



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การเตรียม การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากภาคตะวันออกของประเทศไทย เพื่อเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก  
จากสารละลายน้ำ

Preparation, Characterization and Application of Activated  
Carbon from Eastern Thailand Agricultural Wastes as  
Adsorbents for Heavy Metals from Aqueous Solution

หัวหน้าโครงการวิจัย

ดร.สุคนทิพย์ เถาว์โสภา

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้

(เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 1677  
สัญญาเลขที่ 225/2561

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การเตรียม การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทาง  
การเกษตรจากภาคตะวันออกของประเทศไทย เพื่อเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก  
จากสารละลายน้ำ

Preparation, Characterization and Application of Activated  
Carbon from Eastern Thailand Agricultural Wastes as  
Adsorbents for Heavy Metals from Aqueous Solution

หัวหน้าโครงการวิจัย

ดร.สุคนธ์ทิพย์ เถาว์โสภา

คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ เลขที่ สัญญา 225/2561

## Acknowledgment

This work was financially supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand (Grant no. 225/2561).

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ประเภท คือ กะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด โดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 20, 40 และ 60% w/w ในกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์วัตถุดิบจะถูกเผาคาร์บอนที่ 500 องศาเซลเซียส และเผากระตุ้นที่ 400, 600 และ 800 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 1,346.6 m<sup>2</sup>/g และปริมาตรรูขุมขนรวมเท่ากับ 0.7441 cm<sup>3</sup>/g นอกจากนี้พบว่า ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนเป็นรูพรุนแบบไมโครพอร์ส ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและเปลือกมังคุดมีค่ารูพรุนเฉลี่ยเป็นแบบเมโสพอร์ส ไอโซเทอมการดูดซับของสารละลายตะกั่วและทองแดงของถ่านกัมมันต์ทั้งหมดเป็นแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

## Abstract

This research, activated carbon were prepared from 3 type agricultural waste (coconut shell, durian peel and mangosteen peel) by chemical activation with potassium hydroxide (KOH) 20, 40 and 60% w/w. In the preparation process, raw materials were carbonized at 500 °C and activated at 400, 600 and 800 °C. The activated carbon from coconut shell had the highest specific surface area 1,346.6 m<sup>2</sup>/g and total pore volume was 0.7441 cm<sup>3</sup>/g. In addition, the average pore size of activated carbon from durian shell is microporous pore. Activated carbon from coconut shell and mangosteen peel has average porosity in mesoporous type. The adsorption isotherm of lead and copper solution of all activated carbon are Langmire model, which single layer adsorption.

## สารบัญเรื่อง (Table of Contents)

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ (Abstract)	ข
สารบัญเรื่อง (Table of Contents)	ค
สารบัญตาราง (List of tables)	ง
สารบัญภาพ (List of illustrations)	จ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย (List of Abbreviations)	ช
(1) บทนำ (Introduction)	1
1.1 เนื้อหาของเรื่องที่เคยมีผู้ทำการวิจัยมาก่อน	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	6
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย	9
1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุปทฤษฎี และ/หรือ แนวทางความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	17
(2) เนื้อเรื่อง (Main Body)	18
2.1 วิธีดำเนินการวิจัย (Materials & Method)	18
2.2 ผลการวิจัย (Results)	27
(3) อภิปราย/วิจารณ์ผล (Discussion)	57
(4) สรุปและขอเสนอแนะ (Conclusion and Recommendations)	59
(5) ผลผลิต (Output)	60
รายงานสรุปการเงิน	61
เอกสารอ้างอิง (Reference)	63
ภาคผนวก (Appendix)	67
ประวัตินักวิจัยและคณะ พร้อมหน่วยงานสังกัด	69

## สารบัญตาราง (List of tables)

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรบางชนิด	1
2	ปริมาณผลผลิตทุเรียน มะพร้าวผลแก่ และมังคุด ในเขตพื้นที่ภาคตะวันออก และผลผลิตรวมทั้งประเทศ ช่วงปี พ.ศ. 2557-2562	8
3	ร้อยละผลผลิตของถ่านและถ่านกัมมันต์จากเปลือกกะลามะพร้าว	29
4	ร้อยละผลผลิตของถ่านและถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	29
5	ร้อยละผลผลิตของถ่านและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	29
6	ร้อยละเถ้าและความชื้นเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว	30
7	ผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิของการเผา กระจกุ้นที่มีผลต่อค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	31
8	ร้อยละการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่วของถ่านกัมมันต์ จากเปลือกมังคุด	33
9	ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และระยะเวลาในการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	34
10	ร้อยละการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายทองแดงของถ่านกัม มันต์จากเปลือกมังคุด	35
11	ปริมาณของทองแดงที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และระยะเวลาในการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	36
12	ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และร้อยละการดูดซับของถ่านกัม มันต์จากเปลือกทุเรียน	37
13	ปริมาณของทองแดงที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และร้อยละของการดูดซับ สารละลายทองแดงที่ความเข้มข้น 20 mg/L ของถ่านกัมมันต์จากเปลือก ทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g	38
14	ร้อยละของการดูดซับสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของถ่านกัมมันต์ จากเปลือกทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g เมื่อเวลาดูดซับเท่ากับ 180 นาที	39
15	พารามิเตอร์ของไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและทองแดง ของแลงเมียร์	49
16	พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วและทองแดง ของฟรอยด์ลิช	49
17	ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET	53

## สารบัญภาพ (List of illustrations)

รูปที่		หน้า
1	ตัวอย่าง (ก) เปลือกกะลามะพร้าว (ข) เปลือกทุเรียน และ (ค) เปลือกมังคุด ที่ผ่านการตากแห้งด้วยแสงแดดเป็นเวลา 2 วัน	20
2	ตัวอย่างการบรรจุเปลือกทุเรียนในหม้อปั้นดินเผาและเผาเป็นถ่านด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง	21
3	การเตรียมถ่านจากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด โดยการเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที	28
4	ตัวอย่างถ่านถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	28
5	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb)	32
6	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานทองแดง (Cu)	32
7	ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่วของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	34
8	ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายทองแดงของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	36
9	ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่ว (Pb) ที่ความเข้มข้น 50 mg/L ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g	38
10	ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้น 20 mg/L ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g	39
11	ปริมาณการดูดซับสารละลายตะกั่ว (Pb) กับปริมาณของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด	40
12	ปริมาณการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu) กับปริมาณของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด	41
13	ปริมาณการดูดซับกับค่าพีเอชของสารละลายตะกั่ว	41
14	ปริมาณการดูดซับกับค่าพีเอชของสารละลายทองแดง	42
15	ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	43
16	ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วของฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	43
17	ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	44

18	ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของฟรอยด์ลิซ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	44
19	ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	45
20	ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของฟรอยด์ลิซ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	45
21	ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	46
22	ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของฟรอยด์ลิซ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	46
23	ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	47
24	ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของฟรอยด์ลิซ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	47
25	ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดงของ (Cu) แลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	48
26	ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของฟรอยด์ลิซ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	48
27	FT-IR สเปกตรัมของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยการกระตุ้น KOH	50
28	FT-IR สเปกตรัมของถ่านเปลือกทุเรียนและถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนที่กระตุ้นด้วยการกระตุ้น KOH	51
29	FT-IR สเปกตรัมของถ่านเปลือกมังคุดและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยการกระตุ้น KOH	52
30	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกะลามะพร้าว ถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกมังคุด ด้วยเทคนิค SEM	54
31	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยเทคนิค SEM	55



### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย (List of Abbreviations)

HNO <sub>3</sub>	=	Nitric acid
KOH	=	Potassium hydroxide
HCl	=	Hydrochloric acid
NaOH	=	Sodium hydroxide
Pb	=	Lead
Cu	=	Copper
AC	=	Activated Carbon
MA	=	Mangosteen peel
CO	=	Coconut shell
DU	=	Durian shell

## (1)

## บทนำ (Introduction)

## 1.1 เนื้อหาของเรื่องที่เคยมีผู้ทำการวิจัยมาก่อน

โดยปกติองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ส่วนใหญ่เป็นลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic) ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ในอัตราส่วนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลส ดังแสดงในตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรบางชนิด โดยทั่วไปพบเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 15-95 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 5-80 และลิกนินร้อยละ 5-40 (Abdolali et al., 2014; Lee, Parameswaran, Lee, & Park, 2008)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรบางชนิด

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	องค์ประกอบทางเคมี (%)		
	เซลลูโลส (Cellulose)	เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	ลิกนิน (Lignin)
ฟางข้าว (Rice straw)	25–35	20–30	10–15
ฟางข้าวสาลี (Wheat straw)	30–35	26–32	16–21
ฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley straw)	30–35	24–29	14–15
ชานอ้อย (Sugarcane bagasse)	32–44	25–35	19–24
ต้นสน (Pine)	48.1	23.5	28.4
ใบไม้ (Leaves)	15–25	70–80	5–10
เศษฝ้าย (Cotton waste)	80–95	5–20	–
ไม้ไผ่ (Bamboo)	26–43	15–26	21–31
หญ้า (Grass)	30–40	35–50	10–25
ซังข้าวโพด (Corncob)	35–45	35–45	5–15
หินมะกอก (Olive stone)	30–35	20–30	20–25
เปลือกและเมล็ดถั่ว (Nut shell and stone)	25–35	25–30	30–40
ต้นยูคา (Eucalyptus)	52.7	31.9	15.4
เปลือกไม้ (Wood bark)	25.2	30.3	44.5

ที่มา: บทความทางวิชาการของ Afroze และ Sen (Afroze & Sen, 2018)

โครงสร้างของสารประกอบในวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับกับอะตอมของธาตุต่าง ๆ ที่เป็นมลพิษในน้ำได้ กลไกการจับ (Binding mechanisms) ก็จะแตกต่างกันไป ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันนี้ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากหลายชนิดได้ถูกนำมาทำการศึกษาวิจัย เพื่อพัฒนาเป็นตัวดูดซับ (Adsorbents) สารต่าง ๆ ที่ไม่พึงประสงค์ออกจากน้ำเสีย เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ มีราคาค่อนข้างต่ำหรือไม่มีมูลค่าเลย ดังนั้นการนำวัสดุเหล่านี้มาทำเป็นตัวดูดซับ จึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างต่ำ จนบางครั้งตัวดูดซับเหล่านี้ ถูกเรียกว่า “ตัวดูดซับต้นทุนต่ำ (Low-cost adsorbents)” มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากที่ถูกนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับ และมีการรายงานผลการศึกษาวิจัยไว้จำนวนมาก ได้แก่ ชานอ้อย เปลือกถั่ว กากกาแฟ ชั่งข้าวโพด กะลามะพร้าว เมล็ดทานตะวัน เมล็ดมะกอก ฟางข้าว เมล็ดยางพารา ใบชา แกลบ เปลือกผลไม้ต่าง ๆ และอื่น ๆ อีกมากมาย ที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ (Bhatnagar, Sillanpää, & Witek-Krowiak, 2015; Hammed, Dewayanto, Du, Ab Rahim, & Nordin, 2016; Mohan & Pittman, 2006; Shehzad, Bashir, Sethupathi, & Lim, 2015; Yahya, Al-Qodah, & Ngah, 2015)

สำหรับกระบวนการในการดูดซับนั้น สามารถทำได้หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านั้นไปทำการดูดซับโดยตรง โดยไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นใด ๆ ก่อน หรือบางกรณีได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนนำไปทำการดูดซับ อีกหนึ่งทางเลือกคือการเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon; AC) (Mohan & Pittman, 2006) แล้วนำถ่านกัมมันต์ไปใช้เป็นตัวดูดซับ ซึ่งในหลายปีที่ผ่านมาได้มีผลงานวิจัยเรื่องถ่านกัมมันต์ตีพิมพ์เผยแพร่ออกมาเป็นจำนวนมากดังที่ Afroze และ Sen ได้ทำการเขียนรีวิว (Review) ไว้ในปี ค.ศ. 2018 (Afroze & Sen, 2018) นอกจากนี้จากการทบทวนวรรณกรรมของนักวิจัยเอง ได้พบงานวิจัยเกี่ยวกับนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เป็นตัวดูดซับ รวมทั้งการเตรียมถ่านกัมมันต์ การทดสอบคุณสมบัติ และการทดลองประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารต่าง ๆ มากมาย ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Ngah และ Hanafiah ในปี 2008 (Ngah & Hanafiah, 2008) ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ เช่น แกลบ ชี้เลื่อย กะลามะพร้าว ถ่านชานอ้อย เปลือกผลไม้ และเมล็ดพืชต่าง ๆ นำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก โดยเปรียบเทียบผลการดูดซับของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 2 แบบ คือ วัตถุดิบที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ (modification) หรือการกระตุ้น (activation) ด้วยสารเคมีต่าง ๆ ก่อนถูกนำไปดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย อาทิเช่น แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) และ นิกเกิล (Ni) ผลปรากฏว่าวัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพมีความสามารถ ในการดูดซับได้ดีกว่า วัตถุดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากนี้แล้ว ยังพบผลงานวิจัยที่ชี้ให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการปรับสภาพอีกด้วย ซึ่งเทคนิคในการปรับสภาพหรือการกระตุ้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ ในบรรดาสามวิธีการนี้ วิธีการปรับสภาพด้วยสารเคมีถูกนำมาใช้มากที่สุด ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ

ขั้นตอนในการปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมีนั้น สามารถใช้สารเคมีที่เป็นสารละลายเบส (base solution) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นต้น หรือจะเลือกใช้สารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์ (organic acid solution) เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นต้น (Gautam, Mudhoo, Lofrano, & Chattopadhyaya, 2014) แต่อย่างไรก็ตาม เราได้พบว่าประสิทธิภาพของการดูดซับยังต่ำกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นอย่างมาก

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เรามีเป้าหมายเพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่นภาคตะวันออก มีปริมาณมาก มีมูลค่าต่ำ เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสูง และมีคุณสมบัติพิเศษในการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากถ่านกัมมันต์นั้น มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง มีเสถียรภาพทางเคมีสูง มีความโปร่งใส และมีสมบัติการเป็นตัวเลือกที่ดี อีกทั้งการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์นั้นมีต้นทุนต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า (commercial activated carbon) จากการศึกษารายงานการวิจัยในอดีตของนักวิจัยกลุ่มต่าง ๆ ได้ได้พบว่า ประสิทธิภาพของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่างชนิดกัน มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่แตกต่างกัน (Abdolali et al., 2014; Bhatnagar et al., 2015; Gautam et al., 2014) นักวิจัยบางกลุ่มรายงานว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นเองให้ผลผลลัพธ์ค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Afroze & Sen, 2018) ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์นั่นเอง ความสามารถในการดูดซับสูงของถ่านกัมมันต์นั้น เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของรูพรุนที่อยู่ภายในของมัน เช่น พื้นที่ผิวของรูพรุน (pore surface area) ปริมาตรของรูพรุน (pore volume) และการกระจายขนาดรูพรุน (pore size distribution) หากพิจารณาข้อมูลจากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า สภาวะและเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกันของแต่ละกลุ่มนั้น ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ดังนั้นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ น่าศึกษาค้นคว้าและพัฒนากันต่อไป เพื่อเป็นการระดมองค์ความรู้ต่าง ๆ เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่เราสนใจ เพื่อให้ได้แนวทางในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีราคาถูก แต่มีประสิทธิภาพการดูดซับสารเป้าหมายสูง อีกทั้งสามารถผลิตและนำมาใช้เองได้อย่างแพร่หลายต่อไป

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจและพัฒนารวมวิธีในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยนักวิจัยเหล่านั้นได้นำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมากมาย หลากหลายชนิดมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา คาร์บอนไอซ์วอดูดิบให้กลายเป็นถ่าน การเลือกใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ เป็นตัวกระตุ้น ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีลักษณะและคุณสมบัติพื้นฐานที่

แตกต่างกันไป โดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับเป้าหมายของผู้เตรียมถ่านกัมมันต์ว่าต้องการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นมาไปดูดซับโลหะหนักหรือสารที่ไม่พึงประสงค์ชนิดใด ดังนั้นการเตรียมถ่านกัมมันต์จึงต้องศึกษา พัฒนาวิธีการเตรียมให้เหมาะสมเป็นกรณีไป

ตัวอย่างเช่น ในปี 2007 Chandra และคณะ (Chandra, Mirna, Sudaryanto, & Ismadji, 2007) ได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน (Durian shell) เพื่อใช้ในการกำจัดเมทิลีนบลู (methylene blue) ออกจากสารละลายน้ำ ซึ่งเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยมีการเผากระตุ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้การไหลเวียนของแก๊สไนโตรเจนที่อัตรา 150 cm<sup>3</sup>/min อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ KOH : Durian shell คือ 1 : 2 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้ มีค่าพื้นที่ผิว (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 แต่ได้ทำการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิต่างๆ 6 ค่า คือ 400 - 650 °C โดยเพิ่มขึ้นทีละ 50 °C และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมี (KOH) ต่อวัตถุดิบ (durian shell) เป็น 1:4, 1:2 และ 1:1 เพื่อหาสภาวะที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงสุด ผลปรากฏว่าที่อัตราส่วนสารเคมี (KOH) ต่อวัตถุดิบ (durian shell) เป็น 1:4 เกิดรูพรุนแบบ microporous แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารเคมี (KOH) ต่อวัตถุดิบ (durian shell) เป็น 1:2 และ 1:1 ซึ่งหมายถึงการเพิ่มอัตราส่วนการซึมผ่านของสารกระตุ้น (impregnation ratio) จะทำให้เกิดรูพรุนแบบ mesoporous เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้พวกเขาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 ไปเป็น 500 °C ผลปรากฏว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มี BET surface area เพิ่มขึ้น โดยที่ 500 °C มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด ในงานวิจัยนี้เขายังชี้แนะเพิ่มเติมไว้ว่า KOH ไม่เพียงแต่ทำให้เกิดรูพรุนแบบ microporous เท่านั้นแต่ยังสามารถทำให้รูพรุนเปลี่ยนจาก microporous ไปเป็น mesoporous ได้อีกด้วย และพวกเขาได้สรุปว่า อัตราส่วนของ KOH : Durian shell ที่เหมาะสมคือ 0.5 และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนได้ดีที่สุดคือ 500 °C ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มเดียวกันกับผลของการทดลองของ Mohammed Danish และคณะ รายงานไว้เมื่อปี 2014 (Danish, Hashim, Ibrahim, & Sulaiman, 2014)

Mohammed Danish และคณะ (Danish et al., 2014) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากเมล็ดอินทผลาล์ม (date stone) โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) โดยในงานวิจัยของพวกเขาได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดอินทผลาล์ม จากนั้นพวกเขาได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของถ่านกัมมันต์ โดยวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วย X-ray diffraction (XRD) การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันนัลกรุปบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy วัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคด้วย BET surface area และดูโครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค SEM จากการศึกษาครั้งนี้พวกเขาได้พบว่า ความเข้มข้นของสารที่กระตุ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นหรือเผาคาร์บอนไนซ์นั้น ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ พื้นที่ผิว และผลผลิตของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นนั้น เขาใช้เวลาการกระตุ้นคงที่ที่ 120 นาที เนื่องจากการศึกษาของพวกเขาก่อนหน้านี้ได้พบว่า เวลาที่ใช้ในการเผาคาร์บอนไนซ์ที่นานเกิน 45 นาที ถึง 120 นาที ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและลักษณะของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แต่อย่างใด นอกจากนี้แล้วพวกเขายังพบว่า ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ความเข้มข้นของกรด  $H_3PO_4$  50% (8.674 mol/L) ที่อุณหภูมิกระตุ้น 900 °C ซึ่งพื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้นจาก 216  $m^2/g$  ถึง 1214  $m^2/g$  เมื่อเข้มข้นของกรด  $H_3PO_4$  เพิ่มขึ้นจาก 1.7% (0.298 mol/L) ถึง 50% (8.674 mol/L) ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษานี้ได้แสดงแนวโน้มเดียวกันกับผลการศึกษาวิจัยในอดีตของ Vernersson และคณะ ในปี 2002 และสอดคล้องกับผลงานวิจัยในปี 2008 ของ Gratuato พร้อมคณะ (Gratuato, Panyathanmaporn, Chumnanklang, Sirinuntawittaya, & Dutta, 2008; Vernersson, Bonelli, Cerrella, & Cukierman, 2002) โดยที่ Vernersson และคณะ นั้นเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีรายงานอื่นๆอีกมากมายเกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลที่ยังมีได้กล่าวถึงในที่นี้

