



การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วย
กรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร
Development of Activated Carbons from Sawdust Obtained Parawood
Manufacture using Microwave induced Phosphoric Acid Activation
for Adsorption of Indoor VOCs

ปนัดดา คลิ่งคล้าย
Panatda Klingklay

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วย
กรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร
Development of Activated Carbons from Sawdust Obtained Parawood
Manufacture using Microwave induced Phosphoric Acid Activation
for Adsorption of Indoor VOCs

ปนัดดา คลิ่งคล้าย
Panatda Klingklay

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วย
กรดฟอสฟอริกพร้อมกับไมโครเวฟในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร

ผู้เขียน นางสาวปนัดดา คลิ่งคล้าย

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชาติพิทย์ สิ้นยัง)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรุฒติ ชัยวัฒน์)

.....กรรมการ
(ดร. อภิชน วัชรเรนทร์วงศ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชาติพิทย์ สิ้นยัง)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรุฒติ ชัยวัฒน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

.....
(ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชาติพิทย์ สิ้นยัง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรุฒติ ชัยวัฒน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นางสาวปนัดดา คลึงคล้าย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวปนัดดา คลิ่งคล้าย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร
ผู้เขียน	นางสาวปนัดดา คลิ่งคล้าย
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟ เพื่อใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย ได้แก่ เบนซีนและโทลูอีน โดยทำการศึกษาอุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันที่ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชันคือ 600 องศาเซลเซียส ปริมาณคาร์บอนคงตัว 76.43 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิต 18.91 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้กรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 800 และ 1000 วัตต์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ และศึกษาการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก โดยใช้ความเข้มข้น 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ และการคาร์บอนไนเซชันที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่ากรดฟอสฟอริกที่ 40 เปอร์เซ็นต์ เหมาะสมในการใช้ร่วมกับไมโครเวฟและการคาร์บอนไนเซชัน ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีนและโทลูอีนของงานวิจัยนี้ คือ ถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ และการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณสมบัติดังนี้ พื้นที่ผิว 908.59 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 1.67 นาโนเมตร ปริมาตรรูพรุน 0.36 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 677.89 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอีนด้วยถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยโรงงานที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน และโทลูอีน 22.93 และ 41.15 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนที่เวลา 20 ชั่วโมง โดยความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 0.29 และ 0.43 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจลนศาสตร์การดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนคิดเป็น 62.74 และ 51.67 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนมีความสอดคล้องกับแบบจำลองฟรุนดลิช และเมื่อพิจารณาค่าคงที่จากสมการฟรุนดลิช พบว่าค่าคงที่เบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 12.25 และ 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 0.27 และ 0.64 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความสามารถใน

การดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีปริมาณจำกัด อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้พบว่า การพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ร่วมกับไมโครเวฟมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเพิ่มทางเลือกในการลดของเสียจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ และมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร

Thesis Title Development of Activated Carbons from Sawdust Obtained Parawood Manufacture Using Microwave Induced Phosphoric Acid Activation for Adsorption of Indoor VOCs

Author Miss Panatda Klingklay

Major Program Environmental Engineering

Academic Year 2020

Abstract

Development of activated carbon from sawdust obtained parawood manufacture using microwave and phosphoric acid activation for removal of volatile organic compounds include of benzene and toluene was studied in this research. The carbonization temperature of 400, 600 and 800 °C at 1 hour were studied. In this result found that, the temperature for carbonization is 600 °C. The fixed carbon of 76.43% and the yield of charcoal of 18.91% were found. The microwave activation, microwave power at 600, 800 and 1000 watts were studied. 1000 watts is the optimum condition for activation. For the study of phosphoric acid activation, phosphoric concentration of 40, 60 and 80%, microwave power at 1000 watts, and carbonization at 600 °C were studied. The results found that, using 40% of phosphoric acid is suitable for carbonization. In conclusion, the optimum conditions for synthesis of activated carbon from sawdust obtained parawood manufacture for benzene and toluene removal is activation using 40% of phosphoric acid, 1000 watts of microwave, and carbonization at 600 °C. In this condition, BET surface area of 908.59 m²/g, average pore size of 1.67 nm, pore volume of 0.14 cm³/g, and iodine number of 677.89 mg/g were found. The adsorption kinetic of benzene and toluene on activated carbon produced from rubber wood sawdust was conducted at initial concentration of benzene and toluene of 22.93 and 41.15 mg/m³. The equilibrium time of benzene and toluene of 20 hours was found with the adsorption capacity of 0.29 and 0.43 mg/g. The adsorption kinetic of benzene and toluene were found to fit well with pseudo-second order kinetic model. Adsorption efficiency of benzene and toluene are 62.74 and 51.67%. Adsorption isotherms of benzene and toluene were well described by the Freundlich isotherm model. The Freundlich constants of 12.25 and 3.59 mg/g and the empirical constants

of 0.27 and 0.64 mg/g were found for benzene and toluene. It is concluded that the adsorption capacity at the surface of the activated carbon was limited. However, this research found that activated carbon that produced from sawdust obtained parawood manufacture by using microwave and phosphoric acid activation can be applied as an alternative for reducing waste from the furniture industry and It can be used effectively for removal benzene and toluene generated in indoor.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงผ่านได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา ดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษา และการช่วยเหลือในทุกด้านจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชาติพิทย์ สิ้นยัง อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรฤตม์ ชัยวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ ดร. อภิชน วัชรนทร์วงศ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ามาร่วมเป็นคณะกรรมการสอบ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ดีชม เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้ทำการวิจัย

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี และสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือ

ขอขอบคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ที่มอบทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ประเภททุนบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาโท ประจำปี 2563

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวสำหรับความรัก ความเอาใจใส่ และความเข้าใจ ที่มีให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา รวมทั้งคอยสนับสนุนเงินทุนในการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจตลอดมา

ปนัดดา คลั่งคล้าย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
สารบัญตาราง	(14)
สารบัญรูป	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ถ่านกัมมันต์	5
2.1.1 พื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์	5
2.1.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์	7
2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	8
2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ	8
2.2.2 การคาร์บอนไนเซชัน	8
2.2.3 การกระตุ้น	9
2.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์	12
2.4 การดูดซับ	13
2.4.1 รูปแบบของการดูดซับ	13
2.4.2 กลไกการดูดซับ	15
2.4.3 สมดุลการดูดซับ	16
2.5 จลนศาสตร์การดูดซับ	16
2.5.1 สมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)	16
2.5.2 สมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	18
2.6.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)	18
2.6.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)	19
2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	20
2.7.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ	20
2.7.2 ธรรมชาติของสารถูกดูดซับ	20
2.7.3 อัตราเร่งการปั่นกววน	20
2.7.4 อุณหภูมิ	20
2.7.5 พีเอช	20
2.8 สารอินทรีย์ระเหย	21
2.8.1 ลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์ระเหย	21
2.8.2 การปล่อยสารอินทรีย์ระเหย	21
2.8.3 มลพิษทางอากาศภายในอาคาร	22
2.8.4 เบนซีน และโทลูอีน	23
2.9 การเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ	24
2.9.1 หลักการของการดูดซับแบบพาสซีฟ	25
2.10 ไม้ยางพารา	25
2.11 เทคนิค และเครื่องมือในการวิเคราะห์	26
2.10.1 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์	26
2.10.2 การวิเคราะห์ชนิด และปริมาณสารอินทรีย์ระเหย	30
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
2.12.1 การศึกษาการสังเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์	31
2.12.2 การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ จลนศาสตร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับ	34
2.12.3 การศึกษาการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหย	37
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	39
3.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงาน ไม้ยางพาราแปรรูป	39
3.1.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ จากซีลีออยไม้อย่างพารา	40
3.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้อย่างพารา	42
3.2 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยโรงงานไม้อย่างพาราแปรรูป ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย	43
3.2.1 การเตรียมวัสดุสำหรับใช้ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	43
3.2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	44
3.2.3 การศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	47
3.2.4 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	48
3.2.5 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	48
3.2.6 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้อย่างพารา ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนภายในอาคาร	48
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล	50
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากซีลีออยโรงงาน ไม้อย่างพาราแปรรูป	50
4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ จากซีลีออยไม้อย่างพารา	50
4.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ จากซีลีออยไม้อย่างพารา	59
4.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้อย่างพารา	75
4.2 ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยโรงงานไม้อย่างพาราแปรรูป ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย	78
4.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	78
4.2.2 การศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	79
4.2.3 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	81
4.2.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	85
4.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้อย่างพารา ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการทดลอง	92
5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์ จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป	92
5.1.2 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	94
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	105
ประวัติผู้เขียน	138

