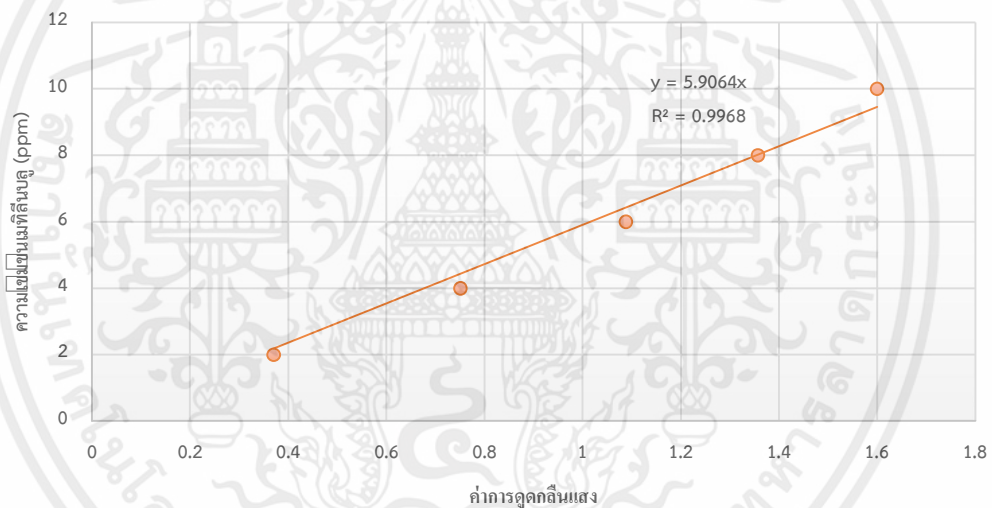
ตัวอย่าง	น้ำหนักของตัวอย่าง		วิเคราะห์
	ก่อน (กรัม)	หลัง (กรัม)	
ลูกทุเรียนอ่อน	1.00188	0.95591	ความชื้น
	0.95591	0.10575	ปริมาณเถ้า
	1.00101	0.91169	สารระเหย
เปลือกทุเรียน	1.00111	0.93061	ความชื้น
	0.93061	0.02799	ปริมาณเถ้า
	1.00045	0.03500	สารระเหย

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลการวิเคราะห์และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

#### ข.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสง จากสารละลายมาตรฐานเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 2 4 6 8 และ 10 ppm ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Visible spectrometer สามารถสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสง ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของเมทิลีนบลู

## ข.2 การวิเคราะห์ Proximate analysis

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture, M) ทำได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash, A) ทำได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$\text{ปริมาณเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (Volitematter, VM) ทำได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$\text{ปริมาณสารระเหย} = \frac{(\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักของตัวอย่างหลังเผา})}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon, FC) ทำได้โดยการคำนวณจากสมการ

$$\text{Fix carbon, \%} = 100 - (\text{moisture, \%} + \text{ash, \%} + \text{volitematter, \%})$$