ในปี 2008 นักวิจัยชาวอินโดนีเซีย Prahaz และทีมงานของเขา (Prahaz, Kartika, Indraswati, & Ismadji, 2008) ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกขนุน โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ผลจากการวิเคราะห์ปรากฏว่าการเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 °C ไม่มีรูพรุนเกิดขึ้นเลย จะเกิดรูพรุนบนถ่านกัมมันต์เมื่อเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 450 °C และ 550 °C ทำให้เกิดรูพรุนได้ดี และเขาได้สรุปว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ โดยให้อัตราการซึมผ่าน (impregnation ratio) เท่ากัน ทำให้จำนวนหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนพื้นผิวลดลงในขณะที่หมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบสบนผิวของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งจุดนี้ก็จะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันไป

สำหรับกรณีของการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวนั้น มีรีวิวนงานวิจัยที่น่าสนใจในปี 2010 ซึ่งทำการรีวิวโดย Bhatnagar และทีมงานนั้น (Bhatnagar, Vilar, Botelho, & Boaventura, 2010) แสดงให้เห็นว่าได้มีการศึกษาวิจัยจำนวนมากที่เตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและส่วน

อื่นๆของมะพร้าว เพื่อนำไปดูดซับโลหะต่างๆในน้ำ ซึ่งจากผลงานวิจัยของ Bhatnagar และคณะ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการและเงื่อนไขต่างๆในการเตรียมที่แตกต่างกัน นำไปสู่ความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันไป

ตัวอย่างการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา เช่น กรณีของ Kalderis และคณะ (Kalderis et al., 2008) ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จาก แกลบและชานอ้อยด้วยวิธีการแบบขั้นตอนเดียว โดยการนำวัสดุดิบมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 700 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาวัสดุทั้งสองชนิด คือ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีน้ำมันดินมากขึ้นและรูพรุนหรือโพรงของถ่านจะเกิดการยุบตัวทำให้ถ่านมีพื้นที่ผิวลดลง ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) จะมีพื้นที่ผิวสูงสุด โดยที่ถ่านกัมมันต์จากแกลบมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 750 ตารางเมตรต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 674 ตารางเมตรต่อกรัม

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาจำนวนมาก ทำให้สรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชีวมวลชนิดต่างๆ โดยส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับชนิดของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์ สารเคมีที่นำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นต้องเลือกให้เหมาะสมกับเป้าหมายที่ต้องการ ความเข้มข้นของสารเคมี และสุดท้ายก็คืออุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์จะต้องเลือกเหมาะสม

## 1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เป็นที่ทราบทั่วกันว่าพื้นที่ 3 ใน 4 ส่วนของโลกคือน้ำ น้ำมีความสำคัญต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตบนโลกเป็นอย่างยิ่ง เราทุกคนบนโลกนี้ใช้ประโยชน์จากน้ำทั้งด้านอุปโภคและบริโภค การคมนาคมและสัญจร การขนส่งสินค้าทางน้ำ การเพาะปลูกทางการเกษตร การเลี้ยงสัตว์ และอื่นๆอีกมากมาย รวมทั้งการใช้น้ำในการประกอบกิจการต่างๆทั้งในภาครัฐและภาคอุตสาหกรรม ซึ่งล้วนแต่เป็นสาเหตุของการเกิดมลพิษทางน้ำ (water pollution) ได้ทั้งนั้น หากมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อย ซึ่งหลายครั้งก็เป็นข่าวให้เห็นอยู่บ่อยๆ น้ำเสียจากบางแหล่ง เช่น จากโรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งมีการปนเปื้อนของโลหะ อาทิเช่น ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าในบรรดาโลหะเหล่านี้ โลหะบางชนิดแม้ว่าจะได้รับในปริมาณเพียงน้อยนิดก็เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ อาทิเช่น ตะกั่ว หากมนุษย์ได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลให้สมองทำงานบกพร่อง สติปัญญาเสื่อมถอย ร่างกายไม่เจริญเติบโต คนที่ได้รับแคดเมียมมากเกินไปจะเป็นโรคอิไต-อิไต เป็นต้น ดังนั้นการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง วิธีการจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้น มี

หลายวิธีด้วยกัน เช่น การตกตะกอนทางเคมี การออสโมซิสย้อนกลับ การสกัดด้วยตัวทำละลาย การกรองผ่านเมมเบรน และการแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนี้วิธีดังกล่าวข้างต้นแล้ว การดูดซับ (Adsorption) ยังเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย และเวลาที่ใช้ในการบำบัดค่อนข้างสั้น ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยจำนวนมากไม่ยอมมุ่งเน้นที่จะพัฒนาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่ง “ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon; AC)” เป็นตัวดูดซับอีกตัวหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีราคาค่อนข้างแพง (Foo & Hameed, 2011) ซึ่งอาจจะไม่เป็นการประหยัดหากนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural wastes) เพื่อเป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำกว่าจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่างชนิดกัน ก็มีประสิทธิภาพการดูดซับที่แตกต่างกัน (Chandra et al., 2009) ขึ้นกับวัตถุดิบ (Raw materials) ที่นำมาทำถ่านกัมมันต์ โดยปกติถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้จาก 2 วิธีที่แตกต่างกัน คือ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ก็ยังคงดำเนินการศึกษาค้นคว้าและพัฒนากันไป โดยสังเกตได้จากผลงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่ออกมาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยหลากหลายกลุ่มและหลายประเทศ ซึ่งบ่งบอกถึงทิศทางที่หลากหลาย ๆ ประเทศสนใจได้เป็นอย่างดี อีกมุมหนึ่งเรามองว่า การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับสารต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากประเทศไทยเราก็คือประเทศเกษตรกรรม ซึ่งในแต่ละปีก็มีผลผลิตจากการเกษตรหลาย ๆ อย่างที่มีวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก วัสดุบางอย่างไม่ก่อให้เกิดประโยชน์เลยก็มี อีกทั้งยังกลายเป็นขยะสร้างปัญหาให้กับชุมชนและสังคมอีกด้วย รัฐบาลต้องสูญเสียเงินงบประมาณในการบริหารจัดการในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก ซึ่งพบเห็นได้เรื่อย ๆ จากการรายงานข่าวในทุก ๆ วันนี้ ดังนั้น การศึกษาวิจัยและพัฒนา เพื่อนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้กลับมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ก็เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

จากข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับการผลิตสินค้าเกษตรของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่าในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกของไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี ตราด ระยอง และชลบุรี มีรายงานว่าเป็นแต่ละปี มีผลผลิตผลไม้ เช่น ทุเรียน มังคุด มะพร้าว เงาะ ลองกอง สละ กล้วย และอื่น ๆ ในปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตามในบรรดาผลไม้เหล่านี้ วัสดุเหลือทิ้งจากทุเรียน มังคุด และมะพร้าวผลแก่ เป็นสิ่งที่ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำมาศึกษาในครั้งนี้ เนื่องจากมีปริมาณมากกว่าผลไม้อื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ปริมาณผลผลิตทุเรียน มะพร้าวผลแก่ และมังคุด ในเขตพื้นที่ภาคตะวันออก และผลผลิตรวมทั้งประเทศ ช่วงปี พ.ศ. 2557-2562

ปี พ.ศ.	ผลผลิตในเขตพื้นที่ภาคตะวันออก			ผลผลิตรวมทั้งประเทศ		
	ทุเรียน (ตัน)	มะพร้าว ผลแก่ (ตัน)	มังคุด (ตัน)	ทุเรียน (ตัน)	มะพร้าว ผลแก่ (ตัน)	มังคุด (ตัน)
2557	350,338	109,648	145,336	631,773	1,010,033	289,374
2558	338,755	108,723	115,658	601,017	1,000,320	199,911
2559	278,300	93,857	98,419	512,451	904,094	187,367
2560	423,817	70,981	154,642	663,123	842,126	209,880
2561	405,094	79,595	73,815	759,828	856,920	184,583
2562	497,396	68,773	180,213	1,017,097	788,178	351,760

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าผลผลิตของทุเรียน มังคุด และมะพร้าวผลแก่ในเขตภาคตะวันออก โดยเฉลี่ยแล้วคิดเป็น 55% 54% และ 10% ของผลผลิตรวมทั้งประเทศ ตามลำดับ อีกทั้งผลไม้เหล่านี้ ยังเป็นผลไม้ที่ขึ้นชื่อเป็นอันดับต้น ๆ ของภูมิภาคตะวันออก โดยจังหวัดจันทบุรี เป็นจังหวัดที่มีผลผลิตของทุเรียนและมังคุดมากที่สุดเป็นอันดับที่หนึ่งในทุก ๆ ปี ส่วนจังหวัดที่มีผลผลิตมะพร้าวผลแก่มากที่สุดนั้นคือจังหวัดชลบุรี นอกจากนี้แล้ว ทุเรียนยังเป็นผลไม้ยอดนิยมอีกด้วย ทุเรียนได้รับการขนานนามว่าเป็น “ราชาของผลไม้ (King of fruit)” มังคุดเองก็เป็น “ราชินีของผลไม้ (Queen of fruit)” และกะลามะพร้าวได้มีรายงานว่าได้นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ทางการค้าแล้ว (Cazetta et al., 2011; Kamchai Nuithitikul, Sarawut Srikhun, & Samorn Hirunpraditkoon, 2010) จึงนำกะลามะพร้าวมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบในงานวิจัยชิ้นนี้ด้วย อีกทั้งผลไม้ทั้งสามชนิดนี้ เป็นผลไม้ที่มีชิ้นส่วนเหลือทิ้ง ที่ไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในปริมาณมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นเปลือกของทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว ซึ่งมีปริมาณมาก เมื่อเทียบกับผลไม้อื่น ๆ จึงเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งสำหรับการนำมาเป็นวัตถุดิบในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งผลผลิตทุเรียนและมังคุดจำนวนมากเป็นผลผลิตในเขตพื้นที่จังหวัดจันทบุรี ตราด และระยอง นอกจากการรับประทานผลสดและส่งออกไปยังพื้นที่อื่น ๆ แล้ว ยังมีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อย่างอื่นในพื้นที่อีกด้วย เช่น การทำทุเรียนทอด ทุเรียนกวน ท็อปปิ้งทุเรียน น้ำมังคุด ท็อปปิ้งมังคุด น้ำกะทิ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์บางอย่างเป็นของฝากที่ขึ้นชื่อของพื้นที่ตะวันออกเลยทีเดียว ผลผลิตมะพร้าวผลแก่ส่วนมากอยู่ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี รองลงมาเป็นฉะเชิงเทรา เมื่อนำผลไม้เหล่านี้มาบริโภค หรือทำการแปรรูปมะพร้าวผลแก่แล้ว สิ่งที่เหลือคือ เปลือกและกะลา ซึ่งมีปริมาณเยอะมาก บางครั้งก็ถูกทิ้งเป็น

ขยะเหลือทิ้งจากการเกษตรที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสังคมและสภาพแวดล้อมตามมาภายหลังได้ เมื่อถูกปล่อยให้เน่าก็จะส่งกลิ่นเหม็น เป็นแหล่งเพาะพันธุ์แมลงวันและแพร่กระจายของเชื้อโรค ต้องเสียงบประมาณแผ่นดินในการกำจัดขยะเหล่านี้ อย่างไรก็ตามขยะที่เกิดจากผลไม้เหล่านี้ ได้มีรายงานว่าสามารถนำไปทำให้เกิดประโยชน์ได้บ้าง เช่น นำไปผลิตถ่านที่ใช้ในหุงต้ม หรือเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นตัวดูดซับสารต่าง ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมได้ (Chandra et al., 2009; Foo & Hameed, 2011; Jabal, Seok, & Hoon, 2016; K. Nuithitikul, S. Srikhun, & S. Hirunpraditkoon, 2010; Yahya et al., 2015)

ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีความสนใจเป็นอย่างยิ่งที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากผลไม้ทั้งสามชนิด ได้แก่ เปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว มาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ และศึกษาแนวทางการนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับน้ำเสีย โดยศึกษาการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด ได้แก่ ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในสารละลายน้ำ

### 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

#### วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี
2. เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างรูพรุนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว
3. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (Cu และ Pb) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว
4. เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก (Cu และ Pb) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว เช่น ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ระยะเวลาในการดูดซับ ปริมาณถ่านกัมมันต์ และพีเอช

#### ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่พบมากในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย ได้แก่ เปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว โดยทำการเก็บตัวอย่างเปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด จากตลาดผลไม้เนินสูง ตำบลเนินสูง อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี และเก็บตัวอย่างกะลามะพร้าวจากตลาดนัดจันทร์สวัสดิ์ ตำบลคลองขุด อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุปทฤษฎี และ/หรือ แนวทางความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

### 1.4.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีรูพรุนขนาดเล็ก อยู่ภายในเป็นจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์เกิดจากการนำเอาวัตถุดิบจากธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็น องค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ แล้วทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุน และมีพื้นที่ผิว ภายผิวจำเพาะภายในสูงขึ้น ซึ่งโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยถ่านกัม มันต์นั้นจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก 87 - 90 เปอร์เซ็นต์ และมีธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบด้วย ปริมาณที่พบจะมีมากหรือน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับ วัตถุดิบ นอกจากนี้แล้ว ธาตุเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้อีกในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันผลิตสามารถผลิตถ่านออกมาได้หลายรูปแบบ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของ ถ่านกัมมันต์ตามลักษณะทางกายภาพ ได้ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powdered activated carbon; PAC) ถ่านกัมมันต์ที่ถูกบดจนมี ขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร) ไม่น้อย กว่าร้อยละ 99

2. คาร์บอนแบบเกล็ดหรือเม็ด (Granular activated carbon; GAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ด หรือเป็นถ่านกัมมันต์แบบผงที่นำมาเติมตัวประสานแล้วถูกอัดเป็นเม็ด

3. ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (Extruded activated carbon) เป็นถ่านที่นำมาขึ้นรูปเป็น แท่งทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.8-55 มิลลิเมตร

4. ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (Impregnated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่ได้ เติมโมเลกุลสารอนินทรีย์ลงไปโครงสร้าง เช่น โลหะเงิน ไอโอดีน ไอออนบวกจำพวก อะลูมิเนียม (Al) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) ลิเทียม (Li) แคลเซียม (Ca) เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีรูพรุนขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 20,000 อังสตรอม โดยปกติ วัสดุรูพรุน สามารถจำแนกขนาดรูพรุนได้เป็น 3 ประเภท ตามข้อกำหนดของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และ เคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry; IUPAC) ดังนี้

1. ไมโครพอร์ส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร (width < 2 nm)

2. เมโซพอร์ส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร (width = 2-50 nm)

3. แมคโครพอร์ส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโน เมตร (width > 50 nm)

เนื่องจากวิธีการเตรียมที่แตกต่างกันขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จึงมีความแตกต่างกัน จากคุณสมบัติของรูพรุนที่อยู่ภายในของถ่าน เช่น พื้นที่ผิวของรูพรุน (pore surface area) ปริมาตรของรูพรุน (pore volume) และการกระจายขนาดรูพรุน (pore size distribution) ทำให้ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสูงมาก จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อกำจัดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ออกจากแก๊สและของเหลว ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์ หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี เหมาะสมแก่การใช้งาน และมีราคาไม่แพงมาก ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

#### 1.4.1.1 วัตถุดิบสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้น จะต้องมีการบดเป็นองค์ประกอบ โดยอาจเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติ หรือจากการสังเคราะห์ก็ได้ วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม คือ ถ่านพีท ถ่านหิน ถ่านลิกไนต์ และไม้ เนื่องจากให้ผลผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ ควรเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง มีราคาถูก และหาได้ง่าย มีคุณสมบัติคงที่

#### 1.4.1.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากชีวมวล ส่วนใหญ่ผลิตโดยกระบวนการ 2 ขั้นตอน ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** เป็นการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านคาร์บอน หรือที่เรียกว่า “การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)” เป็นการเผาเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนและสร้างรูพรุนเริ่มต้น กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นการไพโรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นในที่ไม่มีอากาศ ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากระหว่างการเผาคาร์บอนไนเซชันจะเริ่มมีการสร้างโครงสร้างของรูพรุนเริ่มต้น ธาตุและองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่าง ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของแก๊สและน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ถ่านคาร์บอนซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ มีทาร์อุดอยู่ในช่องว่างระหว่างโครงผลึก ทำให้ส่วนประกอบของถ่านคาร์บอนที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และคาร์บอนต่อออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- (1) การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างในช่วงอุณหภูมิ 27-197 องศาเซลเซียส
- (2) การไพโรไลซิสโดยการเกิดแก๊สและน้ำมันทาร์ในโครงสร้าง ในช่วงอุณหภูมิ

197 - 497 องศาเซลเซียส

(3) การเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านคาร์บอน โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบ จะลดลงไปมากในช่วงอุณหภูมิ 497-847 องศาเซลเซียส

**ขั้นตอนที่ 2** คือกระบวนการกระตุ้น (Activation process) เพื่อเพิ่มโครงสร้างรูพรุนของ ตัวดูดซับ (Ahmed, 2016; Maneerung et al., 2015) ทำให้ถ่านคาร์บอนมีความสามารถในการ ดูดซับสูงขึ้น มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพิ่มขึ้น โดยทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจในการดูดซับขึ้นมาแทน อีกทั้งยังเป็นการกำจัดอินทรีย์ หรืออนินทรีย์วัตถุ ต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ทำได้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี มีรายละเอียดดังนี้

**1. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)** เป็นวิธีการเพิ่มปริมาณ รูพรุนและพื้นที่ผิว โดยเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ด้วยแก๊สในช่วงอุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส แก๊สที่ใช้โดยทั่วไป คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ โดยอาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือแก๊ส ผสมก็ได้ ซึ่งคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สที่ใช้ในการกระตุ้น แล้วเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แพร่ออกจากผิวของถ่านคาร์บอน การเกิดแก๊สซิฟิเคชันจะทำให้บางส่วนของเม็ดถ่านคาร์บอนเกิดเป็น รูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่านคาร์บอน หลังจากการคาร์บอนเซชันจะได้คาร์บอนที่ประกอบไปด้วยรู พรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งรูพรุนนี้มักจะถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูก ขวางด้วยคาร์บอนอสัณฐาน การกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิดเอาไว้และเป็นการสร้างรูพรุน ขึ้นมาใหม่ กระบวนการกระตุ้นในทางกายภาพนี้อาจมีกระบวนการผลิตที่ต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับ ลักษณะของวัตถุดิบตัวอย่าง

**2. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)** เป็นกระบวนการกระตุ้นโดย ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น สารเคมีที่ถูกนำมาใช้ส่วนใหญ่จะเป็นสารละลายกรด หรือเกลือของโลหะ เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมซัลเฟต โพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น โดยนำวัตถุดิบหรือถ่านคาร์บอนไปแช่ในสารเคมีก่อนนำไปเผากระตุ้น วัตถุดิบหรือถ่าน คาร์บอนจะดูดซับเอาสารละลายนั้น เข้าไปแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนบนผิววัตถุดิบหรือถ่านคาร์บอน เมื่อนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิสูงประมาณ 450-900 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของสารประกอบ เหล่านั้นเป็นแก๊สระเหยออกไป ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมาก การกระตุ้นทางเคมีมีข้อได้เปรียบที่สำคัญ สองประการ ประการที่หนึ่งคือ เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการกระตุ้นทางกายภาพ และ ประการที่สองคือ ผลผลิตคาร์บอนจากการกระตุ้นทางเคมีมีแนวโน้มสูงกว่าวิธีอื่น ทำให้เกิดรูพรุนใน ถ่านกัมมันต์มากขึ้น แต่การกระตุ้นทางเคมีมีข้อเสียคือ สารเคมีที่ใช้มีราคาแพง การล้างเอาสารเคมีที่ ตกค้างออกทำได้ยาก และอาจเป็นพิษต่อร่างกาย