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	7
ตารางที่ 2.2	10
ตารางที่ 2.3	14
ตารางที่ 2.4	26
ตารางที่ 4.1	56
ตารางที่ 4.2	64
ตารางที่ 4.3	66
ตารางที่ 4.4	69
ตารางที่ 4.5	74
ตารางที่ 4.6	75
ตารางที่ 4.7	84
ตารางที่ 4.8	88
ตารางที่ 4.9	90
ตารางที่ ข.1	113
ตารางที่ ค.1	118
ตารางที่ จ.1	122
ตารางที่ จ.2	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ จ.3 ความเข้มข้นของเบนซีนต่อระยะเวลาในการสกัด	122
ตารางที่ จ.4 ความเข้มข้นของเบนซีนต่อระยะเวลาในการสกัด	122
ตารางที่ ฉ.1 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	124
ตารางที่ ฉ.2 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับโทลูอิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	124
ตารางที่ ช.1 ความสามารถในการดูดซับเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	126
ตารางที่ ช.2 ความสามารถในการดูดซับโทลูอิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	126
ตารางที่ ซ.1 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	128
ตารางที่ ซ.2 จลนศาสตร์การดูดซับโทลูอินแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	128
ตารางที่ ซ.3 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	129
ตารางที่ ซ.4 จลนศาสตร์การดูดซับโทลูอินแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	129
ตารางที่ ฅ.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	131
ตารางที่ ฅ.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	132
ตารางที่ ฅ.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของโทลูอิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	132
ตารางที่ ฅ.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	133
ตารางที่ ฅ.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโทลูอิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากซีเลื่อยไม้ยางพารา	133

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขนาด และการวางตัวของรูพรุน	6
รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารบนถ่านกัมมันต์	6
รูปที่ 2.3 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่	14
รูปที่ 2.4 กลไกการดูดซับ	15
รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์	18
รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช	19
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเบนซีน	23
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของโทลูอีน	24
รูปที่ 2.9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับทั้ง 5 แบบ	28
รูปที่ 3.1 ซี้ล้อยไม้ยางพาราที่ได้จากการคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 70	39
รูปที่ 3.2 กล้องทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้	44
รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของสารมาตรฐานเบนซีน	45
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของสารมาตรฐานโทลูอีน	46
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการวิจัยสรุปโดยรวม	49
รูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากซี้ล้อยไม้ยางพาราที่ผ่าน การคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)	51
รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากซี้ล้อยไม้ยางพาราที่ผ่าน การคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)	52
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากซี้ล้อยไม้ยางพาราที่ผ่าน การคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)	52
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากซี้ล้อยไม้ยางพาราที่ผ่าน การคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)	53
รูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันที่มีผลต่อร้อยละปริมาณถ่าน ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว	54
รูปที่ 4.6 แสดงร้อยละผลผลิตของการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	55

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพาราที่ทำการคาร์บอโนเซชัน ที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส	57
รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า	58
รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 5000 เท่า (ข) 10000 เท่า	58
รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า	59
รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 5000 เท่า (ข) 10000 เท่า	61
รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ กำลังขยาย (ก) 10000 เท่า และ (ข) 30000 เท่า	61
รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกที่ 40 เปอร์เซ็นต์ และไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ ที่กำลังขยาย (ก) และ (ข) 10000 เท่า	62
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ และไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ที่กำลังขยาย (ก) 10000 และ (ข) 20000 เท่า	62
รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้่างพารา ที่ทำการคาร์บอโนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ และไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ ที่กำลังขยาย (ก) 10000 เท่า และ (ข) 20000 เท่า	63

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 แสดงร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ร่วมกับไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ และคาร์บอนเฮกซันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	67
รูปที่ 4.17 หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพาราที่ทำการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเฮกซันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	69
รูปที่ 4.18 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา โดยไม่ทำการกระตุ้น และคาร์บอนเฮกซันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า	71
รูปที่ 4.19 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเฮกซันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า	71
รูปที่ 4.20 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเฮกซันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า	72
รูปที่ 4.21 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเฮกซันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า	72
รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า	75
รูปที่ 4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา	76
รูปที่ 4.24 การกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยั้งพารา	77
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอิน ต่อปริมาณตัวทำละลาย	78
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอิน ต่อระยะเวลาสกัด	79

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 ความสามารถในการดูดซับเบนซีนและโทลูอีน และระยะเวลาสัมพัทธ์	80
รูปที่ 4.28 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอันดับหนึ่งเทียม	81
รูปที่ 4.29 จลนศาสตร์การดูดซับโทลูอีนแบบอันดับหนึ่งเทียม	82
รูปที่ 4.30 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอันดับสองเทียม	82
รูปที่ 4.31 จลนศาสตร์การดูดซับโทลูอีนแบบอันดับสองเทียม	83
รูปที่ 4.32 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของเบนซีน	85
รูปที่ 4.33 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของโทลูอีน	86
รูปที่ 4.34 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของเบนซีน	86
รูปที่ 4.35 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโทลูอีน	87
รูปที่ 4.36 หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา และถ่านกัมมันต์ ทางการค้าชนิด A ที่ผ่านการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน	91
รูปที่ ก.1 เครื่อง Thermogravimetric Analysis	108
รูปที่ ก.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer	108
รูปที่ ก.3 เครื่อง Scanning Electron Microscope	109
รูปที่ ก.4 เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer	109
รูปที่ ก.5 เครื่อง Gas Chromatography	109
รูปที่ ข.1 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนเซชันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต	111
รูปที่ ข.2 หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า แตกต่างกัน	113