#### 1.4.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการดูดซับ คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยแรงกระทำดังกล่าวแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ แรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี เพราะฉะนั้นกระบวนการการดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับดังนี้

**1.4.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)** คือ การดูดหรือการดึงตัวถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วของตัวถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ แรงดึงดูดระหว่างประจุของตัวถูกดูดซับ (ไอออน) กับประจุบนผิวตัวดูดซับ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เป็นต้น ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ เกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิต่ำ และจะเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่าง ๆ ในตู้เย็น และในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน และเรียกรูปการดูดซับแบบนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)”

**1.4.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)** คือ การเกิดพันธะทางเคมี หรือการใช้ข้อเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นการดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูง ๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่บนผิวของตัวดูดซับการดูดซับทางเคมีนี้จึงเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น และเรียกรูปการดูดซับประเภทนี้ว่าการดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

**1.4.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ** อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

**1.4.3.1 ความปั่นป่วน** อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับแผ่นการแพร่ หรือรูพรุนการแพร่ ถ่านน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ फिल्मน้ำที่ล้อมรอบคาร์บอนจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาคาร์บอน ซึ่งแผ่นการแพร่จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ่านน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา และทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาคาร์บอนได้เร็ว ส่วนรูพรุนการแพร่จะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ดังนั้นอัตราเร็วในการดูดซับของคาร์บอนแบบผงจึงขึ้นอยู่กับรูพรุนการแพร่

เพราะระบบคาร์บอนแบบผงมักมีความปั่นป่วนสูง แต่อัตราเร็วในการดูดซับของคาร์บอนแบบเกร็ดมักขึ้นอยู่กับแผนการแพร่

**1.4.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของคาร์บอน** คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของคาร์บอนคือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของคาร์บอนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคือ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของคาร์บอน ดังนั้นคาร์บอนแบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด ส่วนพื้นที่ผิวของคาร์บอนนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมสามารถดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของคาร์บอนได้มาจากช่องว่างหรือโพรงภายใน

**1.4.3.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของคาร์บอน** เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้ ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดซับ สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจึงสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ง่าย ซึ่งในทางตรงกันข้าม การดูดซับอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ซึ่งไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำเป็นอย่างไร

**1.4.3.4 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของคาร์บอน** ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญต่อการดูดซับมาก โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของคาร์บอน จากการวิจัย พบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย เพราะแรงดึงดูดระหว่างสารและคาร์บอนจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจะถูกดูดเข้าไปเช่นเดียวกัน

**1.4.3.5 ค่าพีเอช** ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และการละลายน้ำของสารต่างๆ จึงทำให้มีผลกระทบต่อ การดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนก็สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี

**1.4.3.6 อุณหภูมิ** อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มของอุณหภูมิ และอัตราเร็วลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ

**1.4.3.7 ระยะเวลาในการดูดซับ** ระยะเวลาจะต้องมีมากพอที่การดูดซับนั้นจะเข้าสู่สภาวะสมดุล

#### 1.4.4 สมดุลของการดูดซับ

การวิเคราะห์สมดุลของการดูดซับ อาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในเฟสของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนเฟสของแข็ง ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เขียนเป็นกราฟไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งอธิบายถึงการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างเฟสของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับนั้นอ่อนลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับต่อไปได้ก่อให้เกิดเป็นชั้นที่สอง สาม และสี่ต่อไปเรื่อย ๆ หรืออาจจะมีการดูดซับชั้นที่สองก่อนชั้นแรกจะเต็มและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

สมการที่นำมาใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของกระบวนการดูดซับมีหลายกระบวนการ โดยเฉพาะในระบบของเหลว-ของแข็ง ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช และไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Foo & Hameed, 2010)

**1.4.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)** ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิชนิยมใช้มาก เนื่องจากมีความถูกต้องสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีการดูดซับที่เข้ากับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจาง สมการแสดงความสัมพันธ์เป็นดังนี้

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

โดยที่  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$K_F$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)

$n$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\ln(q_e) = \ln(K_F) + 1/n \ln(C_e) \quad (2)$$

เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln C_e$  กับ  $\ln q_e$  จะสามารถหาค่า  $1/n$  และ  $\ln K_F$  ได้จากความชันและจุดตัดแกน  $y$  ตามลำดับ



จากสมการการดูดซับแบบฟรอยด์ลิช ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\ln C_e$  กับ  $\ln q_e$  ถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก (ค่า  $n$  น้อย) แสดงว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ หรือการดูดซับเกิดได้ไม่ดีที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ โดยทั่วไปถ้าแก๊สมีมันต์ที่ให้ค่าความชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง

#### 1.4.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานบนพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ คือ

1. โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
2. มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดซับ
3. ชั้นของบริเวณดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
4. พลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

โดยที่  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $q_m$  คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $K_L$  คือ ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

จากสมการที่ (3) เมื่อจัดรูปใหม่ ได้สมการที่ (4)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $C_e$  กับ  $C_e/q_e$  จะให้เห็นว่า ค่าความชันเท่ากับ  $1/q_m$  และค่าจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/K_L q_m$

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี รวมทั้งได้เรียนรู้และเข้าใจปัญหาต่างๆ เกี่ยวกับการเตรียมถ่านกัมมันต์แบบดั้งเดิม เพื่อที่จะสามารถนำไปต่อยอดหาวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ง่าย ประหยัด และเตรียมได้ในปริมาณมากต่อไป
2. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว และทราบกระบวนการเตรียมที่เหมาะสมบนพื้นฐานการประยุกต์ใช้วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. สามารถใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว กำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียได้
4. สามารถนำเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว ที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหล่านี้

(2)

## เนื้อเรื่อง (Main body)

### 2.1 วิธีดำเนินการวิจัย (Materials & Method)

#### 2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาเผาอุณหภูมิสูงของบริษัท เพอร์เนส ดีไซน์ จำกัด อ.แม่ทะ จ.ลำปาง
2. หม้อปั้นดินเผา จากร้านค้า ณ ต.หนองสองห้อง อ.เมือง จ.หนองคาย
3. หม้อปั้นดินเผา จากร้านค้า ณ ต.ด่านเกวียน อ.โชคชัย จ.นครราชสีมา
4. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) รุ่น Spectr AA 220 Z บริษัท Varian; ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เตาเผา (Furnance) รุ่น RBF 1100 บริษัท Carbolite; ประเทศอังกฤษ
6. ตู้อบ (Hot air oven) รุ่น Modet 600 บริษัท Memmert
7. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Analytical balance) รุ่น AG 245 บริษัท Mettler Toledo
8. เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Shaker water bath) รุ่น Vision บริษัท Scientific; ประเทศเยอรมันนี
9. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
10. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
11. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 100 250 500 และ 1000 mL
12. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmayer flask) ขนาด 150 และ 250 mL
13. กระจกตวง (Cylinder)
14. ปิเปต (Pipet)
15. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
16. ขวดฉีดน้ำกลั่น (Bottle wash)
17. กระดาษกรอง (Filter Papers)
18. กรวยกรอง (Funnel)
19. ช้อนตักสารพลาสติก (Spoon)
20. โถดูดความชื้น (Desiccator)
21. ครกหิน สำหรับบดถ่าน
22. โกร่งบดสาร (A mortar and pestle)
23. กระดาษฟอยล์ (Aluminium foil)
24. หลอดหยด (Dropper)
25. แท่งแก้วคนสาร (Stirring Rod)

26. ขวดสีชา (Amber bottle)
27. นาฬิกาจับเวลา
28. ตะแกรงร่อนคัดแยกขนาด 60 Mesh
29. ปากกาเขียนเครื่องแก้ว
30. สติกเกอร์กระดาษ (Paper sticker)

### 2.1.2 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Lead standard solution)
2. สารละลายมาตรฐานทองแดง (Copper standard solution)
3. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH)
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH)
5. กรดไนตริก (Nitric acid;  $\text{HNO}_3$ )
6. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid (HCl))
7. สารละลายน้ำแข็ง
8. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) เข้มข้น 0.100 นอร์มอล
9. สารละลายมาตรฐานไอโอดีน ( $\text{I}_2$ ) เข้มข้น 0.100 นอร์มอล
10. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
11. สารโพแทสเซียมไอโอเดต ( $\text{KIO}_3$ )
12. โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
13. น้ำกลั่น
14. ดินเหนียว

### 2.1.3 วัสดุดิบ

1. กะลามะพร้าว
2. เปลือกทุเรียน
3. เปลือกมังคุด

### 2.1.4 วิธีการทดลอง

#### 1. การเก็บตัวอย่าง

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างเปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด จากตลาดผลไม้เนินสูง ตำบลเนินสูง อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี และเก็บตัวอย่างกะลามะพร้าวจากตลาดนัดจันทร์สวรรค์ ตำบลคลองขุด อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี

## 2. การเตรียมตัวอย่างกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด

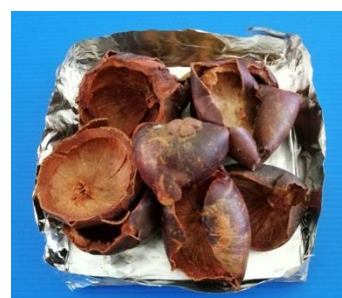
ทำความสะอาดภายนอกของกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด จากนั้นตัดเปลือกทุเรียน และกะลามะพร้าวเป็นชิ้นๆ แต่ละชิ้นยาวประมาณ 4-5 เซนติเมตร จากนั้นล้างทำความสะอาดเปลือกด้วยน้ำประปาให้สะอาด นำไปผึ่งแดดให้แห้ง โดยใช้เวลาในการตากแดด 2 วัน ดังรูปที่ 1 หลังจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่เหลืออยู่ในเปลือกอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำนั่นเอง อบเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ และเก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกมัดด้วยยางให้แน่น



(ก)



(ข)

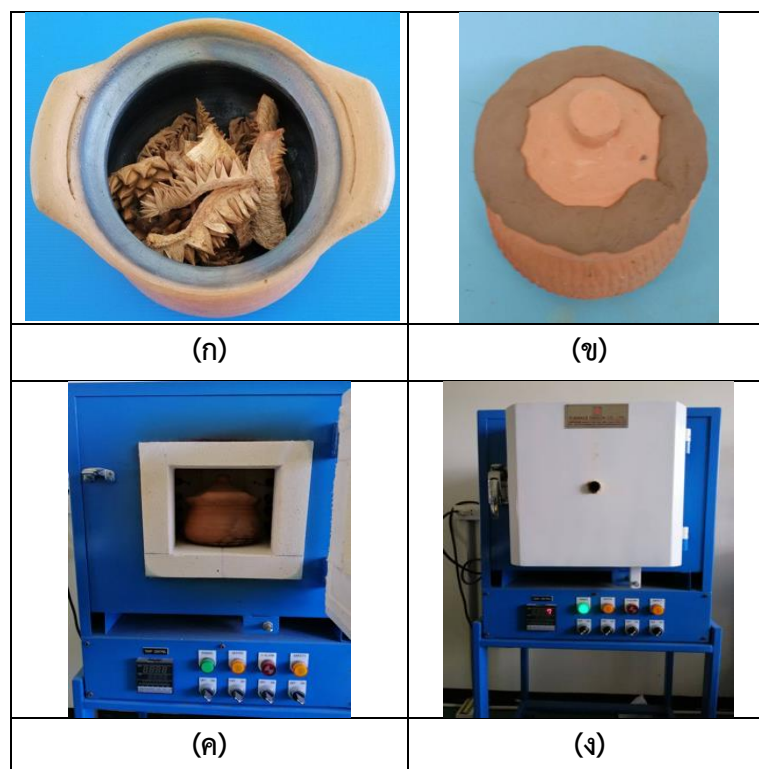


(ค)

รูปที่ 1 ตัวอย่าง (ก) เปลือกกะลามะพร้าว (ข) เปลือกทุเรียน และ (ค) เปลือกมังคุด ที่ผ่านการตากแห้งด้วยแสงแดดเป็นเวลา 2 วัน

## 3. การเตรียมถ่าน โดยการเผาคาร์บอนในเซชัน (Carbonization)

ชั่งน้ำหนักกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุดที่ผ่านการอบแล้ว บรรจุในหม้อปั้นดินเผาปิดฝาแล้วปิดทับตรงรอยต่อระหว่างหม้อและฝาด้วยดินเหนียวอีกครั้ง จากนั้นนำไปเผาคาร์บอนในซีที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยทดลองเผาเป็นเวลา 30 และ 45 นาที ตามลำดับ ในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ผลิตโดยบริษัท เฟอร์เนส ดีไซน์ จำกัด ดังรูปที่ 2 ปล่อยให้เย็นลงแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำถ่านที่ได้ไปบดและร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 60 เมท (ประมาณ 0.25 มิลลิเมตร) แล้วเก็บตัวอย่างไว้ในโถดูดความชื้น



รูปที่ 2 ตัวอย่างการบรรจุเปลือกทุเรียนในหม้อปั้นดินเผาและเผาเป็นถ่านด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง

#### 4. การเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

นำถ่านที่ได้จากการเผาคาร์บอนแล้วผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เข้มข้น 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ผสมกับผงถ่าน 100.00 กรัม แช่ทิ้งไว้ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองและอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที แล้วปล่อยให้เย็นลง แล้วล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นอุ่น ๆ จนพีเอชของน้ำที่ล้างคงที่ แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เก็บถ่านกัมมันต์ที่ได้ไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator)

#### 5. วิเคราะห์ร้อยละเถ้าตามมาตรฐาน AOAC 1990 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

เผาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที และปล่อยให้เย็นลงในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้อง จากนั้นชั่งถ่านปริมาณ 0.5000 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อคำนวณหาร้อยละของเถ้า

## 6. การวิเคราะห์ร้อยละความชื้นตามมาตรฐาน AOAC 1990 ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

อบด้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นลงในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักด้วยกระเบื้อง จากนั้นชั่งถ่านปริมาณ 0.5000 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้อง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อคำนวณหาร้อยละความชื้น

## 7. วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D4607-94

### 1. การเตรียมสารละลาย

1.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล เตรียมโดยตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยมวล ปริมาตร 70.00 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น ปริมาตร 550 มิลลิลิตร แล้วคนสารละลายให้เข้ากัน

1.2 สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.100 นอร์มอล เตรียมโดยชั่งน้ำหนักโซเดียมไฮโอซัลเฟต 24.820x กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นที่ต้มจนเดือดประมาณ  $75 \pm 2.5$  มิลลิลิตร จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนตจำนวน  $0.100 \pm 0.010$  กรัม แล้วเทสารละลายผสมลงในขวดวัดปริมาตร ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 1 ลิตร จากนั้นเทสารละลายเก็บไว้ในขวดสีชา (amber bottle) อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการวิเคราะห์ (standardization) เพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอน

1.3 สารละลายมาตรฐานไอโอดีน ความเข้มข้น  $0.100 \pm 0.010$  นอร์มอล เตรียมโดยชั่งไอโอดีน 12.700x กรัม และโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.100x กรัม ค่อยผสมให้เข้ากันในปิกรเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปครึ่งละประมาณ 5 มิลลิลิตร พร้อมคนสารตลอดเวลา จนมีปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร และคนต่อเนื่องไปอีกอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จนมั่นใจว่าสารละลายได้หมด จากนั้นเทสารละลายผสมลงในขวดวัดปริมาตร ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 1 ลิตร แล้วเทสารละลายเก็บไว้ในขวดสีชา (amber bottle)

1.4 สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต ความเข้มข้น 0.1000 นอร์มอล อบสารโพแทสเซียมไอโอเดต ( $KIO_3$ ) ประมาณ 4 กรัม ที่อุณหภูมิ  $110 \pm 0.1$  °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น (Desiccator) จากนั้นชั่ง  $KIO_3$  ปริมาณ  $3.5667 \pm 0.1$  กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นประมาณ 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 1 ลิตร แล้วเทสารละลายเก็บไว้ในขวดแก้วที่มีจุกฝาแก้วปิด (glass stoppered bottle)

1.5 สารละลายแป้ง โดยชั่งแป้ง 0.25 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นที่ต้มเดือด 250 มิลลิลิตร แล้วต้มต่อไปอีกประมาณ 5 นาที คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น สารละลายแป้ง ควรเตรียมใหม่ในแต่ละวัน

1.6 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.100 นอร์มอล ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมโพแทสเซียมไอโอเดตปริมาตร 2.000x กรัม ลงไป แล้วเขย่าให้ละลาย จากนั้นปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยมวล ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตรใส่ลงไป ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายมีสีเหลืองอ่อน จากนั้นเติมสารละลายน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด เพื่อทำหน้าที่เป็นอินดิเคเตอร์แล้วไทเทรตต่ออย่างช้า ๆ จนสารละลายสีน้ำเงินของสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสมการที่ 5 ดังนี้

$$N_1 = \frac{P \times R}{S} \quad (5)$$

เมื่อ  $N_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)

R คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (N)

P คือ ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (mL)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (mL)

1.7 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนความเข้มข้น 0.100 นอร์มอล ปิเปตสารละลายไอโอดีนปริมาตร 25.00 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจนสารละลายมีสีเหลืองอ่อน จากนั้นเติมสารละลายน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ แล้วไทเทรตต่ออย่างช้า ๆ จนสีน้ำเงินของสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกผลปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายไอโอดีน จากสมการที่ 6 ดังนี้

$$N_2 = \frac{S \times N_1}{I} \quad (6)$$

เมื่อ  $N_2$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)

$N_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)

I คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (mL)

S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (mL)



### 1.8 การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

อบถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งและบันทึกน้ำหนักของถ่านตัวอย่างประมาณ 1.500x กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตรลงไป ปิดปากขวดด้วยจุกยาง แล้วเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเปิดจุกยางออก แล้วต้มจนเดือดเป็นเวลา 30 วินาที ในตู้ดูดควัน เพื่อกำจัดแก๊สหรือกัมมะถันออกจากผิวถ่าน จากนั้นปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วปิเปตสารละลายมาตรฐานไอโอดีน ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดด้วยจุกยาง แล้วเขย่าเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองเอาถ่านกัมมันต์ ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง ปิเปตสารละลายที่กรองได้ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต จนสารละลายมีสี เหลืองอ่อน จากนั้นเติมสารละลายน้ำแป้งลงไป 2-3 หยด แล้วไทเทรตต่ออย่างช้า ๆ จนสีน้ำเงินของ สารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี บันทึกผลปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ แล้วทำการทดลอง ซ้ำอีก 2 ครั้ง และทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้ทั้ง 3 ถ่านกัมมันต์ จากนั้นคำนวณปริมาณไอโอดีนที่ถูก ดูดซับต่อกรัมของถ่านตัวอย่าง (X/M) และหาความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (C) ได้จาก สมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2.2 \times B \times S)}{M} \quad (7)$$

- เมื่อ X/M คือ ปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ (mg/g)  
 $N_2$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)  
 $N_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)  
 A คือ  $N_2 \times 12693.0$   
 B คือ  $N_1 \times 126.93$   
 M คือ ปริมาณถ่านที่ (g)

$$C = \frac{N_1 S}{F} \quad (8)$$

- เมื่อ C คือ ปริมาณของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านที่ใช้ดูดซับ (mg/g)  
 $N_2$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (N)  
 F คือ ปริมาตรของสารละลายส่วนที่กรองแล้วนำไปใช้ในการไทเทรต (mL)  
 S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (mL)

### 8. การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วโดยวิธีกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 2.00 4.00 6.00 8.00 และ 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร จากสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโต ที่ความยาวคลื่น 283.30 นาโนเมตร และสร้างกราฟมาตรฐานโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว