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
BDDT	Brunauer-Deming-Deming and Teller
BET	Brunauer Emmett and Teller
BTEX	Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene
FT – IR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
GC	Gas Chromatography
GC/FID	Gas Chromatography Flame Ionization
H ₃ PO ₄	Phosphoric acid
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
SEM	Scanning Electron Microscope
TGA	Thermogravimetric Analysis
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
VOCs	Volatile Organic Compounds
มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
°C	องศาเซลเซียส
cm ³ /g	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม
g/ml	กรัมต่อมิลลิลิตร
l/mg	ลิตรต่อมิลลิกรัม
m ² /g	ตารางเมตรต่อกรัม
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
nm	นาโนเมตร
p/p0	ความดันสัมพัทธ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันได้มีการกระจายตัวของสังคมเมืองออกไปสู่พื้นที่โดยรอบมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการที่อยู่อาศัยเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยพบว่าคอนโดมิเนียมเป็นที่อยู่อาศัยที่ตอบโจทย์ของสังคม ณ ปัจจุบันด้วยปัจจัยเรื่องพื้นที่ใกล้แหล่งความเจริญ ความสะดวก และความปลอดภัย เป็นต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในแง่ของสภาพแวดล้อมพบว่า ไม่เป็นไปตามความเจริญของพื้นที่โดยเฉพาะในประเด็นของสภาพอากาศโดยรอบ เนื่องจากคอนโดมิเนียมส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นอาคารปิดหรือมีลักษณะการก่อสร้างระหว่างตึกสูงทำให้เกิดการปิดกั้นการถ่ายเทของอากาศจากภายในสู่ภายนอกอาคาร นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวพบว่า มีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศ อาทิเช่น สถานที่ตั้งอาคารอยู่ใกล้ทางหลวง และถนนที่มีการจราจรคับคั่ง งานปรับปรุงอาคาร และการบำรุงรักษา รวมถึงการตกแต่งอาคารที่ทำให้เกิดฝุ่น กลิ่น สี และสิ่งปนเปื้อนหมุนเวียนภายในอาคาร เป็นต้น (นภदनัย, 2554 และ กัญญา, 2559) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจสอบมลพิษที่เกิดขึ้นพบว่า มีกลุ่มสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds : VOCs) ปนเปื้อน โดยสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารมีแหล่งกำเนิดจากสถานที่ต่าง ๆ อาทิเช่น บริเวณห้องน้ำ ห้องทำงาน สำนักงานที่กำลังปรับปรุง และอาคารใหม่ โดยพบความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารสูงกว่าภายนอก 97 เปอร์เซ็นต์ของการวัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด โดยพบในช่วง 23 – 52 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Goodman *et al.*, 2018) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาข้อมูลของหน่วยงาน United States Environmental Protection Agency : US-EPA ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่รายงานว่า แหล่งที่มาของสารอินทรีย์ระเหยสูงสุด 3 ลำดับ ลำดับแรกมาจากการใช้สารเป็นตัวทำละลายร้อยละ 29 จากยานพาหนะร้อยละ 28 และจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมร้อยละ 11 ดังนั้น สารอินทรีย์ระเหยจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศภายในอาคาร โดยปล่อยออกมาจากพื้น กาว สี ผลิตภัณฑ์เคลือบผิว ทินเนอร์ และแลคเกอร์ เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2554 และ Molhave *et al.*, 1997)

เมื่อพิจารณาในประเด็นของสีทาอาคารพบว่า มีองค์ประกอบ 4 ชนิด คือ สารนำสี ตัวทำละลาย ผงสี และสารปรุงแต่ง โดยตัวทำละลายในสีพบว่า เป็นตัวที่มีองค์ประกอบของกลุ่มอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน กลุ่มเอสเทอร์ และกลุ่มอีเทอร์ ซึ่งเป็นที่มาของสารอินทรีย์ระเหยในอาคาร และเมื่อมีการศึกษาเกี่ยวกับประเภทสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบ และการรายงานว่าตรวจพบสารฟอร์มัลดีไฮด์ เบนซีน โทลูอิน และไซลีน เป็นหลัก ในกรณีของอาคารที่มีการซ่อมแซม ชัดเงา และใช้เฟอร์นิเจอร์ใหม่ (Srivastava *et al.*, 2000 และ Goodman *et al.*, 2018) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาความเข้มข้นของ

เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylene) หรือ สารกลุ่ม BTEX ในอาคารพบว่า ห้องที่มีการทาสีใหม่มีความเข้มข้นของโทลูอินสูงสุดเท่ากับ 663 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมาเป็นไซลีน (m/p-xylene) เท่ากับ 100 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Ilgen *et al.*, 2001) และเมื่อพิจารณาข้อมูลในแง่ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยที่ถูกปล่อยจากอาคารพบว่า มีผลต่อสุขภาพของผู้อาศัยในอาคาร และสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะเบนซีนและฟอร์มาลดีไฮด์เป็นหนึ่งในสารก่อมะเร็ง (Kim *et al.*, 2006, Klett *et al.*, 2014 และ Zhang *et al.*, 2009) โดยสารอินทรีย์ระเหยส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้หลายลักษณะ อาทิเช่น ก่อความรำคาญเนื่องมาจากกลิ่นของสารอันตรายจากการระเหยและอ็อกซีไคย และมีพิษต่อร่างกายแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการดูดซึมจากการกินหรือกลิ่นเข้าทางปาก และโดยการสัมผัสดูดซึมผ่านทางผิวหนัง เป็องต้นอาจก่อให้เกิดอาการผื่นคัน แสบตา น้ำตาไหล และหายใจขัด เมื่อได้รับในปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ และระบบต่าง ๆ ในร่างกาย กรณีที่มีการสะสมในร่างกายอาจก่อให้เกิดมะเร็ง โดยมีการรายงานว่ บางตัวสามารถสะสมในร่างกายได้นานถึง 30 ปี (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดแนวทางในการแก้ไข และกำจัดสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งมีวิธีที่สามารถกำจัดได้หลากหลายวิธี เช่น การเผา การควบแน่น การกระบวนการทางชีวภาพ การดูดซับ เป็นต้น ซึ่งการดูดซับได้รับการยอมรับว่ เป็นการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ โครงสร้างรูพรุนและความสามารถในการดูดซับสูง นอกจากนั้นสามารถนำมาคืนสภาพใหม่ได้ (Zhang *et al.*, 2017) และจากการศึกษาพบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ เป็นวิธีการที่นิยมในปัจจุบัน โดยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นวัสดุที่มีพื้นผิวภายในและความพรุนสูง มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ โดยทำให้วัสดุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นผิวสูง (รุจิรา, 2556) และในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุเหลือใช้ และชีวมวลมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมาก อาทิเช่น ถั่วชานอ้อย กากกาแฟ ถั่วแมคคาเดเมีย ฝ้าย ไม้ไผ่ และเปลือกกล้วยาง เป็นต้น (ทองฉัตร และ พรสวรรค์, 2559, Dejang *et al.*, 2015, Duan *et al.*, 2017, Liu *et al.*, 2010 และ Sun and Jiang, 2010) โดยกระบวนการพัฒนาถ่านกัมมันต์ให้มีพื้นที่ผิวสูงจากวัตถุดิบแต่ละประเภททำได้โดยการกระตุ้นทางกายภาพ และทางเคมีหรือทั้งสองทางร่วมกัน (Bansode *et al.*, 2004) โดยในการพิจารณากระบวนการกระตุ้นจะคำนึงถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ การขจัดสารปนเปื้อนในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ และการนำไปใช้งาน เป็นหลัก (Dias *et al.*, 2007 และ สัมฤทธิ์, 2558) จากการศึกษพบว่า วิธีการให้ความร้อนในการกระตุ้นร่วมกับกรดฟอสฟอริกมีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ และเมื่อทำการกระตุ้นโดยการให้ความร้อนด้วยเทคนิคไมโครเวฟ ยิ่งทำให้มีอัตราการกระตุ้นที่เร็ว และผลผลิตถ่านกัมมันต์สูงกว่าการกระตุ้นด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชันปกติ (Liu *et al.*, 2010)

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ส่วนใหญ่ปลูกในพื้นที่ภาคใต้ ไม้ยางพาราสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์หลากหลายโดยนำมาแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ และผลิตภัณฑ์ไม้เพื่อส่งออก ซึ่งการตัดโค่นไม้ยางพารามีของเสียที่เกิดขึ้นในรูปแบบขี้เลื่อยและเศษไม้ในปริมาณ 3 ตันต่อไร่ (กระทรวงพลังงาน, 2564) และในปีพ.ศ. 2556 มีโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราประมาณ 561 โรงงาน ซึ่งโรงงานการผลิตไม้ยางพาราแปรรูปส่วนใหญ่จะมีการจำหน่ายให้กับผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ (สถาบันวิจัยยาง, 2555) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป โดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ร่วมกับการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ เพื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารได้แก่ เบนซีน และโทลูอีน ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเศษไม้ยางพาราในรูปแบบผลิตภัณฑ์ และเพิ่มทางเลือกในการลดของเสียจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เพื่อลดพื้นที่ในการกำจัดในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพร้อมกับไมโครเวฟ

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีนและโทลูอีนภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้ใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ได้จากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งเป็นขี้เลื่อยที่อยู่ในรูปของเสียที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปไม้ยางพารา

1.3.2 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ ร้อยละผลผลิต หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ และลักษณะพื้นผิวและความเป็นรูพรุน

1.3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 800 และ 1000 วัตต์ การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ลักษณะพื้นผิวและความเป็นรูพรุน และการวิเคราะห์พื้นผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

1.3.4 ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยการวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร

1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีนและโทลูอีนด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยการทดสอบการดูดซับในกล่องทดลองแบบพาสซีฟในห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นเบนซีนและโทลูอีนโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีชนิดเฟลมไอออนไนซ์เซชัน

1.3.6 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเบนซีนและโทลูอีน โดยการหาปริมาณตัวทำละลาย และระยะเวลาในการสกัด

1.3.7 ศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับเบนซีนและโทลูอีน จากนั้นศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพร้อมกับไมโครเวฟที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีนและโทลูอีนภายในอาคาร

1.4.2 เพิ่มทางเลือกให้กับการเพิ่มมูลค่าขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีศักยภาพในการดูดซับสารเบนซีน และโทลูอีน

1.4.3 เพิ่มทางเลือกในการลดของเสียจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เพื่อลดพื้นที่ในการกำจัด

บทที่ 2

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถ่านกัมมันต์

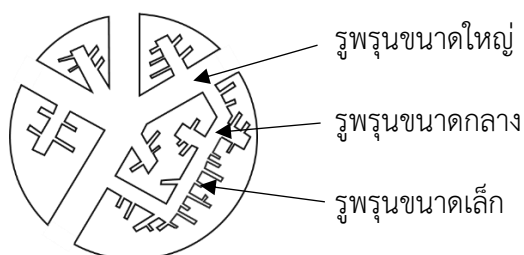
ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) คือ วัสดุที่มีพื้นผิวภายในและมีความพรุนสูง เป็นการนำวัสดุดิบจากธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ทำให้วัสดุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุน และมีพื้นผิวสูง (รุจิรา, 2556) เป็นถ่านที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพของการดูดซับให้มากขึ้น โดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ โครงสร้างที่มีลักษณะความเป็นรูพรุน พื้นผิวสูงและมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บนผิวและรูพรุนเหล่านั้น ทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง และสามารถดูดซับสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้ (พรรษกร, 2549) โดยวัสดุดิบที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด ส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไม้ไผ่ ไม้ยางพารา แกลบ กะลามะพร้าว ถ่านหิน เป็นต้น (เฉลิมพร, 2557) ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) 900 – 2547 ระบุว่า ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีสมบัติดูดซับสี กลิ่น รสบางชนิดได้เป็นอย่างดี โดยถ่านชนิดนี้มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถผลิตได้จากถ่านหิน ถ่านไม้หรือถ่านกะลามะพร้าวด้วยวิธีก่อกัมมันต์หรือการกระตุ้น

2.1.1 พื้นผิว และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ้ามีพื้นผิวมาก รูพรุนก็จะมาก ถ้ามีพื้นผิวน้อย รูพรุนก็จะน้อย โดยการเลือกใช้ตัวดูดซับมักพิจารณาขนาดของรูพรุนเป็นอันดับแรก เนื่องจากโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะต้องมีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุน ซึ่งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ในการผลิตจากวัสดุ และวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน ผิวของถ่านกัมมันต์ก็จะมีลักษณะรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนแตกต่างกันด้วย รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะของรูพรุนเปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด (ศศิกร, 2554) ซึ่งได้แบ่งขนาดรูพรุนตามมาตรฐานของระบบ IUPAC เป็น 3 ขนาด (Biniak *et al.*, 2001) แสดงดังรูปที่ 2.1

ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สามารถแบ่งได้ มีดังนี้

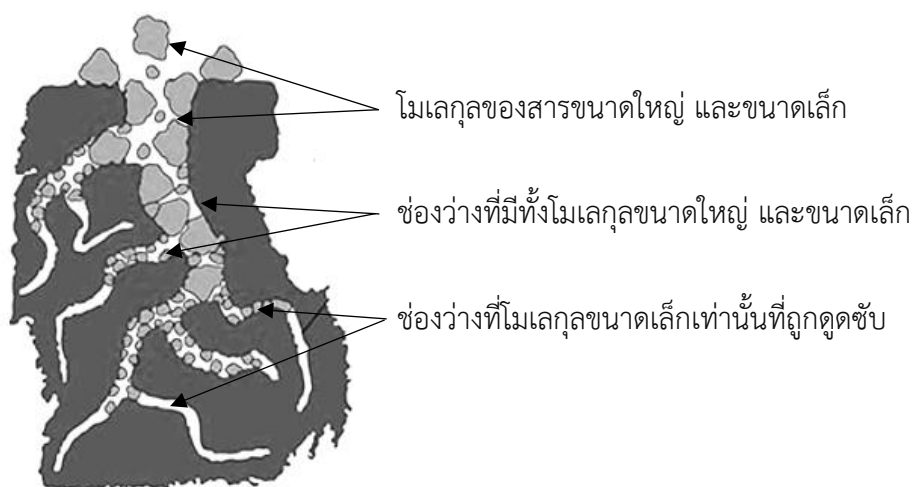
- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) : มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) : มีขนาดรูพรุน 2 – 50 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) : มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร



รูปที่ 2.1 ขนาด และการวางตัวของรูพรุน

ที่มา : Biniak *et al.*, 2001

โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดจะเคลื่อนที่ไปบริเวณเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์ก่อนจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนใหญ่ (Macropores) จากนั้นมีการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) และขนาดเล็กต่อไป (Micropores) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารบนถ่านกัมมันต์

ที่มา : Radovic and Rodriguez-Reinoso, 1997

โดยสารจะเคลื่อนที่เข้ารูพรุนขนาดเล็กได้ก็ต่อเมื่อสารที่ถูกดูดติดนั้นมีขนาดไม่ใหญ่กว่ารูพรุนขนาดเล็ก ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่าน รูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวการดูดซับ และมีพลังงานดูดซับมากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่ความดันต่าง ๆ และรูพรุนขนาดเล็กจะมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกว่า การกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) ถ่านกัมมันต์จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และวิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ (ศศิกร, 2554)

2.1.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งตามเกณฑ์ต่าง ๆ ได้หลายชนิด ดังนี้