### 9. การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วและระยะเวลาในการดูดซับ

เตรียมสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 20.00 30.00 และ 40.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 5.00 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายแต่ละขวด ปริมาณ 0.1000 กรัม และทำการเขย่าอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 ยี่ห้อ whatman แล้วนำสารละลายใสที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีก 12 ครั้ง โดยเปลี่ยนระยะเวลาในการดูดซับจาก 10 นาที เป็น 20 30 40 50 60 80 100 120 140 160 และ 180 นาที ตามลำดับ

### 10. การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

เตรียมสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 7 ขวด จากนั้นปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 5.00 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ลงสารละลายแต่ละขวด ปริมาณ 0.0200 0.0500 และ 0.1000 กรัม ตามลำดับ และทำการเขย่าแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปกรอง เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 ยี่ห้อ whatman แล้วนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

### 11. การศึกษาพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

เตรียมสารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด ปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 3.00 4.00 5.00 และ 6.00 ตามลำดับ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร แล้ว

เขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ลงสารละลายแต่ละขวดปริมาณ 0.1000 กรัม และทำการเขย่าแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปกรอง เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 ยี่ห้อ whatman แล้วนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

## 12. การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว

เตรียมสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 20.00 30.00 40.00 50.00 60.00 70.00 80.00 และ 90.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100.00 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และปรับพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 5.00 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายแต่ละขวดปริมาณ 0.1000 กรัม และทำการเขย่าแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 ยี่ห้อ whatman แล้วนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

ทำการทดลองซ้ำในข้อ 7 ถึง 11 โดยเปลี่ยนจากตะกั่ว (Pb) เป็นทองแดง (Cu) โดยทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้ง 3 ถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด

ส่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุดที่เตรียมได้ ตรวจวิเคราะห์ด้วยด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

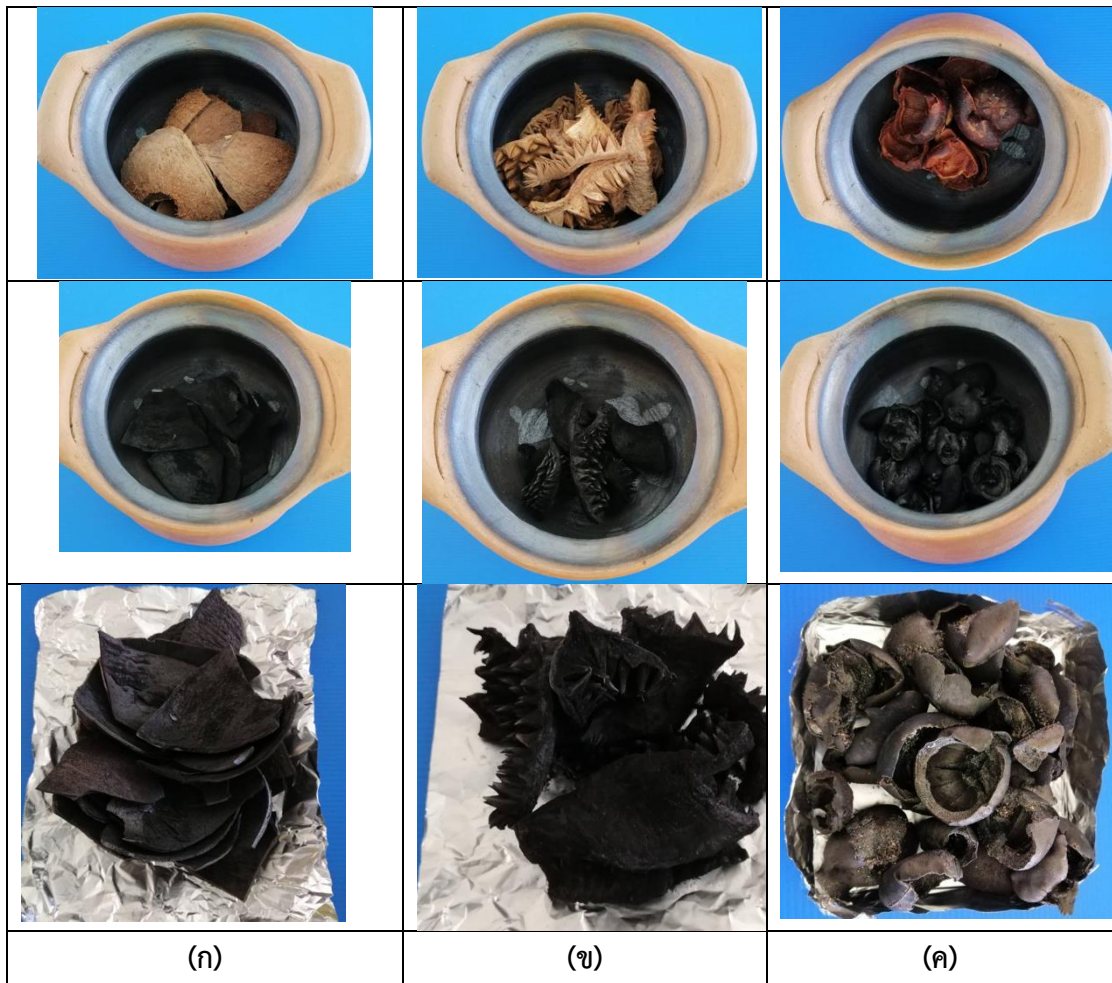
- การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR)
- วัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET)
- วิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค scanning electron microscope (SEM)

## 2.2 ผลการวิจัย (Results)

### 2.2.1 ผลการเตรียมถ่านจากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด

ในขั้นตอนแรกเป็นการเผาคาร์บอน เพื่อให้ได้ถ่านจากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าวก่อนที่จะนำไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก ที่อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการเผาคาร์บอน เพื่อเตรียมถ่านสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้คือ 500 °C เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมในอดีตที่ผ่านมาของนักวิจัยในหลายๆกลุ่ม เช่นในปี 2007 และในปี 2009 Chandra และคณะ (Chandra et al., 2007) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เพื่อใช้ในการกำจัดเมทิลีนบลูออกจากสารละลายน้ำ เป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ได้ข้อสรุปตั้งว่า การเผาคาร์บอนที่อุณหภูมิ 500 °C มีพื้นผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด และอัตราส่วนของ KOH : Durian shell ที่เหมาะสม คือ 0.5 ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มเดียวกันกับผลของการทดลองของ Danish และคณะ ซึ่งมีการรายงานไว้ล่าสุดเมื่อปี 2014 (Danish et al., 2014) นอกจากนี้ชาวอินโดนีเซีย Prahas และทีมงานของเขาในปี 2008 (Prahas et al., 2008) ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกขุ่น โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ผลจากการวิเคราะห์ปรากฏว่าการเผาคาร์บอนที่อุณหภูมิ 350 °C ไม่มีรูพรุนเกิดขึ้นเลย จะเกิดรูพรุนบนถ่านกัมมันต์เมื่อเผาคาร์บอนที่อุณหภูมิ 450 °C และ 550 °C ทำให้เกิดรูพรุนได้ดี ซึ่งอุณหภูมิที่เลือกใช้ 500 °C ก็อยู่ในช่วงนี้เช่นกัน

ในการทดลองเตรียมถ่านในครั้งแรก ผู้วิจัยไม่ได้บรรจุตัวอย่างในหม้อปั้นดินเผาก่อนนำไปเผาคาร์บอน ทำให้หลังจากการเผาคาร์บอนมีซี้เข้าสีขาวจำนวนมากกว่าถ่าน หลังจากนั้นผู้วิจัยได้พยายามค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติม และได้พบว่าน่าจะเกิดจากการที่มีอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาเผาไหม้มากเกินไปในระหว่างการเผาไหม้ เพื่อเป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ กระบวนการคาร์บอนเซชันควรเกิดขึ้นในที่ไม่มีอากาศ ซึ่งจะเห็นว่างานวิจัยหลายๆกลุ่มได้ทำการเผาคาร์บอนถ่านโดยใช้ท่อสแตนเลส ซึ่งท่อสแตนเลสเองก็มีราคาค่อนข้างสูง และในแต่ละครั้งของการเผา ก็บรรจุเปลือกตัวอย่างได้ในปริมาณที่ไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้หม้อปั้นดินเผา ซึ่งหาได้ง่ายตามพื้นที่จังหวัดหนองคายและจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก และที่สำคัญเตรียมได้ในปริมาณที่มากกว่าการใช้ท่อสแตนเลส เมื่อนำเปลือกตัวอย่างบรรจุลงในหม้อปั้นดินเผาปิดฝาและฉนวนรอยต่อระหว่างหม้อกับฝาหม้อด้วยดินเหนียวอีกครั้ง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาระหว่างการเผาไหม้ ผลปรากฏว่าสามารถแก้ปัญหาที่พบในการเตรียมถ่านครั้งแรกได้ ตัวอย่างของเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว ทั้งก่อนและหลังจากเตรียมเป็นถ่านแสดงดังรูปที่ 3 ถ่านในรูปดังกล่าว เป็นถ่านคาร์บอนที่เผาคาร์บอนที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าถ่านจากเปลือกมังคุด และกะลามะพร้าวยังไหม้ไม่หมดทุกส่วน ดังนั้นในการเผาคาร์บอนจึงเพิ่มเวลาในการเผาเป็น 45 นาที



รูปที่ 3 การเตรียมถ่านจากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด โดยการเผาคาร์บอนที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที

## 2.2.2 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด

ผลการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุดที่ได้มีลักษณะคล้าย ๆ กัน ซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำ ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกทุเรียน สำหรับร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เปลือกทุเรียน และเปลือกมังคุด แสดงดังตารางที่ 3-5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน

ตารางที่ 3 ร้อยละผลผลิตของถ่านและถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

ผลผลิต	ครั้งที่	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ร้อยละผลผลิต	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ย
ถ่าน	1	144.35	109.03	75.53	74.21
	2	150.00	109.65	73.10	
	3	142.00	105.07	73.99	
ถ่านกัมมันต์	1	50.00	41.08	82.16	81.65
	2	50.00	40.90	81.80	
	3	50.00	40.50	81.00	

ตารางที่ 4 ร้อยละผลผลิตของถ่านและถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน

ผลผลิต	ครั้งที่	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ร้อยละผลผลิต	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ย
ถ่าน	1	105.89	30.83	29.12	29.69
	2	110.45	33.67	30.48	
	3	108.73	32.04	29.47	
ถ่านกัมมันต์	1	50.00	35.00	70.00	69.83
	2	50.00	35.16	70.32	
	3	50.00	34.58	69.16	

ตารางที่ 5 ร้อยละผลผลิตของถ่านและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

ผลผลิต	ครั้งที่	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ร้อยละผลผลิต	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ย
ถ่าน	1	167.12	68.53	41.01	40.88
	2	164.58	66.75	40.56	
	3	168.05	69.04	41.08	
ถ่านกัมมันต์	1	50.00	39.00	78.00	77.34
	2	50.00	38.94	77.88	
	3	50.00	38.07	76.14	

จากตารางที่ 3-5 พบว่าการผลผลิตของถ่านและถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีร้อยละผลผลิตสูงสุด ร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของถ่านและถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเท่ากับ 74.21 และ 81.65 ตามลำดับ รองลงมาคือเปลือกมังคุด ซึ่งมีร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของถ่านและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 40.88 และ 77.34 ตามลำดับ สำหรับจากเปลือกทุเรียน มีร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของถ่านและถ่านกัมมันต์เท่ากับ 29.69 และ 69.83 ตามลำดับ จากร้อยละผลผลิตโดยเฉลี่ยของถ่านทั้ง 3 ชนิด พบว่าเปลือกทุเรียนให้ร้อยละผลผลิตต่ำที่สุด อาจเป็นเพราะว่าเปลือกทุเรียนที่แห้งแล้วเบากว่าเปลือกมังคุด และกะลามะพร้าวเป็นอย่างมาก เมื่อนำไปเผาคาร์บอน จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ของถ่านมากเกินไป ผลผลิตที่ได้จึงค่อนข้างต่ำกว่าเปลือกมังคุดและกะลามะพร้าว

### 2.2.3 ผลการวิเคราะห์ร้อยละเถ้าและความชื้นตามมาตรฐาน AOAC 1990

ผลการวิเคราะห์ร้อยละเถ้า (Ash) และความชื้น (Moisture) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว ตามมาตรฐาน AOAC แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ร้อยละเถ้าและความชื้นเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว

ถ่านกัมมันต์	ร้อยละเถ้า	ร้อยละความชื้น
เปลือกทุเรียน	15.26	6.72
เปลือกมังคุด	14.35	6.33
กะลามะพร้าว	14.07	5.68

จากตารางที่ 6 พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่าร้อยละเถ้าและร้อยละความชื้นโดยเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน เมื่อใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกัน 3 ความเข้มข้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระตุ้นที่ 400 600 และ 800 ว่าส่งผลต่อค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์อย่างไร ซึ่งผลปรากฏดังตารางที่ 7 กรณีถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด เมื่อทำการกระตุ้นด้วย 40 %w/w KOH ที่อุณหภูมิ 800 °C ส่วนถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด เมื่อทำการกระตุ้นด้วย 40 %w/w KOH ที่อุณหภูมิ 600 °C

ตารางที่ 7 ผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิของการเผากระตุ้นที่มีผลต่อค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

วัสดุที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์	ความเข้มข้นของ KOH (%w/w)	อุณหภูมิ (°C)	ค่าเลขไอโอดีน (mg/g)
กะลามะพร้าว	20	400	699
	40	400	702
	60	400	699
	20	600	695
	40	600	714
	60	600	702
	20	800	736
	40	800	761
	60	800	733
เปลือกมังคุด	20	400	696
	40	400	708
	60	400	706
	20	600	703
	40	600	693
	60	600	716
	20	800	742
	40	800	764
	60	800	763
เปลือกทุเรียน	20	400	700
	40	400	714
	60	400	698
	20	600	704
	40	600	723
	60	600	707
	20	800	708
	40	800	703
	60	800	703

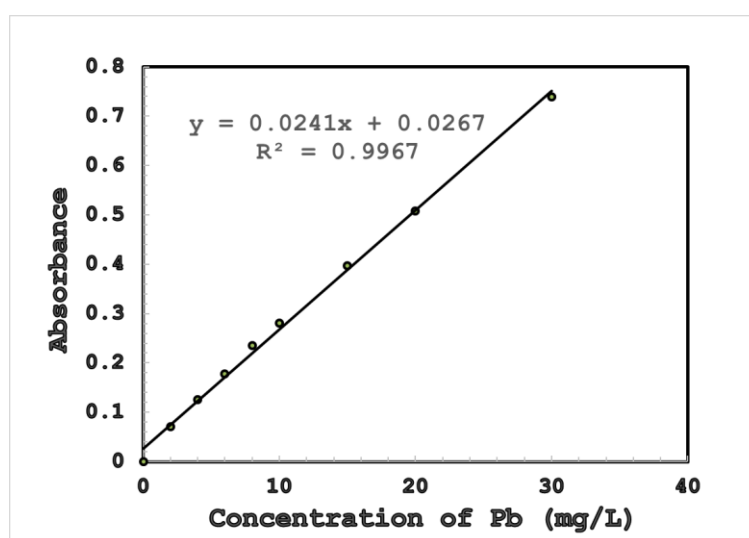
หลังจากนั้นได้เลือกตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุด ส่งไปตรวจวิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หาหมู่



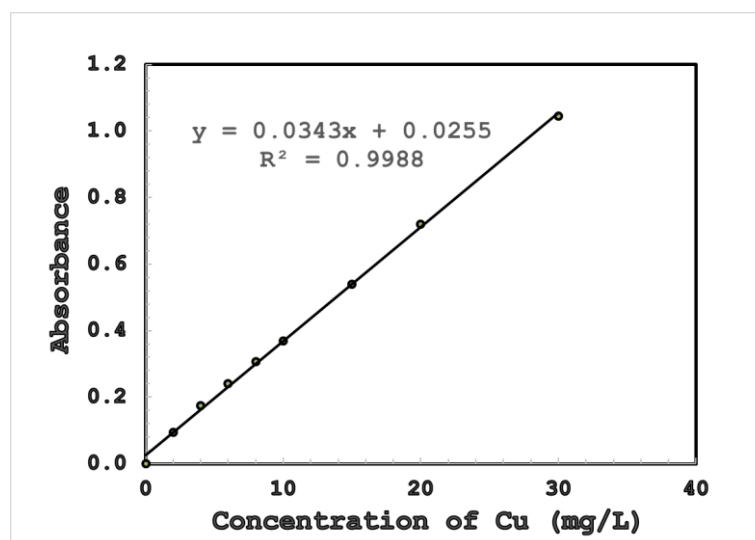
ฟังก์ชันนัลกรุปพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR) วัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (BET) และวิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค scanning electron microscope (SEM) และนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) ในสารละลายน้ำต่อไป

#### 2.2.4 กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว

กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานตะกั่วและทองแดง แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb)



รูปที่ 6 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานทองแดง (Cu)

## 2.2.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายโลหะหนักของถ่านกัมมันต์

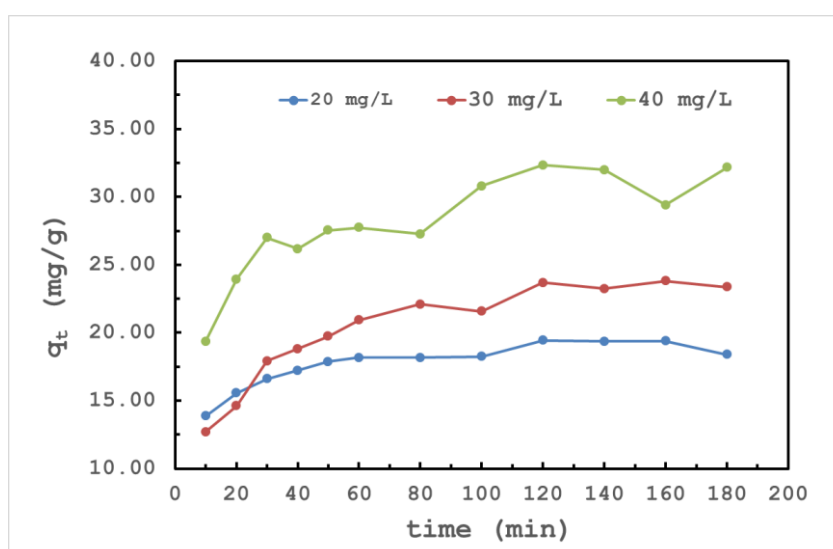
ผลของการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว และระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่วของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด โดยใช้สารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20.00 30.00 และ 40.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณของตัวดูดซับประมาณ 0.10xx กรัม เขย่าด้วยอัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10-180 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 30 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 8-9 และรูปที่ 7

ตารางที่ 8 ร้อยละการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่วของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	20 mg/L	30 mg/L	40 mg/L
10	71.90	45.03	52.13
20	81.23	52.43	61.25
30	83.75	62.72	68.08
40	90.50	65.03	66.59
50	91.18	67.92	72.11
60	93.15	72.10	71.95
80	92.05	75.65	72.51
100	92.28	74.93	78.49
120	98.38	82.97	82.96
140	98.73	81.12	83.84
160	98.78	79.60	77.24
180	98.97	79.87	83.56

ตารางที่ 9 ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และระยะเวลาในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	20 mg/L	30 mg/L	40 mg/L
10	13.88	12.71	19.36
20	15.56	14.61	23.95
30	16.60	17.92	26.99
40	17.23	18.81	26.16
50	17.87	19.73	27.55
60	18.18	20.93	27.74
80	18.16	22.09	27.27
100	18.25	21.57	30.81
120	19.44	23.69	32.34
140	19.36	23.23	31.98
160	19.38	23.82	29.41
180	18.40	23.38	32.15



รูปที่ 7 ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่วของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