2.1.2.1 แบ่งตามชนิดสารกระตุ้น การกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon) เป็นการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีโดยการทำปฏิกิริยาเคมีกับฟิวคาร์บอน มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดซับก๊าซ และไอระเหย

2.1.2.2 แบ่งตามขนาดรูพรุน ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์เป็น 3 ประเภท คือ รูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) จะใช้ในการดูดซับก๊าซหรือสารระเหย รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มักมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน โดยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติ	รูพรุนขนาดเล็ก	รูพรุนขนาดกลาง	รูพรุนขนาดใหญ่
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (nm)	น้อยกว่า 2	2 – 50	มากกว่า 50
พื้นที่ผิว (m ² /g)	100 – 1,000	10 – 100	0.5 – 2
ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	0.15 – 0.5	0.02 – 0.1	0.2 – 0.5

ที่มา : ปรินทร, 2551

2.1.2.3 แบ่งตามความหนาแน่น แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ (น้อยกว่า 0.35 กรัมต่อมิลลิลิตร) เป็นถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การทำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น และถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง (มากกว่า 0.45 กรัมต่อมิลลิลิตร) เป็นถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้ในการดูดซับก๊าซพิษหรือไอระเหยให้อัตราการดูดซับที่สูง

2.1.2.4 แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง ซึ่งแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder activated carbon : PAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่บดละเอียดจนสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดหรือชนิดเม็ด (Granular activated carbon : GAC) ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัดหรืออาจทำเป็นเกล็ด และถ่านกัมมันต์แบบเป็นแท่ง (Extruded) ใช้เพื่อการดูดซับสารปนเปื้อนที่ต้องการอัตราการดูดซับสูง ๆ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและแบบขึ้นรูปเป็นแท่งมีการใช้งานมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดผง เนื่องจากสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ปัจจุบันกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิด วัตถุดิบ และคุณสมบัติ ถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเตรียม วัตถุดิบ การคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้น แสดงรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว ชี้เลื่อย แกลบ เปลือกถั่ว เมล็ดผลไม้ ยาง และถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือวัตถุดิบที่เป็นถ่าน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต แต่โดยทั่วไปการเตรียมวัตถุดิบ จะมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปเข้าสู่การคาร์บอนไนเซชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปทำการคาร์บอนไนเซชันก่อนแล้วจึงนำมาบดคัดขนาด (บุญชัย, 2536)

2.2.2 การคาร์บอนไนเซชัน

การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศหรือไร้ออกซิเจน เพื่อเป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของการสร้างรูพรุน โดยระหว่างการคาร์บอนไนเซชันธาตุและองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน รวมถึงสารระเหยต่าง ๆ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของก๊าซ และสารทาร์ ทำให้ได้ถ่านที่มีการจัดโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก (ธราพงษ์, 2554) โดยในขั้นแรกสารระเหยที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะถูกกำจัดออกไปก่อน จากนั้นสารอะโรเมติก และก๊าซไฮโดรเจนจะถูกขจัดออกตาม แต่ผลจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยเกิดจากสารทาร์บางส่วน ซึ่งจะถูกกำจัดออกในกระบวนการกระตุ้น (Yahya *et al.*, 2015) และในขั้นตอนของการคาร์บอนไนเซชันยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการกระตุ้นเข้ามาช่วยในการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ (ศศิกร, 2554)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนแรกของการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบที่ช่วงอุณหภูมิ 27 – 197 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเผาวัตถุดิบแบบไพโรไลซิส โดยทำให้เกิดก๊าซ และสารระเหยต่าง ๆ ในโครงสร้างหลุดออกมาที่ช่วงอุณหภูมิ 197 – 497 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนที่ 3 การเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ โดยช่วงนี้เป็นช่วงที่น้ำหนักของ วัตถุดิบจะลดลงไปมากที่ช่วงอุณหภูมิ 497 – 847 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนที่เหลืออยู่ จะเป็นคาร์บอนอิสระที่รวมตัวกันอยู่ในรูปแบบของถ่าน (วิจิตร, 2543)

การคาร์บอนเซชันเพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับสภาวะให้เหมาะสม โดยตัวแปรที่สำคัญของการคาร์บอนเซชันมีดังนี้

2.2.2.1 อุณหภูมิและเวลา อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณผลผลิต และเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการคาร์บอนเซชัน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณผลผลิตจะลดลง ส่วนสารระเหยและก๊าซที่ได้เพิ่มมากขึ้น และคุณสมบัติของสารระเหยจะมีกลุ่มโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น

2.2.2.2 อัตราความร้อน มีผลต่อคุณสมบัติของถ่าน และปริมาณของสารระเหย โดยการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้สารระเหยถูกปล่อยอย่างรวดเร็ว ทำให้ถ่านมีรูพรุนขนาดใหญ่ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าถ่านที่ให้ความร้อนด้วยอัตราที่ต่ำ เนื่องจากถ่านที่ได้จากการคาร์บอนเซชันด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูง คาร์บอนมีการเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า

2.2.2.3 ตัวกลางของปฏิกิริยา มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาการคาร์บอนเซชัน เนื่องจากก๊าซและไอที่เกิดขึ้นระหว่างการคาร์บอนเซชันถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งก๊าซที่เป็นตัวกลาง เช่น ก๊าซไนโตรเจน (เฉื่อยต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอน) และก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ถ้าใช้ตัวกลางเป็นก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ ปริมาณถ่านที่ได้จะน้อยกว่าตัวกลางที่เป็นก๊าซไนโตรเจน

2.2.2.4 ธรรมชาติของวัตถุดิบ วัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีสภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกัน ซึ่งในการคาร์บอนเซชันที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ต่างชนิดกันอาจมีวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด (ธราพงษ์, 2554)

2.2.3 การกระตุ้น

การกระตุ้น (Activation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอน ทำให้ถ่านเพิ่มปริมาณรูพรุนมากขึ้น ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ และเป็นการทำให้พื้นที่ผิวมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากมีโมเลกุลบางกลุ่มหลุดไป และเกิดส่วนที่มีความสามารถในการดูดซับขึ้นมาแทน รวมถึงการกระตุ้นช่วยในการกำจัดสารปนเปื้อนให้หลุดออกไปจากพื้นผิว และเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารที่ผิวของถ่านกัมมันต์

2.2.3.1 วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารเคมีเป็นสารกระตุ้น โดยการนำวัตถุดิบหรือวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนเซชันมาทำการผสมหรือแช่กับสารกระตุ้น (ธราพงษ์, 2554) เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน ซึ่งมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ เช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดออกจากเซลล์โลส และลิกนินที่เป็นส่วนประกอบในวัตถุดิบ (ศศิกร, 2554)

วิธีการกระตุ้นทางเคมี แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- แบบที่ 1 การนำวัตถุดิบทำการเผาในที่อวกาศ เพื่อทำให้เป็นถ่าน แล้วนำไปแช่หรือผสมกับสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นจึงทำการคาร์บอนเซชันกระตุ้นอีกครั้ง

- แบบที่ 2 การนำวัตถุดิบทำการแช่หรือผสมกับสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้นก่อน จากนั้นนำไปกระตุ้นแบบไพโรไลซิสควบคู่ไปกับการทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านในขั้นตอนเดียว

การกระตุ้นทางเคมีเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยการทำให้ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น และเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ สารกระตุ้น รวมถึงวิธีการอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย (ศศิกร, 2554)

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีมี 2 ปัจจัยหลัก คือ ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัตถุดิบนั้น และวิธีการกระตุ้น โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับชนิดของสารกระตุ้น และปริมาณสารกระตุ้น รวมถึงอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น (จิตตรี, 2552)