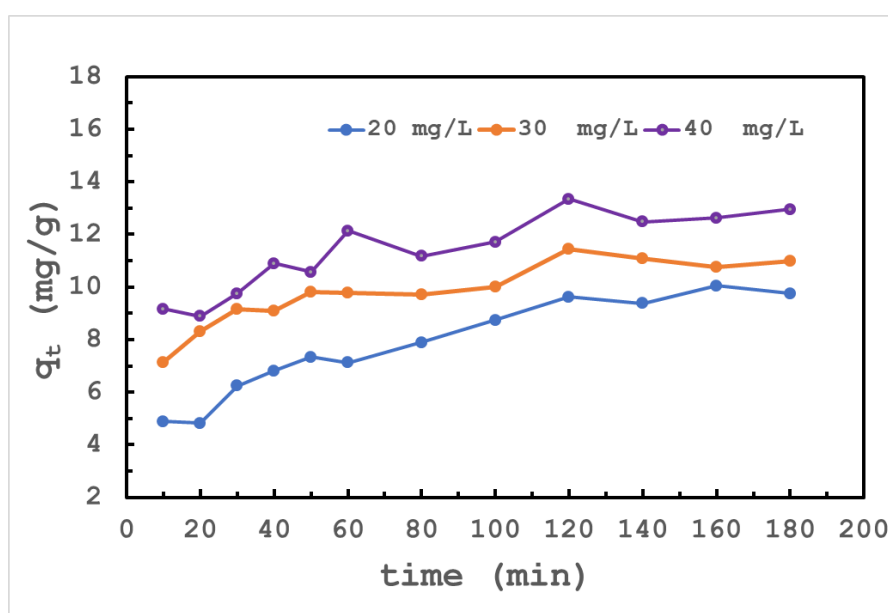
ผลของการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง และระยะเวลาในการดูดซับสารละลายทองแดงของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด โดยใช้สารละลายทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20.00 30.00 และ 40.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณของตัวดูดซับประมาณ 0.10xx กรัม เขย่าด้วยอัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10-180 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 30 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกับการทดลองสารละลายตะกั่ว ผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 10-11 และรูปที่ 8

**ตารางที่ 10** ร้อยละการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายทองแดงของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	20 mg/L	30 mg/L	40 mg/L
10	31.46	24.94	27.97
20	28.09	30.51	28.75
30	33.69	32.81	28.01
40	36.69	32.33	28.86
50	38.86	33.89	28.79
60	40.94	35.76	31.61
80	43.18	35.16	31.06
100	48.24	35.83	33.14
120	51.43	40.02	33.57
140	52.34	39.04	34.46
160	52.95	38.36	33.35
180	51.72	37.47	34.08

ตารางที่ 11 ปริมาณของทองแดงที่ถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ( $q_t$ ) และระยะเวลาในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ปริมาณของทองแดงที่ถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	20 mg/L	30 mg/L	40 mg/L
10	4.89	7.15	9.17
20	4.82	8.30	8.89
30	6.25	9.15	9.75
40	6.81	9.08	10.90
50	7.33	9.81	10.57
60	7.12	9.77	12.13
80	7.89	9.70	11.18
100	8.73	10.00	11.71
120	9.62	11.45	13.34
140	9.37	11.07	12.49
160	10.05	10.77	12.62
180	9.75	10.98	12.95

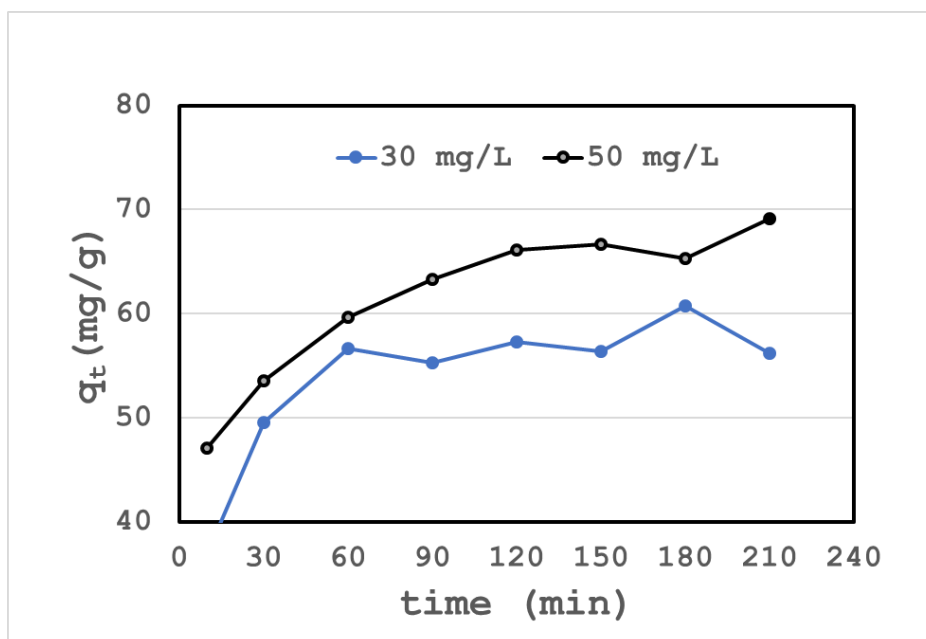


รูปที่ 8 ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายทองแดงของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

กรณีถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน ผลของการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นและระยะเวลาในการดูดซับของสารละลายตะกั่วและทองแดง โดยใช้สารละลายตะกั่วและทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20.00 30.00 และ 40.00 mg/L ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณของตัวดูดซับประมาณ 0.10xx กรัม เขย่าด้วยอัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10-180 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 30 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกันกับการทดลองกันกับการทดลองของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด ผลปรากฏว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนดูดซับสารละลายตะกั่วจนหมดทุกความเข้มข้น จึงจำเป็นจะต้องลดปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนจาก 0.10xx กรัม เป็น 0.05xx กรัม เปลี่ยนเวลาในการดูดซับเป็น 10 30 60 90 120 150 180 และ 210 นาที และปรับเพิ่มความเข้มข้นสูงสุดเป็น 50 mg/L ผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 12 และรูปที่ 9

ตารางที่ 12 ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ( $q_t$ ) และร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับที่ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		ร้อยละของการดูดซับ	
	30 mg/L	50 mg/L	30 mg/L	50 mg/L
10	36.88	47.09	66.87	48.50
30	49.59	53.54	84.22	54.08
60	56.64	59.66	97.42	62.82
90	55.33	63.31	102.27	66.86
120	57.29	66.17	102.17	69.74
150	56.40	66.69	99.63	68.16
180	60.78	65.31	103.73	73.74
210	56.23	69.12	99.15	70.36



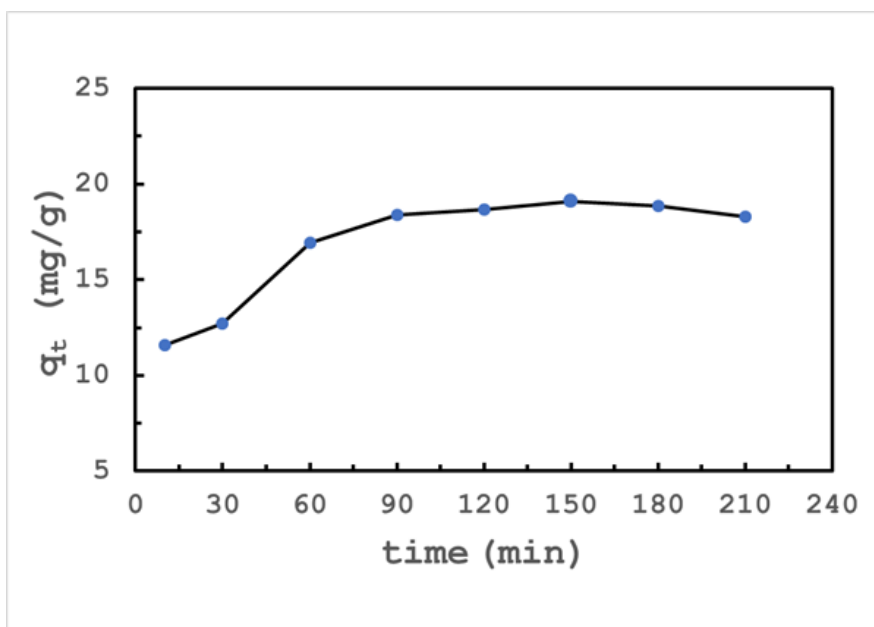
รูปที่ 9 ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่ว (Pb) ที่ความเข้มข้น 50 mg/L ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g

ตารางที่ 13 ปริมาณของทองแดงที่ถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ( $q_t$ ) และร้อยละของการดูดซับสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้น 20 mg/L ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g

เวลาในการดูดซับ (นาที)	ปริมาณของทองแดงที่ถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ร้อยละของการดูดซับ
10	11.58	29.86
30	12.71	32.23
60	16.92	42.68
90	18.41	46.80
120	18.68	47.73
150	19.12	49.32
180	18.87	48.49
210	18.27	46.05

ตารางที่ 14 ร้อยละของการดูดซับสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g เมื่อเวลาดูดซับเท่ากับ 180 นาที

ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ร้อยละของการดูดซับ
10	23.04	118.43
20	25.62	64.37
30	21.42	36.56
40	28.24	35.44



รูปที่ 10 ปริมาณการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้น 20 mg/L ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนปริมาณถ่าน 0.05xx g

จากรูปที่ 7-10 พบว่าอัตราการดูดซับในช่วงแรกจะสูง เนื่องจากในตอนแรกนั้นพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังว่างอยู่ทำให้ไอออนของตะกั่วและทองแดง สามารถเข้าไปจับบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้อย่างง่ายดายและรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการดูดซับจะลดลงจนเริ่มคงที่และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที และจากตารางที่ 8 และตารางที่ 10 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วและทองแดง เท่ากับ 20 mg/L มีค่าร้อยละการดูดซับและระยะเวลาในการดูดซับสารละลายตะกั่วและทองแดงของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดสูงที่สุด

สำหรับกรณีถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาทีเช่นกัน ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วคือ 50 mg/L เนื่องจากทุเรียนดูดซับสารละลายตะกั่วได้ดีมาก ซึ่งสังเกต



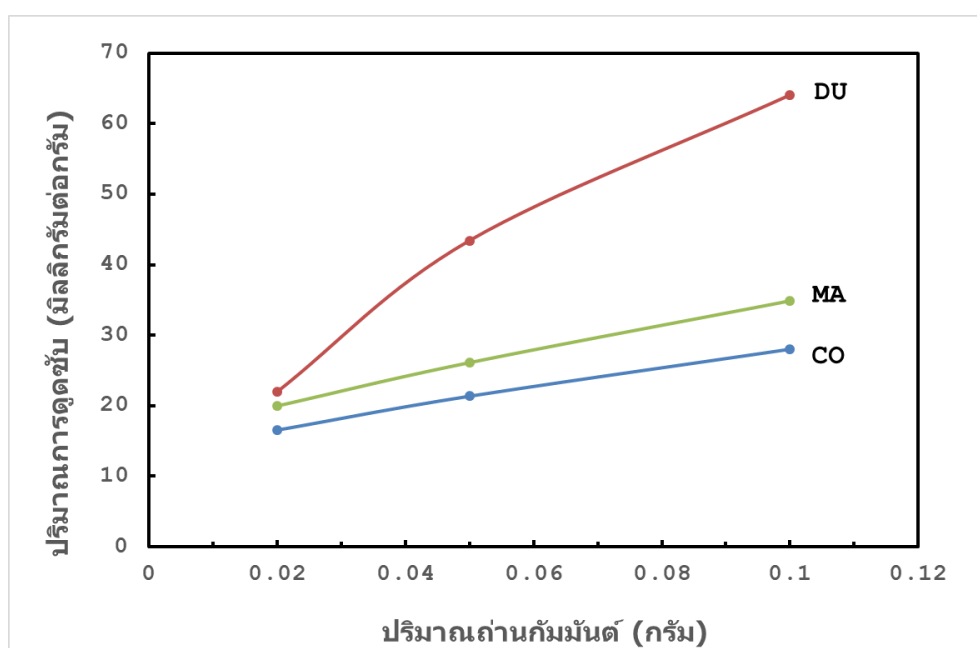
ได้จากร้อยละการดูดซับที่ความเข้มข้น 30 mg/L พบว่าค่าร้อยละมีค่ามากกว่า 100 นั้นหมายความว่า สารละลายตะกั่วถูกดูดซับจนหมด

สำหรับการดูดซับสารละลายทองแดงของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน แสดงดังตารางที่ 13-14 และรูปที่ 8 ซึ่งพบว่า ที่ความเข้มข้น 20 mg/L ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน 0.05xx g ให้ร้อยละของการดูดซับสารละลาย Cu สูงสุด

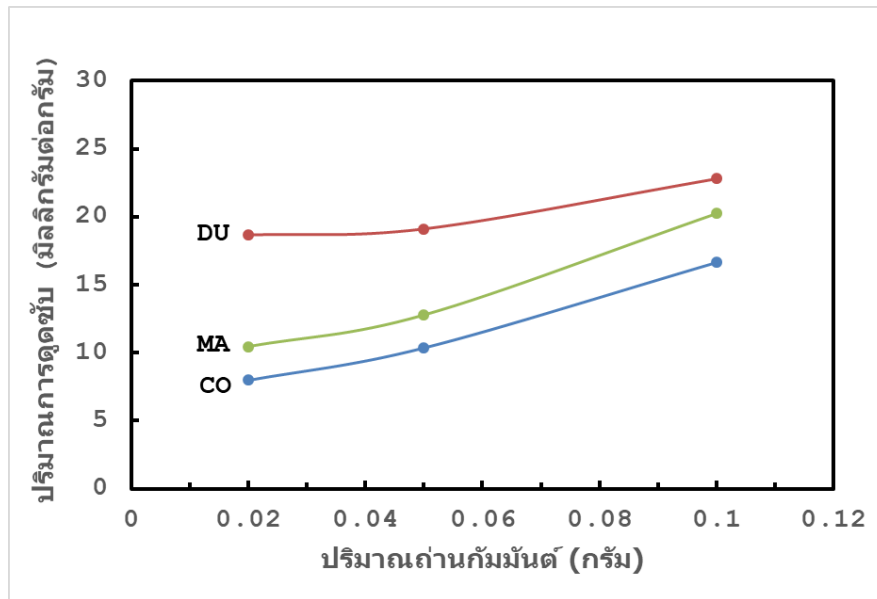
ดังนั้น เพื่อให้สามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้ สำหรับถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดจึงใช้เวลาในการดูดซับที่ 120 นาที เนื่องจากเป็นเวลาที่เข้าสู่สมดุลเรียบร้อยแล้ว ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วและทองแดงของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดและกะลามะพร้าวเป็น 20 mg/L และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้คือ 0.10xx กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เมื่อทำการดูดซับตะกั่วทำการทดลองที่ความเข้มข้น 50 mg/L และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้คือ 0.05xx กรัม ส่วนการดูดซับทองแดงทำการทดลองที่ความเข้มข้น 20 mg/L แต่ลดปริมาณตัวดูดซับที่ใช้เป็น 0.05xx กรัม

## 2.2.6 ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม

ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ปริมาณ 0.0200-0.1000 กรัม สารละลายตะกั่วหรือทองแดง ความเข้มข้น 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 เขย่าด้วยอัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ได้ผลแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ปริมาณการดูดซับสารละลายตะกั่ว (Pb) กับปริมาณของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

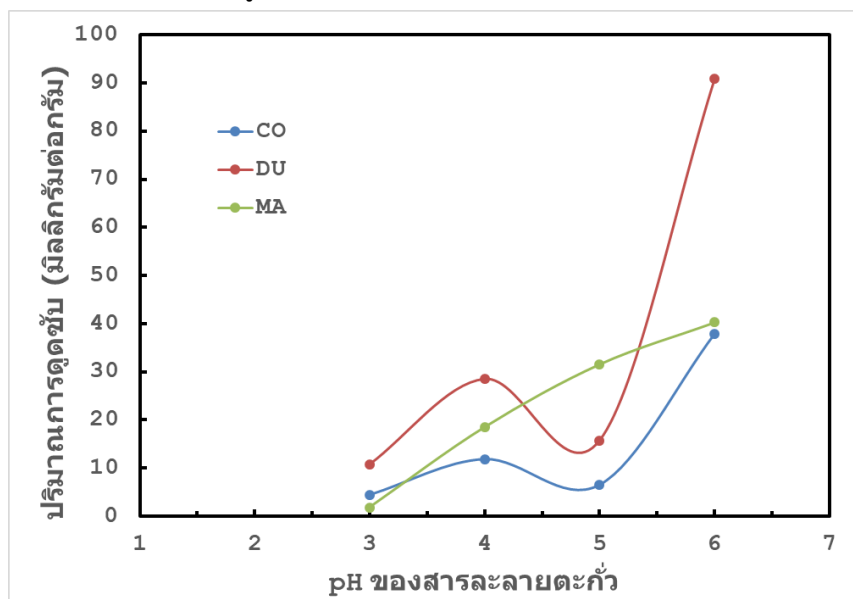


รูปที่ 12 ปริมาณการดูดซับสารละลายทองแดง (Cu) กับปริมาณของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

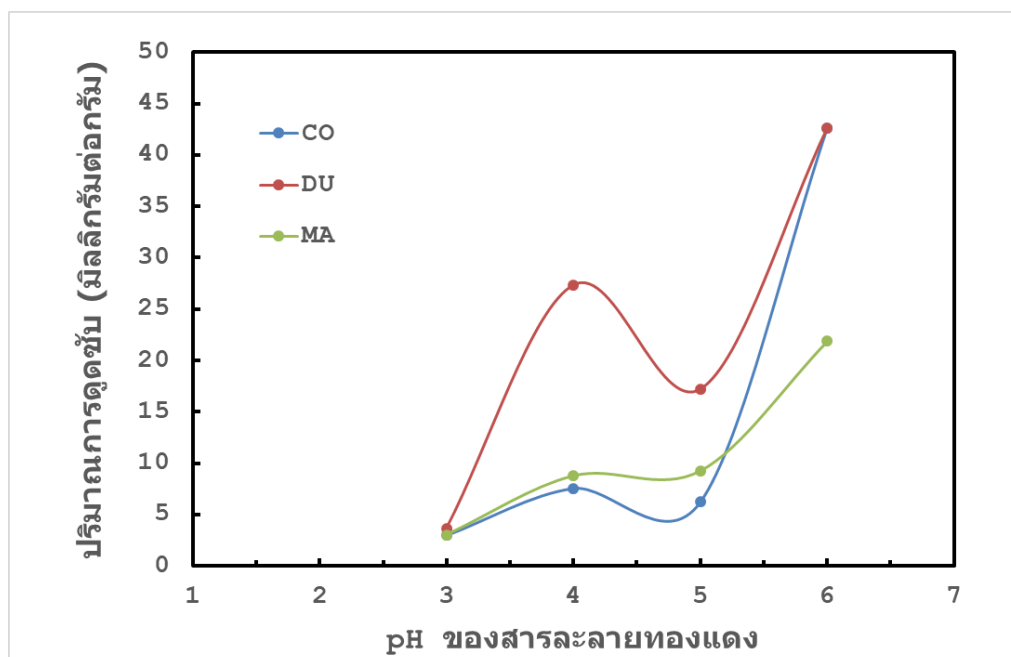
จากรูปที่ 11-12 พบว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ มีผลทำให้ปริมาณการดูดซับตะกั่วและทองแดงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก

### 2.2.7 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่ว โดยทำการศึกษาที่พีเอช 3.0 4.0 5.0 และ 6.0 สารละลายตะกั่วความเข้มข้น 20.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.0500 กรัม เขย่าด้วยอัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ได้ผลแสดงดังรูปที่