ตัวอย่างวิธีการกระตุ้นทางเคมี ดังนี้

- การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) : เป็นการใช้สารละลายกรด นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการนำวัตถุดิบไปแช่หรือผสมในกรดฟอสฟอริก เพื่อให้กรดฟอสฟอริกแทรกซึมอยู่ทั่วเนื้อถ่าน จากนั้นนำไปเผา โดยกรดที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ด้วยตัวเอง เกิดการกัดกร่อนขึ้นทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น ซึ่งข้อดีของการใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกคือ ร้อยละของผลผลิตถ่านกัมมันต์ที่ได้ค่อนข้างสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นไม่สูงนัก และยังสามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (จิตตรี, 2552) คุณสมบัติของสารละลายกรดฟอสฟอริก แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของกรดฟอสฟอริก

คุณสมบัติ	ค่าประมาณ
น้ำหนักโมเลกุล	98
สถานะ	ของเหลว
สี	ไม่มีสี
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.75
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	25
จุดเดือด ($^{\circ}C$)	213

ที่มา : ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี, 2546

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมี คือ ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำกว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นน้อยกว่า และผลผลิตที่ได้มากกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ แต่มีข้อเสีย คือ ต้องล้างสารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนใช้งาน และอาจมีสารเคมีตกค้างบนถ่านกัมมันต์ได้ โดยปัญหาการกัดกร่อน และมีการตกค้างของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์โดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ในกระบวนการผลิตจึงทำให้นิยมใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้นกันมากขึ้น (Wu *et al.*, 2013)

2.2.3.2 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยนำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนในเซชันแล้วมาทำปฏิกิริยากับก๊าซที่ใช้ในการออกซิไดซ์ (ธราพงษ์, 2554) โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ให้สูงขึ้น เนื่องจากมีรูพรุนกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่าง ๆ เช่น ไออน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยาของการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนได้เพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ และปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบนั้น คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ในการกระตุ้น อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา (Hassler, 1967)

ตัวอย่างวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ มีดังนี้ (พรชกร, 2549)

- การกระตุ้นด้วยไออน้ำ : เป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างรูพรุนได้อย่างรวดเร็ว และสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้ ซึ่งการใช้ไออน้ำเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอนนั้นถือว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยทั่วไปกระตุ้นที่อุณหภูมิประมาณ 760 – 950 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.1



ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่ของไออน้ำ ดังนั้นอุณหภูมิในการกระตุ้นจึงไม่ควรสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะถ้าอุณหภูมิสูงเกินกว่านี้ อะตอมของคาร์บอนที่อยู่ชั้นนอกถูกเผาไหม้ ทำให้ขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคลดลงได้

- การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ : เป็นการใช้ออกซิไดซ์คาร์บอนให้เป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการที่ 2.2



จากค่า ΔH จะเห็นได้ว่า ปฏิกริยานี้ต้องการพลังงานความร้อนมากกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นประมาณ 850 – 1,100 องศาเซลเซียส

- การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ : ปัจจุบันได้มีการนำไมโครเวฟมาช่วยในการให้ความร้อนอย่างมาก เนื่องจากไมโครเวฟเป็นคลื่นที่มีความถี่สูง โดยการกระตุ้นในชั้นแรกคลื่นไมโครเวฟจะไปเร่งการเกิดประกายไฟอย่างรุนแรงรอบชั้นคาร์บอน คลื่นไมโครเวฟที่กระทบชั้นคาร์บอนจะทำให้เกิดความร้อนในคาร์บอนภายในหนึ่งนาทีก (Foo and Hameed, 2012) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนช่วงเวลาสั้น ๆ และเร็วกว่าระบบอื่น การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟมีข้อดีคือ ประหยัดเวลา ประหยัดพลังงานไฟฟ้า สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว และมีการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ เช่น การดูดซับ ปริมาตรรูพรุนและผลผลิตถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับสภาวะของการให้คลื่นไมโครเวฟ และในปัจจุบันนิยมนำไมโครเวฟมาใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ เนื่องจากทำให้ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร) (Hesas *et al.*, 2013) ทำให้อัตราการกระตุ้นเร็วขึ้น และผลผลิตถ่านกัมมันต์สูงกว่าการให้ความร้อนแบบวิธีทั่วไป (Liu *et al.*, 2010)

ข้อดีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพสามารถนำไปใช้ได้เลย เพราะไม่เกิดปัญหาเรื่องสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูง ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน และรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพจะเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางเคมี

2.3 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (มอก. 900 – 2547)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสี กลิ่น รส บางชนิดได้เป็นอย่างดี โดยถ่านชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งสามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้จากถ่านหิน ถ่านกะลามะพร้าว ถ่านไม้หรือถ่านกระดุกด้วยกรรมวิธีก่อถ่านกัมมันต์

ค่าไอโอดีน (Iodine number) หมายถึง จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับเป็น 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร โดยเกณฑ์การกำหนดค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของถ่านกัมมันต์ต้องไม่น้อยกว่า 600 (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งใช้วิธีการทดสอบตาม AWWA B 600

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง มีความละเอียดจนสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ต้องเป็นผงสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ และคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ด้านความหนาแน่นปรากฏต้องอยู่ในช่วง 0.02 – 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยวิธีการทดสอบตาม AWWA B 600 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547)

2.4 การดูดซับ

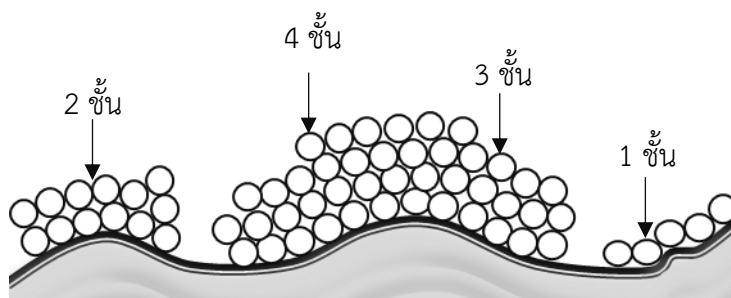
การดูดซับ (Adsorption) หรือการดูดติดผิว เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณผิวสัมผัส ซึ่งเกิดจากการสัมผัสกับสารดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารสองสถานะ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลของก๊าซจะเกาะติดอยู่บนผิวของของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งโมเลกุลที่ไปเกาะบนตัวดูดซับเรียกว่า “สารถูกดูดซับ” (Adsorbate) และของแข็งที่ให้โมเลกุลเกาะบนพื้นผิวอยู่นั้นเรียกว่า “ตัวดูดซับ” (Adsorbent) (จิตตรี, 2552)

2.4.1 รูปแบบของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ และผิวตัวดูดซับ โดยเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการดูดซับออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี แสดงรายละเอียด ดังนี้

2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยแรงของการดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ไม่มีพลังงานกระตุ้น และคุณสมบัติทางเคมีของสารถูกดูดซับและตัวดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayer) และจำนวนชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง และเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.3

2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่สารถูกดูดซับยึดเกาะกับตัวดูดซับด้วยพันธะเคมี โดยสารถูกดูดซับเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งโดยส่วนใหญ่การดูดซับทางเคมีจะสามารถผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพว่า สามารถเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน และเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยการดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลสารถูกดูดซับที่เกาะอยู่บริเวณดังกล่าวจะเป็นการดูดซับชั้นเดียว (Monolayer) และสามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น
ที่มา : นิพนธ์ และคณิตา, 2550

ตารางที่ 2.3 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
- ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (ช่วง 20 – 40 kJ/mol)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol)
- สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่จำเพาะเจาะจง (สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจงสูง (เลือกดูดซับสารบางชนิดขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
- อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิกว้าง
- ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น และไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับได้
- แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน แม้อาจเกิดสภาพมีขั้วของสารถูกดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับและสารดูดซับ
- สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับ และมีพลังงานของการกระตุ้นของการดูดซับสูง
- อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานของการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารถูกดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวภายในของสารถูกดูดซับ

ที่มา : อภิชน และคณะ, 2561

2.4.2 กลไกการดูดซับ

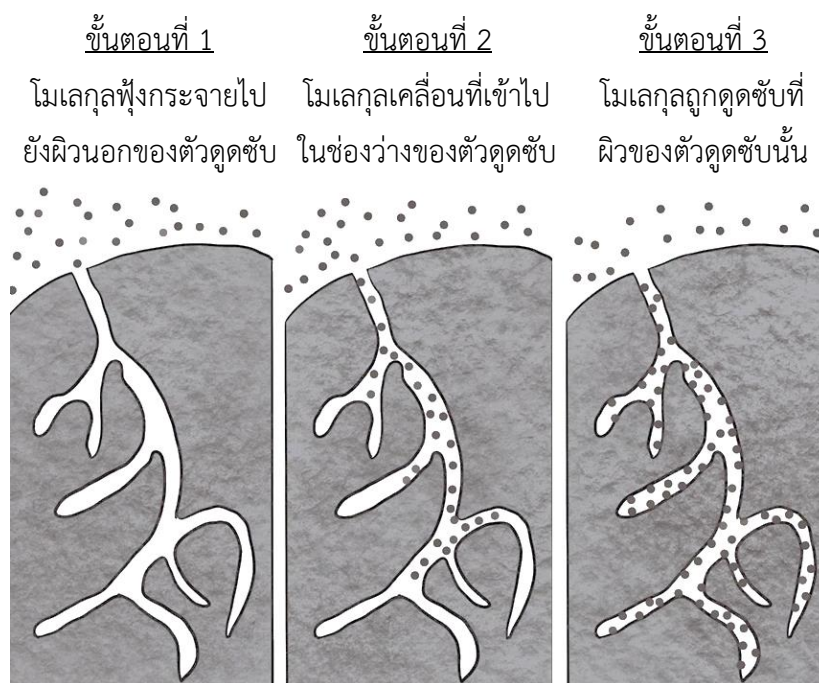
กลไกการดูดซับก๊าซบนตัวดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นกลไกการดูดซับโดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม เป็นการแพร่กระจายของโมเลกุลก๊าซแทรกผ่านชั้นของเหลวเข้าสู่ผิวด้านนอกของตัวดูดซับ

- ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกการดูดซับโดยที่โมเลกุลของก๊าซที่แพร่กระจายจากพื้นที่เล็ก ๆ ของผิวนอกเข้าไปยังโพรงช่องว่างภายในของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นในโพรงช่องว่างเหล่านี้ เนื่องจากลักษณะของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความเหมาะสมกับรูปร่างของโมเลกุลของก๊าซ

- ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวจะเป็นกลไกของการดูดซับ โดยที่โมเลกุลของก๊าซจะเกาะติดที่ผิวในโพรงช่องว่างของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อมาเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรพิจารณาถึงความต้านทานที่เกิดจากพื้นผิวของตัวดูดซับด้วย (นพภาพร และคณะ, 2547)

ขั้นตอนการดูดซับก๊าซบนของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดซับ

ที่มา : นพภาพร และคณะ, 2547

2.4.3 สมดุลการดูดซับ

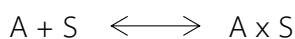
สมดุลการดูดซับสาร (Adsorption equilibria) เป็นการบ่งบอกถึงลักษณะไอโซเทอร์มของความสามารถในการดูดซับของสารที่สภาวะสมดุล โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับในสารละลายที่สัมผัส และมีความสมดุลกับสารดูดซับหรือกล่าวได้ว่า สมดุลการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับ และการคายการดูดซับเท่ากัน โดยที่ค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเท่ากับค่าความเข้มข้นในตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ และลักษณะของไอโซเทอร์มเป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น (อภิชน และคณะ, 2561)

2.5 จลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetic) เป็นการศึกษาเพื่ออธิบายถึงอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นด้วยอัตราการดูดซับแบบช้าหรือแบบเร็ว จลนศาสตร์การดูดซับที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และแบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งเป็นแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่สามารถอธิบายกลไกการดูดซับระหว่างสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับ (สรวุฑ, 2550)

2.5.1 สมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)

แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมใช้ในการอธิบายอัตราการดูดซับของเหลวและของแข็ง โดยที่จลนศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียมอยู่ในสภาวะการดูดซับที่สมดุล ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายมีความแปรผันตรงกับเวลาของการดูดซับ โดยพิจารณาถึงสมดุลการผันกลับของโมเลกุล สารอินทรีย์ที่ถูกดูดซับระหว่างพื้นผิวของเหลวและของแข็ง รวมทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับการดูดซับในระบบที่ซับซ้อนได้ (อภิชน และคณะ, 2561) สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้ ดังนี้



โดยที่ A คือ สารถูกดูดซับ (Adsorbate) และ S คือ ตัวดูดซับ (Adsorbent) และ A x S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound) ซึ่งสามารถเขียนสมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.3)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.3 โดยมีขอบเขตเวลา $t = 0$ จนถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = q_t$ จะได้ ดังสมการที่ 2.4

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.4)$$

หรือสามารถเขียนในรูปแบบของ log จะได้ ดังสมการที่ 2.5

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2.5)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)

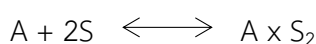
q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_t และ t จะได้ค่าคงที่ q_e และ k_1 โดยค่า k_1 ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายเพิ่มขึ้น (สรวุฑ, 2550)

2.5.2 สมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)

แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมใช้ในการอธิบายอัตราการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับภายใต้สมมติฐานที่กล่าวไว้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับบนตัวดูดซับจะคงที่ และจำนวนตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่เกิดพันธะทั้งหมดจะขึ้นกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล (อภิชน และคณะ, 2561) สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้ ดังนี้



สามารถเขียนสมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมได้ ดังสมการที่ 2.6

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.6)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.6 โดยมีขอบเขตเวลา $t = 0$ จนถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = q_t$ จะได้ ดังสมการที่ 2.7

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟเส้นตรงระหว่าง t/q_t กับ t จะได้ความชันของกราฟเท่ากับค่า $1/q_e$ และค่า Y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$ โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที)

2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สภาวะสมดุลกับปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ โดยเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับมีหลายรูปแบบ ดังนี้

2.6.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวน และมีตำแหน่งที่แน่นอน โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน (ปริญทร, 2551)

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ ดังสมการที่ 2.8

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.8)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับมากที่สุดแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

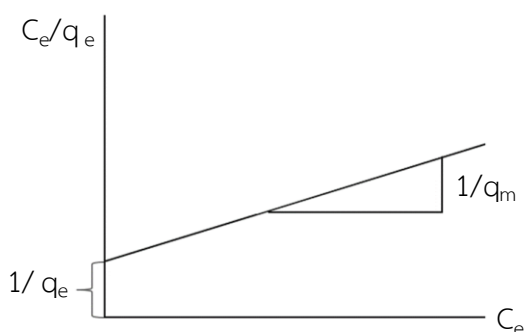
K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.9)$$