รูปที่ 13 ปริมาณการดูดซับกับค่าพีเอชของสารละลายตะกั่ว

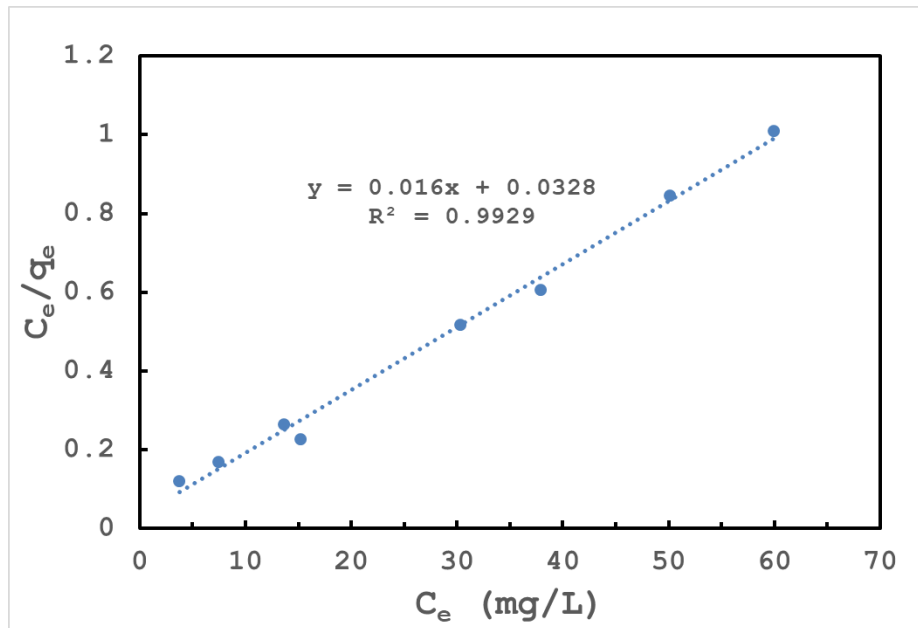


รูปที่ 14 ปริมาณการดูดซับกับค่าพีเอชของสารละลายทองแดง

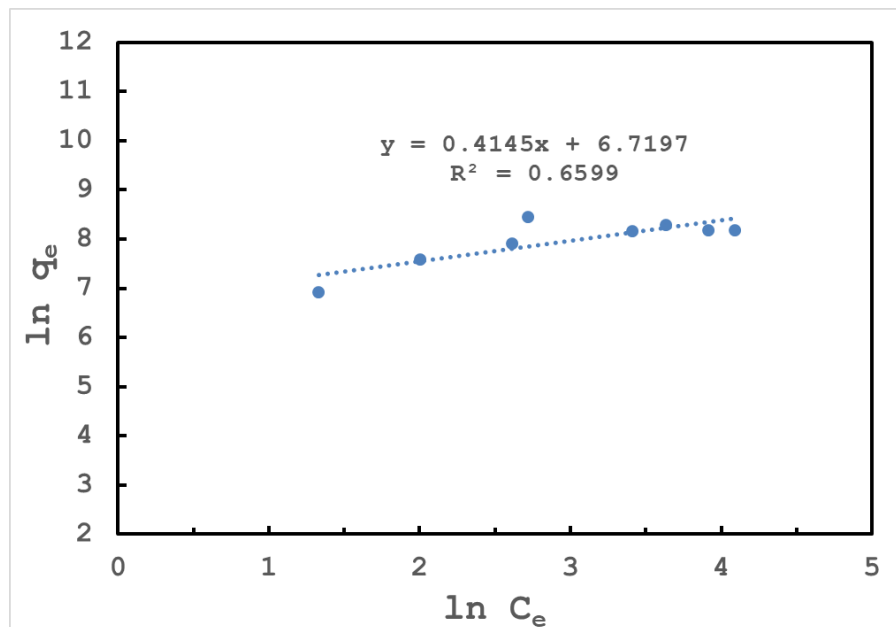
จากรูปที่ 13-14 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมที่ใช้ในการดูดซับตะกั่วจะอยู่ในช่วงพีเอช 5 - 7 เนื่องจากมีปริมาณการดูดซับสูงที่สุด และการลดลงของค่าพีเอช จาก 5 - 3 มีผลทำให้ปริมาณของการดูดซับลดลง เนื่องจากที่พีเอชต่ำจะมี  $H^+$  ซึ่ง  $H^+$  สามารถแข่งขันกับตะกั่วในการจับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ มีผลทำให้ปริมาณการดูดซับตะกั่วลดลง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชจาก 7 - 11 ปริมาณการดูดซับตะกั่วจะลดต่ำลง เนื่องจากเกิดการตกตะกอนในรูปของเลดไฮดรอกไซด์ ( $Pb(OH)_2$ ) (Mouni, L. และคณะ, 2011)

### 2.2.8 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและทองแดง

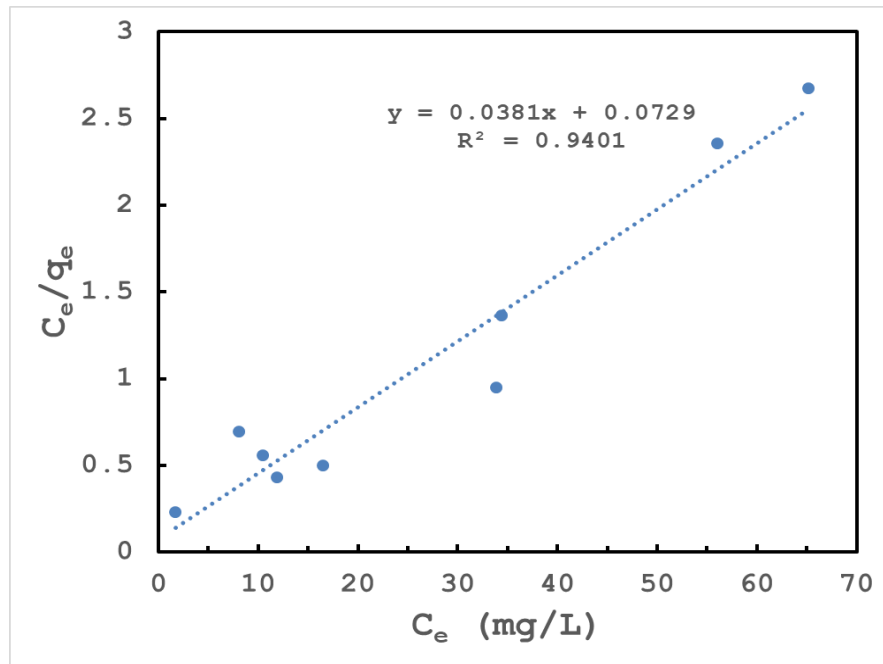
ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและทองแดง ตามแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ได้ผลดังรูปที่ 15-26 และตารางที่ 15-16 ตามลำดับ



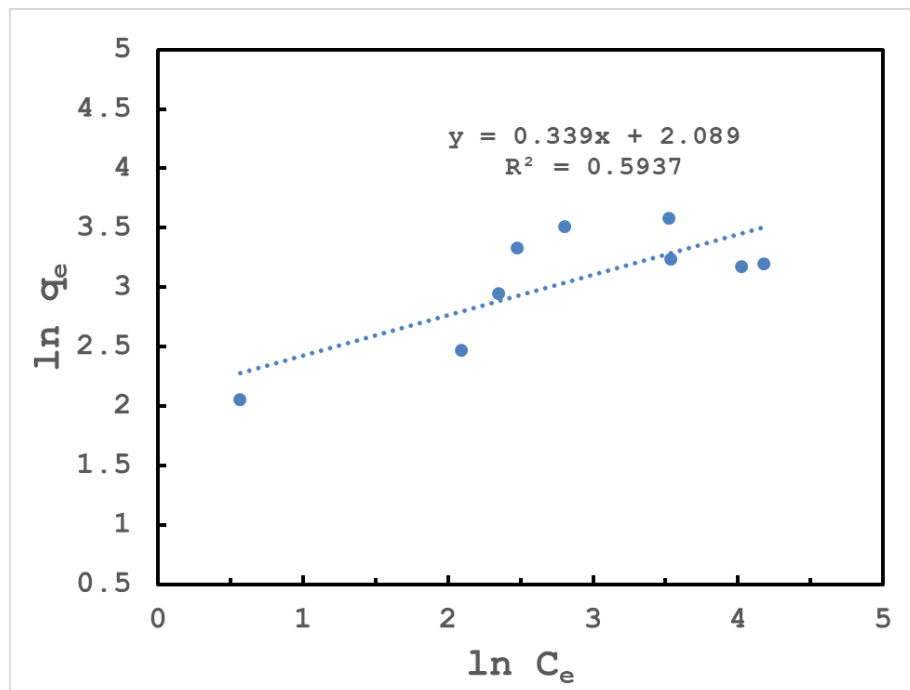
รูปที่ 15 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด



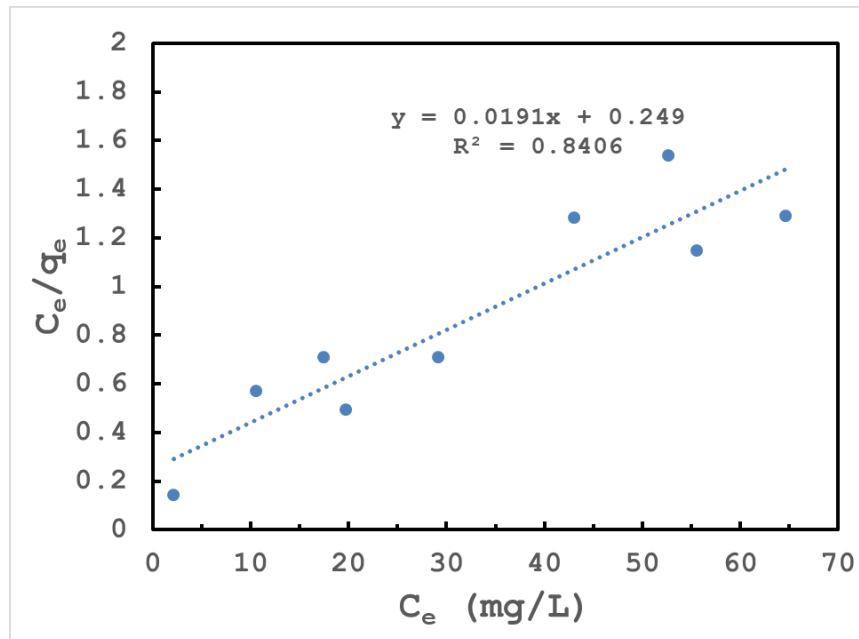
รูปที่ 16 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วของฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด



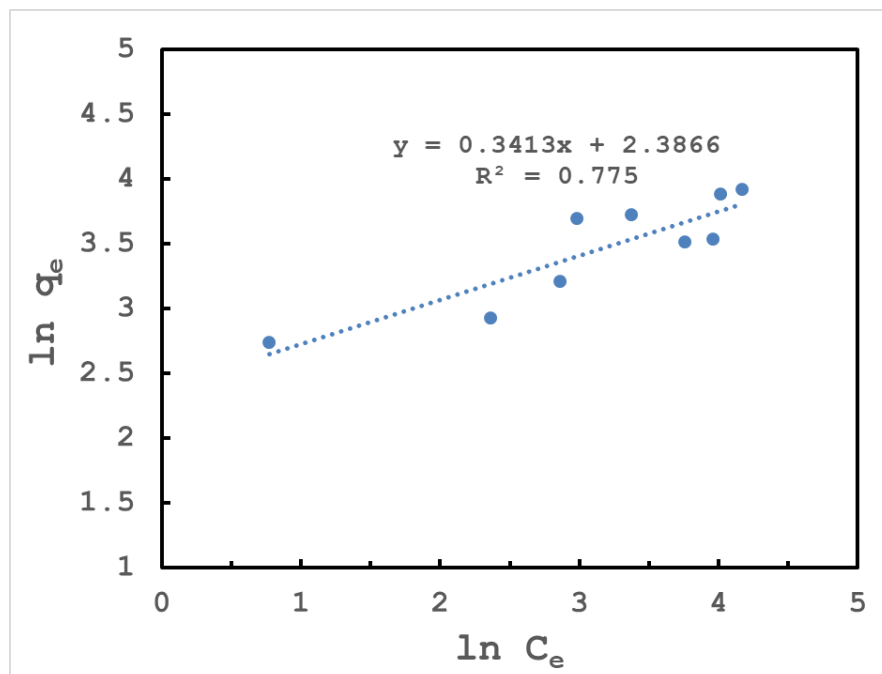
รูปที่ 17 ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด



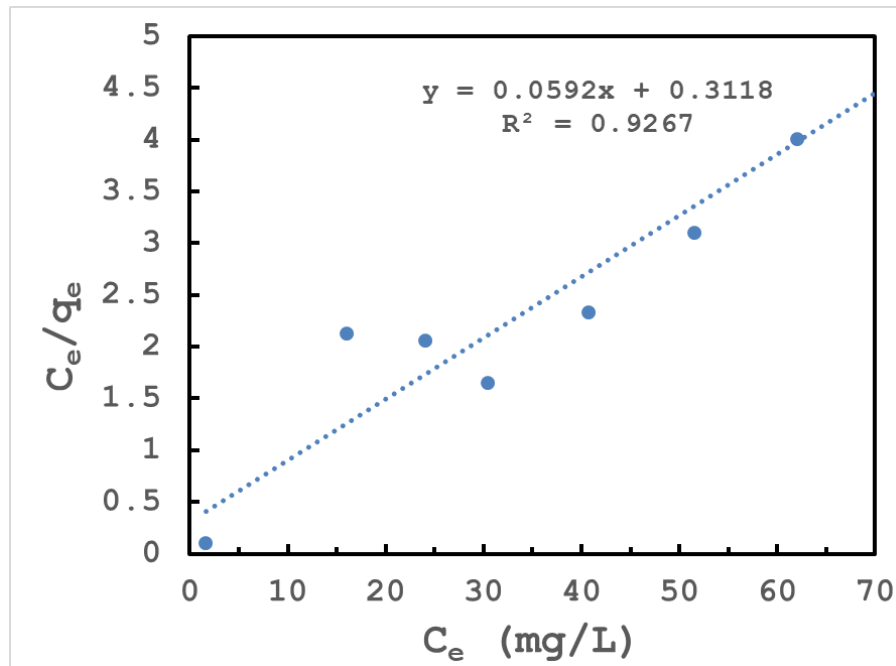
รูปที่ 18 ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด



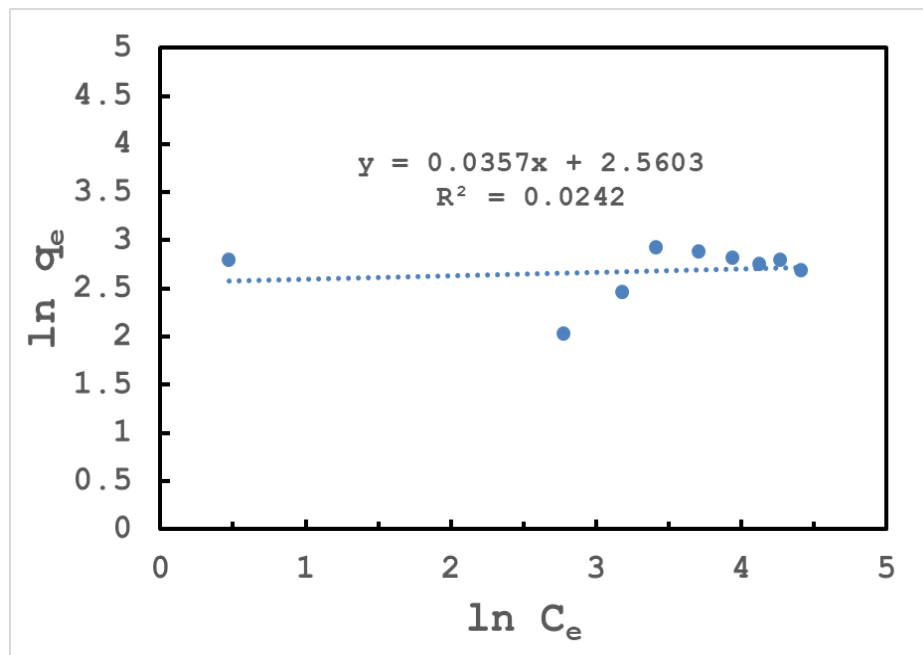
รูปที่ 19 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว



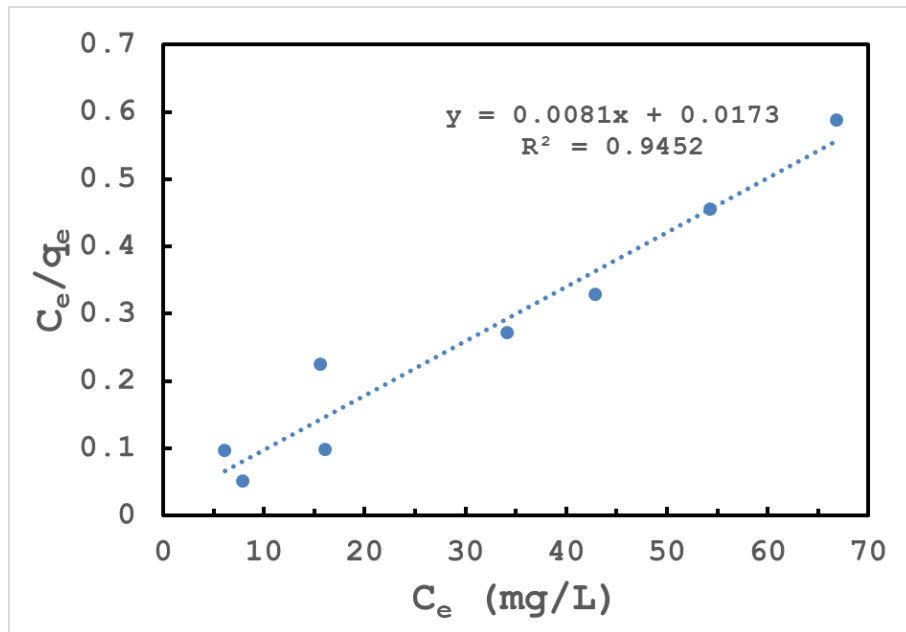
รูปที่ 20 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว



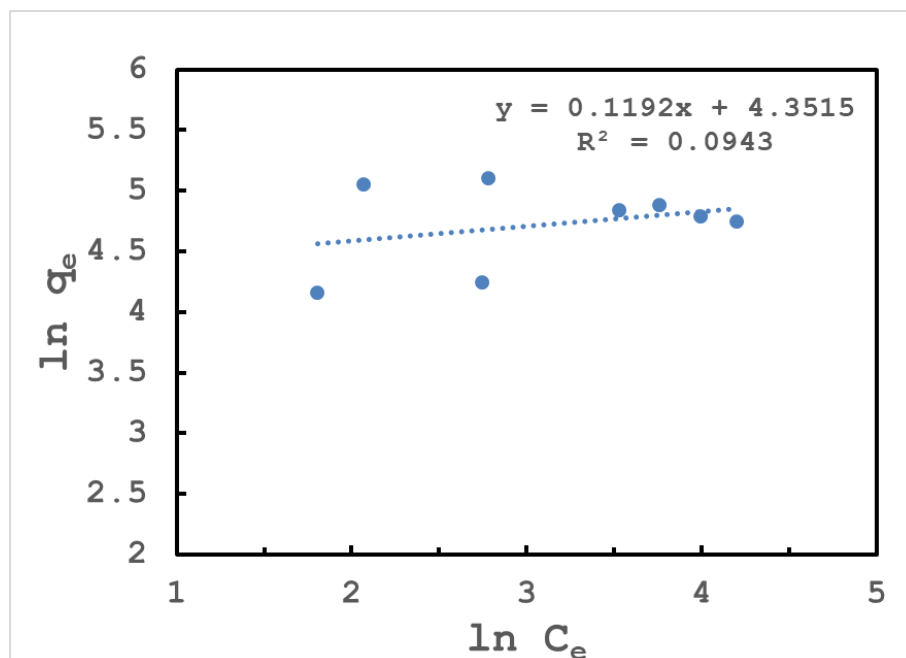
รูปที่ 21 ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว



รูปที่ 22 ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

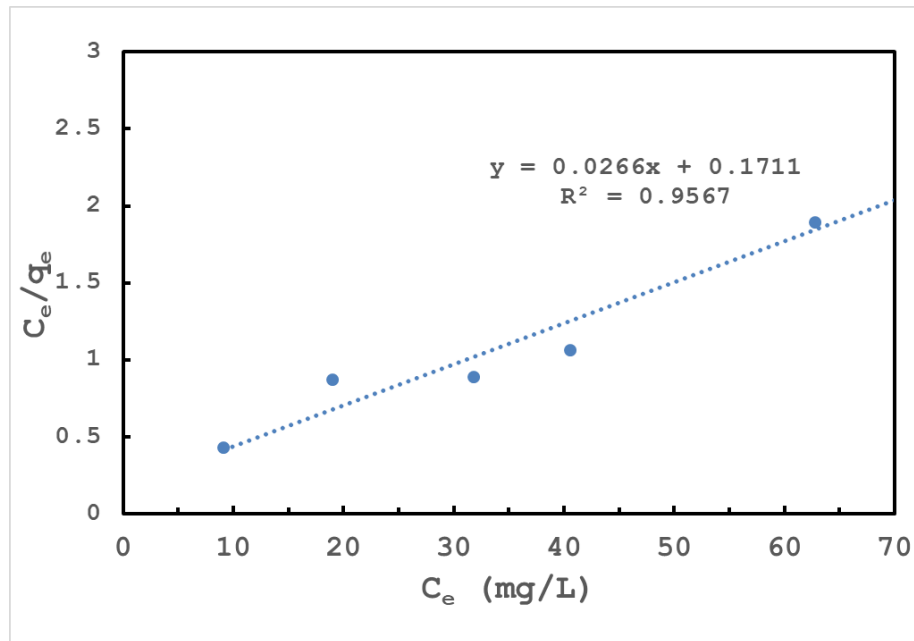


รูปที่ 23 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของแลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน

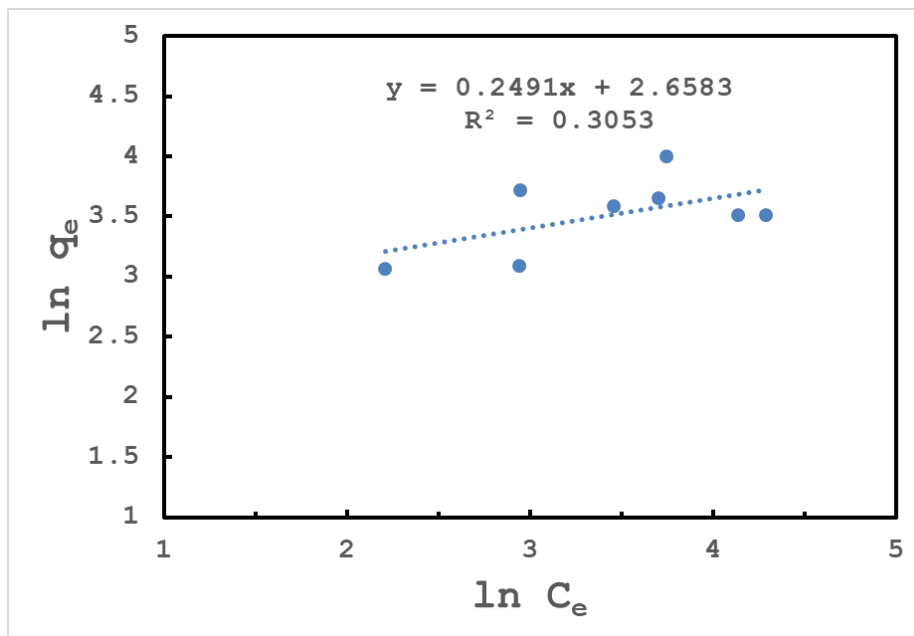


รูปที่ 24 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่ว (Pb) ของฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน





รูปที่ 25 ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดงของ (Cu) แลงเมียร์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน



รูปที่ 26 ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดง (Cu) ของฟรอยด์ลิช ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของ ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน

ตารางที่ 15 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและทองแดง ของแลงเมียร์

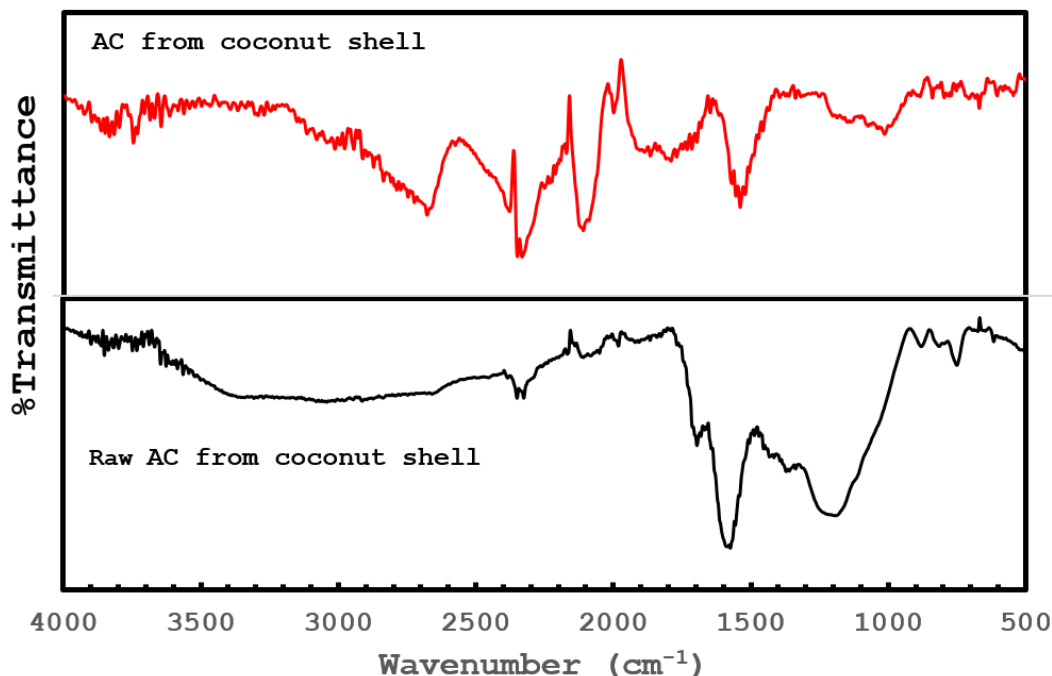
ถ่านกัมมันต์	ตัวถูกดูดซับ	ไอโซเทอมของแลงเมียร์		
		$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$
CO	Pb	52.36	0.08	0.8406
DU		123.46	0.47	0.9452
MA		62.50	0.49	0.9929
CO	Cu	16.89	0.19	0.9267
DU		37.59	0.16	0.9567
MA		26.25	0.52	0.9401

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วและทองแดง ของฟรอยด์ลิช

ถ่านกัมมันต์	ตัวถูกดูดซับ	ไอโซเทอมของฟรอยด์ลิช		
		$K_F$ (L/g)	$n$	$R^2$
CO	Pb	10.88	2.93	0.7750
DU		77.59	8.39	0.0943
MA		828.57	2.41	0.6599
CO	Cu	12.94	28.01	0.0242
DU		14.27	4.01	0.3053
MA		8.08	2.95	0.5937

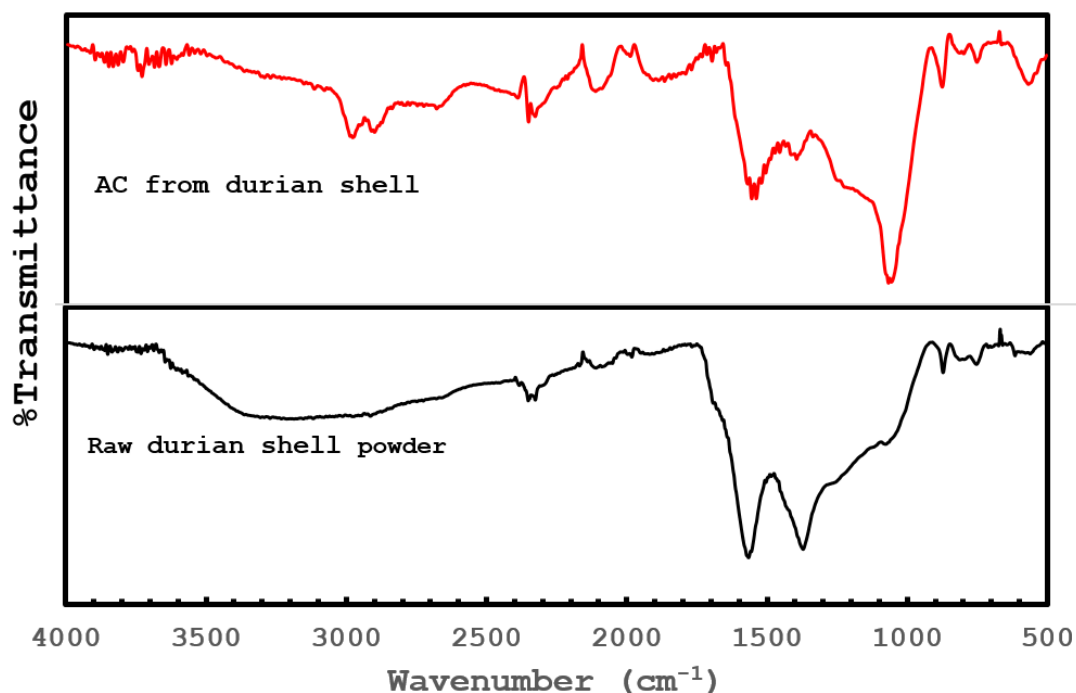
ข้อมูลในตารางที่ 15 และ 16 ทำให้ทราบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและทองแดงมีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมของฟรอยด์ลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่เข้าใกล้หนึ่งมากกว่าไอโซเทอมของฟรอยด์ลิช ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในช่วงแรกของการดูดซับจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

## 2.2.9 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared (FTIR)



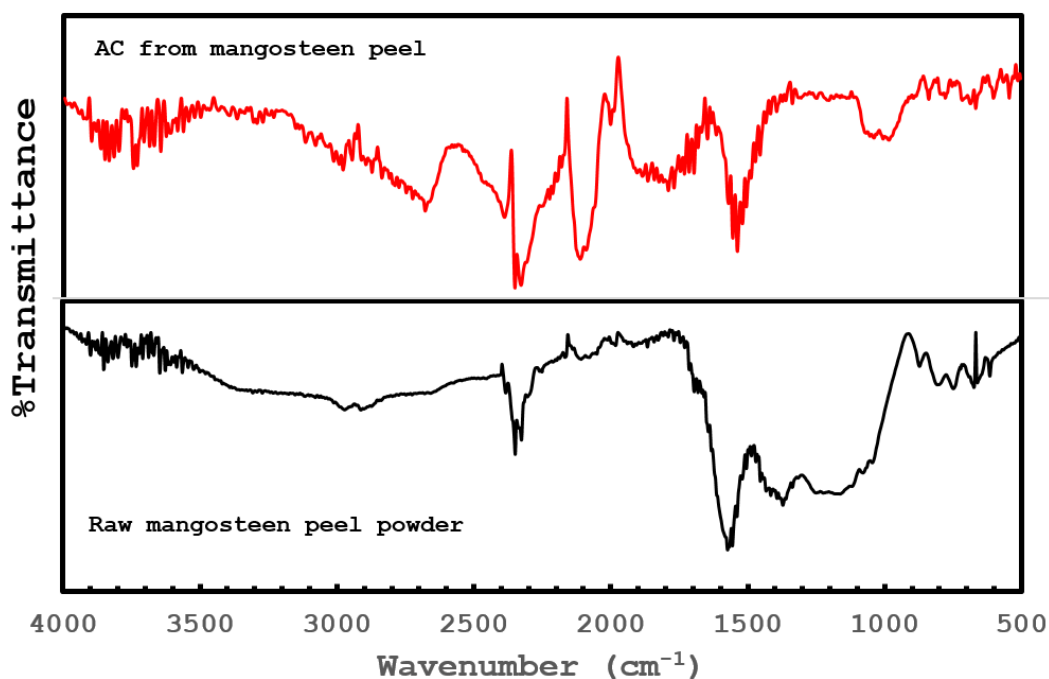
รูปที่ 27 FT-IR สเปกตรัมของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยการกระตุ้น KOH

ในกรณี FT-IR สเปกตรัมของถ่านกะลามะพร้าวที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น พบว่า มีตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $3,000-3,400\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ O–H stretching (aliphatic alcohol) และพบบริเวณ sharp peak ที่ตำแหน่ง  $1,600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C=C) และที่ตำแหน่ง  $1,190\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ  $\text{SO}_2$  และปรากฏพีคเพียงเล็กน้อยที่  $2,390\text{ cm}^{-1}$  และ  $2,200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ C≡C stretching (alkynes) ขณะที่เปลือกมะพร้าวที่ผ่านการกระตุ้นแล้ว พบว่าตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) ที่บริเวณ  $3,000-3,600\text{ cm}^{-1}$  (O–H stretching) และที่ตำแหน่ง  $1,190\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{SO}_2$ ) ลดหายไป และปรากฏ sharp peak ที่ชัดเจนขึ้นที่ตำแหน่ง ที่  $2,390\text{ cm}^{-1}$ ,  $2,200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ C≡C stretching (alkynes) และที่ตำแหน่ง  $2,680\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลกรุปของ C=O stretch (lignocellulosic compounds) ก็ชัดเจนขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นที่ตำแหน่ง  $1,600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ (C=C) ลดลงเล็กน้อยเมื่อผ่านการกระตุ้นแล้ว



รูปที่ 28 FT-IR สเปกตรัมของถ่านเปลือกทุเรียนและถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนที่กระตุ้นด้วยการกระตุ้น KOH

สำหรับ FT-IR สเปกตรัมของเปลือกทุเรียนที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น พบว่ามีตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $3,000-3,500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ O–H stretching (aliphatic alcohol) เช่นเดียวกับถ่านกะลามะพร้าว และที่ตำแหน่ง  $2,320\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ  $\text{C}\equiv\text{C}$  stretching (alkynes) และพบบริเวณ sharp peak ที่ตำแหน่ง  $1,560\text{ cm}^{-1}$  และ  $1,380\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ aliphatic carboxylic acid salt  $\nu(\text{C}=\text{O})$  ขณะที่ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนที่กระตุ้นด้วย KOH แล้ว พบการลดลงของตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) ที่บริเวณ  $3,000-3,500\text{ cm}^{-1}$  (O–H stretching) และที่ตำแหน่ง  $1,380\text{ cm}^{-1}$  (aliphatic carboxylic acid salt) ก็ลดลงเช่นเดียวกัน นอกจากนี้พบว่าปรากฏ sharp peak ที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง  $1,050\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันนอลกรุปของ aliphatic phosphates  $\nu(\text{P}-\text{O}-\text{C})$  และที่ตำแหน่ง  $1,980\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ  $\text{C}=\text{O}$  stretch (carboxylic acids) และที่ตำแหน่ง  $2,250\text{ cm}^{-1}$  เป็นกลุ่มของ  $\text{C}\equiv\text{C}$  stretching (alkynes) ชัดเจนขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 29 FT-IR สเปกตรัมของถ่านเปลือกมังคุดและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดที่กระตุ้นด้วยการกระตุ้น KOH

จากการศึกษาเปลือกมังคุดที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า มีตำแหน่งแถบกว้าง (broad peak) เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง  $3,000-3,500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ O–H stretching (aliphatic alcohol) เช่นเดียวกับถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเปลือกทุเรียน และมี sharp peak ที่ตำแหน่ง  $1600$  และ  $1400\text{ cm}^{-1}$  เป็นหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปของ C=C stretching และที่ตำแหน่ง  $1,060\text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งของพันธะ C–O stretching และ C–O deformation รวมทั้งพบ sharp peak ที่ตำแหน่ง  $2,400\text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งของ C=O stretch (lignocellulosic compounds) ขณะที่เปลือกมังคุดที่ผ่านการกระตุ้นแล้ว พบว่าตำแหน่งแถบกว้างที่บริเวณ  $3,000-3,500\text{ cm}^{-1}$  หายไป และยังปรากฏหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปใหม่เกิดขึ้น (sharp peak) ที่ตำแหน่ง  $2,200\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ C≡C stretching (alkynes) นอกจากนี้ยังพบหมู่ฟังก์ชันของ aliphatic carboxylic acid salt  $\nu(\text{C}=\text{O})$  ที่ตำแหน่ง  $1,560\text{ cm}^{-1}$  และกลุ่ม aliphatic phosphates  $\nu(\text{P}-\text{O}-\text{C})$  ที่ตำแหน่ง  $1,080\text{ cm}^{-1}$

## 2.2.10 ผลการวัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET)

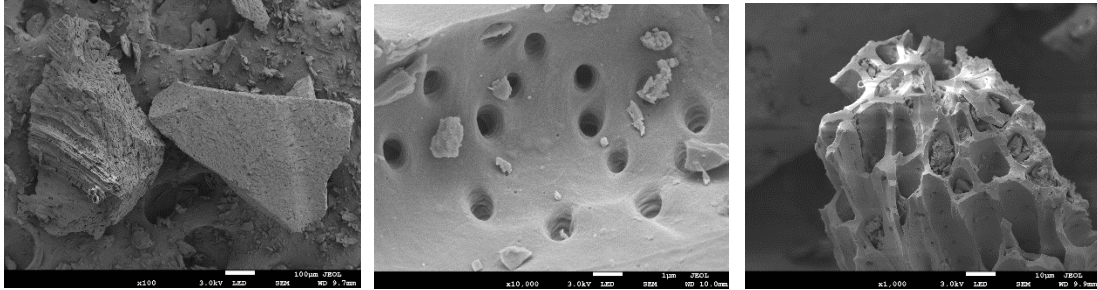
ตารางที่ 17 ลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
ถ่านกะลามะพร้าว	46.105	$4.7638 \times 10^{-2}$	4.1330
ถ่านเปลือกทุเรียน	1.9863	$1.4829 \times 10^{-2}$	29.862
ถ่านเปลือกมังคุด	1.7555	$6.5119 \times 10^{-3}$	14.838
ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	1,346.6	0.7441	2.2101
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	567.79	0.2795	1.9694
ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด	1,206.0	0.7229	2.3975

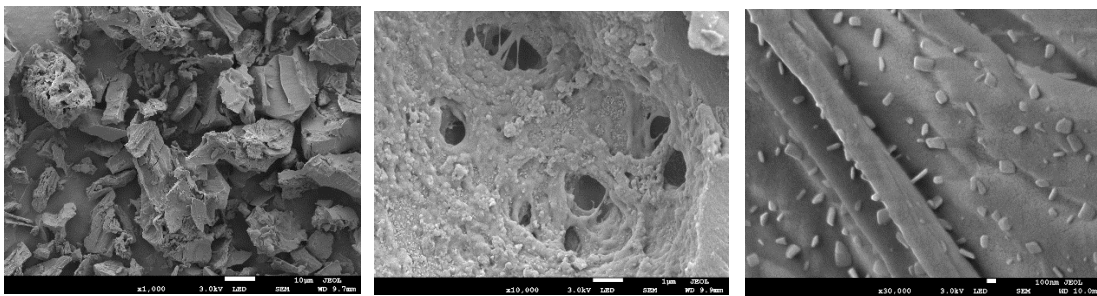
จากตารางที่ 17 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวมสูงสุด คือ 1,346.6 m<sup>2</sup>/g และ 0.7441 cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุดในบรรดาถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด และเป็นถ่านกัมมันต์เพียงชนิดเดียวที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเป็นแบบไมโครพอร์รัส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและจากเปลือกมังคุดมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเป็นแบบเมโซพอร์รัส (Mesoporous) เนื่องจากรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร อีกทั้งเป็นรูพรุนแบบเมโซพอร์รัสที่มีขนาดของรูพรุนเล็กกว่ารูพรุนเมโซพอร์รัสของถ่านกะลามะพร้าว ถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกมังคุดที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้น

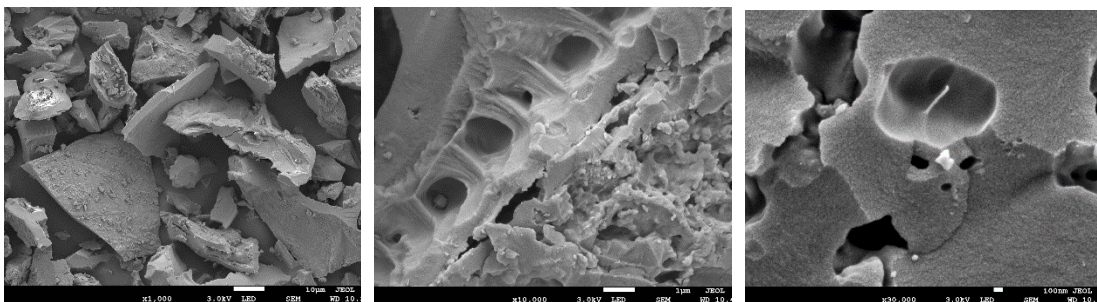
### 2.2.11 วิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)



ถ่านกะลามะพร้าว



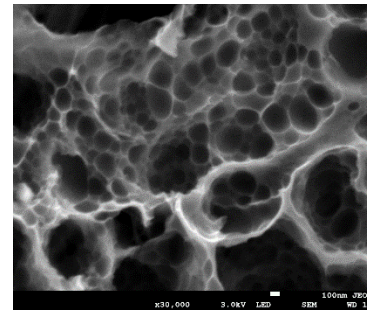
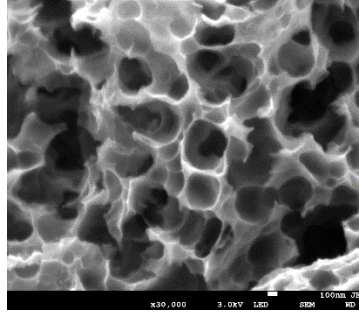
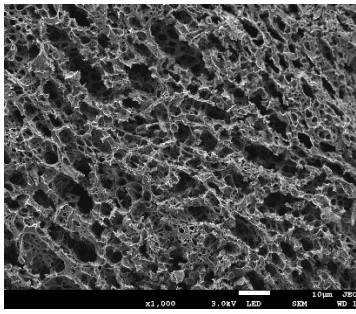
ถ่านเปลือกทุเรียน



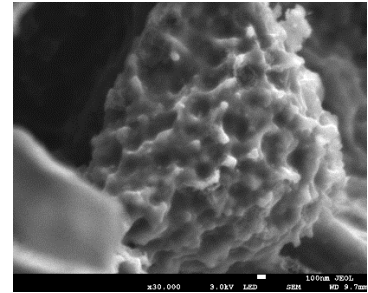
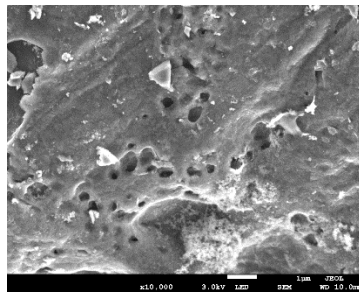
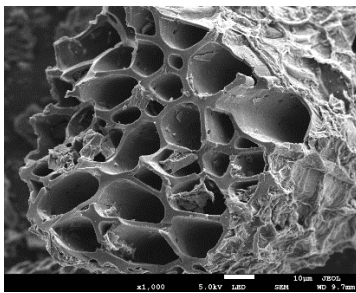
ถ่านเปลือกมังคุด

รูปที่ 30 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกะลามะพร้าว ถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกมังคุด ด้วยเทคนิค SEM

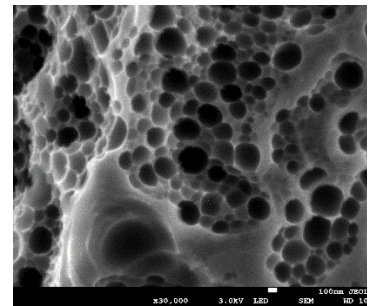
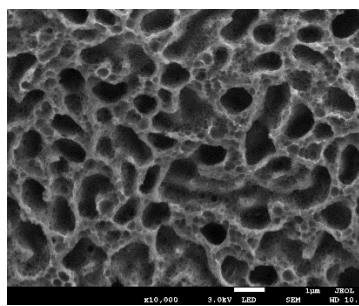
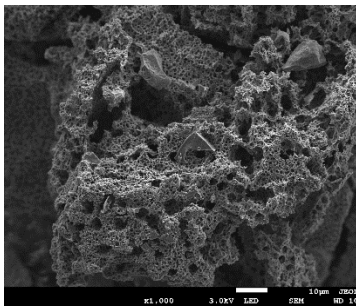




ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว



ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน



ถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

รูปที่ 31 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ด้วยเทคนิค SEM



## (3)

## อภิปราย/วิจารณ์ (Discussion)

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยมีการเผาคาร์บอนที่อุณหภูมิ 500 °C และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีร้อยละผลผลิตสูงสุด รองลงมาคือเปลือกมังคุด และเปลือก ตามลำดับ จากร้อยละผลผลิตโดยเฉลี่ยของถ่านทั้ง 3 ชนิด พบว่าเปลือกทุเรียนให้ร้อยละผลผลิตต่ำที่สุด อาจเป็นเพราะว่าเปลือกทุเรียนที่แห้งแล้วเบากว่าเปลือกมังคุดและกะลามะพร้าวเป็นอย่างมาก เมื่อนำไปเผาคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงๆ จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ของถ่านมากเกินไป ผลผลิตที่ได้จึงค่อนข้างต่ำกว่าเปลือกมังคุดและกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนมีค่าร้อยละแฉะและร้อยละความชื้นโดยเฉลี่ยสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว ซึ่งค่าเท่ากับ 15.26 และ 6.72 ตามลำดับ

เมื่อทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาเลขไอโอดีน โดยใช้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 20 40 และ 60 %w/w โดยแต่ละความเข้มข้นใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นที่ 400 600 และ 800 จากนั้นทำการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุดให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด เมื่อถูกกระตุ้นด้วย 40 %w/w KOH และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 °C ส่วนถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด เมื่อทำการกระตุ้นด้วย 40 %w/w KOH และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C

ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นทั้งของสารละลายตะกั่วและทองแดง และระยะเวลาในการดูดซับทั้งสารละลายตะกั่วและทองแดงของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด โดยใช้สารละลายตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 20.00 30.00 และ 40.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ปริมาณของตัวดูดซับประมาณ 0.10xx กรัม เขย่าด้วยอัตราเร็ว 130 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10-180 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 30 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่า กรณีถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนมีการดูดซับสารละลายตะกั่วจนหมดทุกความเข้มข้น จึงจำเป็นต้องลดปริมาณถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนลงจาก 0.10xx กรัม เป็น 0.05xx กรัม อีกทั้งเปลี่ยนเวลาในการดูดซับเป็น 10 30 60 90 120 150 180 และ 210 นาที และปรับเพิ่มความเข้มข้นสูงสุดเป็น 50 mg/L นอกจากนี้พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ควรใช้ในการศึกษาการดูดซับทั้งสารละลาย คือ 20 mg/L และเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารละลายทั้งสอง คือ 120 นาที เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนจำเป็นต้องลดปริมาณถ่านลง ดังนั้นการทดลองดูดซับจึงใช้ปริมาณถ่านถ่านกัมมันต์เป็น 0.0500 กรัม

เมื่อทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วและทองแดงของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวม ผลปรากฏว่า ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวม 1,346.6 m<sup>2</sup>/g และ 0.7441 cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุดในบรรดาถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด และเป็นถ่านกัมมันต์เพียงชนิดเดียวที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเป็นแบบไมโครพอร์ส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น โดยได้เปรียบเทียบกับถ่านที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้นให้เห็นภาพอย่างชัดเจน ซึ่งมีรูปภาพที่แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกะลามะพร้าว ถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกมังคุด ด้วยเทคนิค SEM เปรียบเทียบให้เห็นอย่างชัดเจน

## (4)

**สรุปและขอเสนอแนะ (Conclusion and Recommendations)****4.1 สรุป (Conclusion)**

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีจำนวนมาในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เช่น ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าเลขไอโอดีน พบว่ามีผลสอดคล้องกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (Cu และ Pb) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว พบว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนดูดซับ Pb ได้ดีมาก นอกจากนี้ก็มีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก (Cu และ Pb) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าว เช่น ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ระยะเวลาในการดูดซับ ปริมาณถ่านกัมมันต์ และพีเอชดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ในการทดลองนี้ ได้ส่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุน พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน สูงสุด รองลงมาคือมังคุด และทุเรียนตามลำดับ

**4.2 ขอเสนอแนะ (Recommendations)**

ในช่วงแรกของการทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์นั้น ผู้วิจัยได้ทำการเผาคาร์บอนถ่านโดยตรง โดยไม่มีอะไรห่อหุ้มวัสดุดิบ ผลปรากฏว่าถ่านเกิดการเผาไหม้มากเกินไป กลายเป็นเถ้าจำนวนมาก ปริมาณถ่านกับเถ้าเกือบจะเป็นครึ่งต่อครึ่ง แต่ผู้วิจัยก็ดำเนินขั้นตอนต่อไปจนได้ถ่านกัมมันต์ และนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปทดสอบการดูดซับตะกั่ว ซึ่งให้ค่าการดูดซับที่ค่อนข้างต่ำมาก คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการหารือกัน และได้ข้อสรุปว่าน่าจะเกิดจากการที่ไหม้ที่มีอากาศอยู่ด้วยเยอะเกินไป ซึ่งควรควบคุมปัจจัยตรงนี้ให้ดี จึงได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์ขึ้นมาใหม่ ตามขั้นตอนที่ได้อธิบายไว้ในบททดลอง ด้านบน โดยใช้หม้อปั้นดินเผาบรรจุเปลือกทุเรียน เปลือกมังคุด และกะลามะพร้าวก่อนนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง เพื่อเผาเป็นถ่าน ผลปรากฏว่าได้ถ่านมากกว่าเถ้า มีเถ้าอยู่น้อยมากเมื่อเทียบกับการเตรียมในครั้งแรก เหตุผลที่เลือกใช้หม้อปั้นดินเผา เพราะเป็นของที่หาได้ง่ายและราคาถูกกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น และการใช้หม้อปั้นดินเผาก็มีลักษณะคล้ายๆกับการใช้ดินปั้นเป็นเตาเผาถ่านโดยทั่วไป ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้พยายามเตรียมโดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่หาได้ง่ายและมีราคาไม่แพงนัก เพื่อพัฒนาต่อยอดไปสู่การเตรียมถ่านกัมมันต์ได้โดยทั่วไป

(5)

**ผลผลิต (Output)**

- 5.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการทั้งในระดับชาติ และนานาชาติ  
- อยู่ในระหว่างการจัดเตรียมต้นฉบับ
- 5.2 การยื่นจดสิทธิบัตร -ไม่มี-
- 5.3 ผลงานเชิงพาณิชย์ (มีการนำเสนอไปผลิต/ขาย/ก่อให้เกิดรายได้ หรือมีการนำไปประยุกต์ใช้ โดย  
ภาคธุรกิจหรือบุคคลทั่วไป -ไม่มี-
- 5.4 ผลงานเชิงสาธารณะ (เน้นประโยชน์ต่อสังคม ชุมชน ท้องถิ่น) -ไม่มี-

## รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย 256109A1080068 สัญญาเลขที่ 225/2561

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

มหาวิทยาลัยบูรพา

**ชื่อโครงการ** การเตรียม การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากภาคตะวันออกของประเทศไทย เพื่อเป็นตัวดูดซับโลหะหนักจากสารละลายน้ำ (Preparation, Characterization and Application of Activated Carbon from Eastern Thailand Agricultural Wastes as Adsorbents for Heavy Metals from Aqueous Solution)

**ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน** ดร.สุคนทิพย์ เถาว์โสภา

**รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่** 1 ตุลาคม 25560 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2563

**ระยะเวลาดำเนินการ** 2 ปี 6 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560

### รายรับ

#### จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%)	175,000 บาท	เมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560
งวดที่ 2 (40%)	140,000 บาท	เมื่อวันที่ 25 กันยายน พ.ศ. 2562
งวดที่ 3 (10%)	35,000 บาท	เมื่อวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2563
รวม	350,000 บาท	

### รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ(เกิน)
1. ค่าตอบแทน	55,500	55,500	-
2. ค่าจ้าง	15,000	15,000	-
3. ค่าวัสดุ	111,500	111,500	-
4. ค่าใช้สอย	130,500	130,500	-
5. ค่าครุภัณฑ์	-	-	-

6. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	2,500	2,500	
- ค่าธรรมเนียมอุดหนุนสถาบัน	35,000	35,000	-
รวม	350,000	350,000	-

  
(.....)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

## เอกสารอ้างอิง (Reference)

- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สืบค้นจาก  
<http://www.oae.go.th/view/1/ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร/TH-TH> เข้าถึงเมื่อวันที่ 27  
 กุมภาพันธ์ 2563
- ฉวีวรรณ เพงพี ทักษิณ กรม วิทยาศาสตร์ บริการ. (2010). วารสาร กรม วิทยาศาสตร์ บริการ: ปี ที่ 51  
 ฉบับที่ 162 พฤษภาคม 2546.
- Abdolali, A., Guo, W. S., Ngo, H. H., Chen, S. S., Nguyen, N. C., & Tung, K. L. (2014).  
 Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water  
 and wastewater treatment: A critical review. *Bioresource Technology*, *160*, 57-  
 66. doi:10.1016/j.biortech.2013.12.037
- Afroze, S., & Sen, T. K. (2018). A Review on Heavy Metal Ions and Dye Adsorption from  
 Water by Agricultural Solid Waste Adsorbents. *Water, Air, & Soil Pollution*,  
*229*(7), 225. doi:10.1007/s11270-018-3869-z
- Ahmad, M. A., Ahmad Puad, N. A., & Bello, O. S. (2014). Kinetic, equilibrium and  
 thermodynamic studies of synthetic dye removal using pomegranate peel  
 activated carbon prepared by microwave-induced KOH activation. *Water  
 Resources and Industry*, *6*, 18-35.  
 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2014.06.002>
- Ahmed, M. J. (2016). Application of agricultural based activated carbons by microwave  
 and conventional activations for basic dye adsorption: Review. *Journal of  
 Environmental Chemical Engineering*, *4*(1), 89-99.  
 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2015.10.027>
- Bhatnagar, A., Sillanpää, M., & Witek-Krowiak, A. (2015). Agricultural waste peels as  
 versatile biomass for water purification - A review. *Chemical Engineering  
 Journal*, *270*, 244-271. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.135>
- Bhatnagar, A., Vilar, V. J. P., Botelho, C. M. S., & Boaventura, R. A. R. (2010). Coconut-  
 based biosorbents for water treatment - A review of the recent literature.  
*Advances in Colloid and Interface Science*, *160*(1), 1-15.
- Cazetta, A. L., Vargas, A. M. M., Nogami, E. M., Kunita, M. H., Guilherme, M. R., Martins,  
 A. C., . . . Almeida, V. C. (2011). NaOH-activated carbon of high surface area

- produced from coconut shell: Kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 117-125. doi:10.1016/j.cej.2011.08.058
- Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sudaryanto, Y., & Ismadji, S. (2007). Adsorption of basic dye onto activated carbon prepared from durian shell: Studies of adsorption equilibrium and kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 127(1), 121-129. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.09.011>
- Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sunarso, J., Sudaryanto, Y., & Ismadji, S. (2009). Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40(4), 457-462. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2008.10.002>
- Danish, M., Hashim, R., Ibrahim, M. N. M., & Sulaiman, O. (2014). Optimized preparation for large surface area activated carbon from date (*Phoenix dactylifera* L.) stone biomass. *Biomass and Bioenergy*, 61, 167-178. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.008>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2011). Transformation of durian biomass into a highly valuable end commodity: Trends and opportunities. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2470-2478. doi:10.1016/j.biombioe.2011.04.004
- Gautam, R. K., Mudhoo, A., Lofrano, G., & Chattopadhyaya, M. C. (2014). Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration: Adsorbent modification and activation methods and adsorbent regeneration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 239-259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.12.019>
- Gratuito, M. K. B., Panyathanmaporn, T., Chumnanklang, R. A., Sirinuntawittaya, N. B., & Dutta, A. (2008). Production of activated carbon from coconut shell: optimization using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 99(11), 4887-4895.
- Hammed, A. K., Dewayanto, N., Du, D., Ab Rahim, M. H., & Nordin, M. R. (2016). Novel modified ZSM-5 as an efficient adsorbent for methylene blue removal. *Journal*



*of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 2607-2616.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.05.008>

- Jabal, S. N. A., Seok, Y. B., & Hoon, W. F. (2016). The potential of coconut shell powder (CSP) and coconut shell activated carbon (CSAC) composites as electromagnetic interference (EMI) absorbing material. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 20(2), 444-451.
- Kalderis, D., Koutoulakis, D., Paraskeva, P., Diamadopoulos, E., Ota, E., del Valle, J. O., & Fernandez-Pereira, C. (2008). Adsorption of polluting substances on activated carbons prepared from rice husk and sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Journal*, 144(1), 42-50.
- Lee, J.-S., Parameswaran, B., Lee, J.-P., & Park, S.-C. (2008). Recent developments of key technologies on cellulosic ethanol production. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 67(11), 865.
- Maneerung, T., Liew, J., Dai, Y., Kawi, S., Chong, C., & Wang, C.-H. (2015). Activated carbon derived from carbon residue from biomass gasification and its application for dye adsorption: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *Bioresource Technology*, 200, 350-359.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.047>
- Mohan, D., & Pittman, C. U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 762-811.
- Ngah, W. S. W., & Hanafiah, M. A. K. M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review. *Bioresource Technology*, 99(10), 3935-3948.
- Nuithitikul, K., Srikhun, S., & Hirunpraditkoon, S. (2010). Influences of pyrolysis condition and acid treatment on properties of durian peel-based activated carbon. *Bioresource Technology*, 101(1), 426-429.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.040>
- Nuithitikul, K., Srikhun, S., & Hirunpraditkoon, S. (2010). Kinetics and equilibrium adsorption of Basic Green 4 dye on activated carbon derived from durian peel:

- Effects of pyrolysis and post-treatment conditions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 41(5), 591-598. doi:10.1016/j.jtice.2010.01.007
- Prahas, D., Kartika, Y., Indraswati, N., & Ismadji, S. (2008). Activated carbon from jackfruit peel waste by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> chemical activation: Pore structure and surface chemistry characterization. *Chemical Engineering Journal*, 140(13), 32-42. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2007.08.032>
- Shehzad, A., Bashir, M. J. K., Sethupathi, S., & Lim, J.-W. (2015). An overview of heavily polluted landfill leachate treatment using food waste as an alternative and renewable source of activated carbon. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 309-318.
- Vernersson, T., Bonelli, P. R., Cerrella, E. G., & Cukierman, A. L. (2002). Arundo donax cane as a precursor for activated carbons preparation by phosphoric acid activation. *Bioresource Technology*, 83(2), 95-104.
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. W. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 218-235. doi:10.1016/j.rser.2015.02.051

ภาคผนวก (Appendix)

## การคำนวณ

### 1. การหาร้อยละเถ้า (Ash)

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \left( \frac{B - A}{W} \right) \times 100 \quad (9)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา (กรัม) + น้ำหนักถ่านหลังเผา (กรัม)  
 B คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้องก่อนเผา (กรัม) + น้ำหนักถ่านก่อนเผา (กรัม)  
 W คือ น้ำหนักถ่าน (กรัม)

### 2. การหาร้อยละความชื้น (Moisture)

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \left( \frac{A - B}{W} \right) \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้องก่อนเผา (กรัม) + น้ำหนักถ่านก่อนเผา (กรัม)  
 B คือ น้ำหนักถ้วยกระเบื้องหลังเผา + น้ำหนักถ่านหลังเผา (กรัม)  
 W คือ น้ำหนักถ่าน (กรัม)

### 3. การหาปริมาณร้อยละการดูดซับที่สภาวะสมดุลของถ่านกัมมันต์

จากสมการ

$$\text{ร้อยละการดูดซับ} = \left( \frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 4. การหาค่าปริมาณของตะกั่วที่ถูกดูดซับ

จากสมการ

$$q_e = \left( \frac{C_0 - C_e}{W} \right) \times V \quad (12)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 W คือ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ (กรัม)  
 V คือ ปริมาตรของตะกั่วที่ใช้ (ลิตร)