อธิบายเป็นกราฟสมการเส้นตรงได้ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

ที่มา : สราวุธ, 2550

2.6.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

เป็นไอโซเทอร์มที่ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ และมีการรวมพื้นผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับที่เท่ากันและเข้าด้วยกัน (ปริญทร, 2551) ซึ่งการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ ดังสมการที่ 2.10

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.10)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกละลายในสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

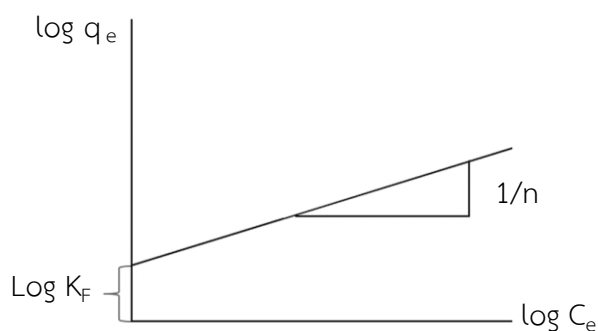
K_F คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.11

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.11)$$

อธิบายเป็นกราฟสมการเส้นตรงได้ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ที่มา : สราวุธ, 2550

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ K_F จะได้จุดเป็นตัดแกน y และค่า $1/n$ ได้จากความชันของกราฟ

เมื่อพิจารณาค่า $1/n$ อธิบายได้ว่า ถ้าค่า $1/n$ เท่ากับ 1 แสดงว่าไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นเส้นตรง แต่ถ้าค่า $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงว่าความสามารถในการดูดซับที่บริเวณพื้นผิวดูดซับมีปริมาณจำกัด และถ้าค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงว่าบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากพอสำหรับการดูดซับ (วรวิทย์, 2558)

2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.7.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ และเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังไม่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับได้ ซึ่งโครงสร้างรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับก็อยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับควรมีพื้นที่ผิวมาก และมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับสารที่ถูกดูดซับด้วย

2.7.2 ธรรมชาติของสารถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลสารถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลสารถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เนื่องจากก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับโมเลกุลน้ำ เพื่อให้โมเลกุลสารถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวตัวดูดซับ และโมเลกุลของสารถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลงจึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

2.7.3 อัตราเร่งการปั่นกววน

อัตราเร็วการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) แล้วแต่การปั่นกววนของระบบ แต่ถ้าการปั่นกววนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุล สารถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับในทางตรงกันข้าม และถ้าการปั่นกววนสูงจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงเป็นขั้นตอนในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.7.4 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับด้วยอัตราการดูดซับที่เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.7.5 พีเอช

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด (พีเอชต่ำ) ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายพีเอชเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ OH^- บนพื้นผิวของ

ตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และยังสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีพีเอชสูงกว่า 9 ทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง (ศศิกร, 2554)

2.8 สารอินทรีย์ระเหย

2.8.1 ลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์ระเหย

สารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds : VOCs) หมายถึง สารประกอบที่มีคาร์บอนอินทรีย์ (Organic carbon) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีความดันไอมากกว่า 0.1 มิลลิเมตรปรอทที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท สามารถแบ่งสารอินทรีย์ระเหยออกตามลักษณะของโมเลกุลเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555) คือ

2.8.1.1 กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล (Non-chlorinated vocs or Non-halogenated hydrocarbons) ประกอบด้วยกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbons) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oils) เฮกเซน (Hexane) สารทำละลายในอุตสาหกรรม (Industrial solvents) และสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbons) เช่น โทลูอีน (Toluene) เบนซีน (Benzene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylenes) เป็นต้น

2.8.1.2 กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล (Chlorinated vocs or Halogenated hydrocarbons) สารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรม สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษสูงกว่าและเสถียรในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารในกลุ่มที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล เพราะมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่ทนทาน ยากต่อการสลายตัวในธรรมชาติ ทางกายภาพหรือโดยทางวิธีเคมีทั่วไป มีความคงตัวสูงและสะสมได้นาน รบกวนการทำงานของสารพันธุกรรมหรือยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ และมีฤทธิ์ในการก่อมะเร็งหรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้ สารในกลุ่มนี้ที่พบในสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เช่น ไตรคลอโรอีเทน (Trichloroethane) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl chloride) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene) เป็นต้น (อัญชลี, 2559)

2.8.2 การปล่อยสารอินทรีย์ระเหย

การปล่อยสารอินทรีย์ระเหยมี 4 กระบวนการ ดังนี้

2.8.2.1 การแพร่กระจายเป็นก๊าซที่แขวนลอย (Dispersion) เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการกระจายตัว และการเคลื่อนตัว มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ไหลเข้ามา และเกิดการหมุนเวียนของมวลอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่และแรงโน้มถ่วงโลก โดยสารอินทรีย์ระเหยที่ปล่อยออกมาจะแพร่กระจายเจือจางแตกต่างกันอยู่เหนือกลุ่มชั้นบรรยากาศ

2.8.2.2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (Physical transformation) สารอินทรีย์ระเหยจะรวมตัวกันแน่นเข้าไปในอนุภาคเกิดการดูดซับอยู่บนพื้นผิวหรือละลายในหยดน้ำ โดยสารอินทรีย์ระเหยจะเปลี่ยนจากสถานะก๊าซเข้าสู่กระบวนการที่สมดุล

2.8.2.3 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) สารอินทรีย์ระเหยจะมีการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นโมเลกุลอินทรีย์และอนินทรีย์ แต่ในทางกลับกันก็สามารถเกิดการแพร่กระจายและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (กระทรวงสาธารณสุข, 2555)

2.8.3 มลพิษทางอากาศภายในอาคาร

ภาวะมลพิษทางอากาศภายในอาคาร (Indoor air pollution) หมายถึง ภาวะที่อากาศภายในอาคารมีสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณ และระยะเวลาที่นานพอที่จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์หรือต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้น ๆ (นภคนัย, 2554) ซึ่งมลพิษทางอากาศภายในอาคารมีแหล่งที่มาของสารมลพิษ ดังนี้

2.8.3.1 สถานที่ตั้งอาคาร สถานที่ตั้งอาคารอยู่ใกล้กับบริเวณทางหลวง และถนนที่มีการจราจรอย่างคับคั่ง ซึ่งเป็นแหล่งของอนุภาคของแข็งที่ลอยอยู่ในอากาศ และสารมลพิษอื่น ๆ ในอาคารใกล้เคียง ที่ดินที่เคยใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรมหรือที่ดินที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงอาจจะทำให้เกิดการชะของน้ำหรือสารมลพิษเข้าสู่อาคารได้

2.8.3.2 การออกแบบระบบอาคาร และการบำรุงรักษา เมื่อการทำงานของระบบความร้อนเย็น และระบายอากาศภายในอาคารไม่เหมาะสม ความดันของอากาศภายในอาคารก็จะมีสภาพเป็นลบ ส่งผลให้สารพิษจากภายนอกแทรกซึมผ่านเข้ามา เช่น อนุภาคแขวนลอยในอากาศ คิวน์จากท่อไอเสีย และอากาศชื้น เป็นต้น

2.8.3.3 งานปรับปรุงอาคารใหม่ ขณะที่มีกำลังดำเนินการปรับปรุงนั้น อาจมีกลิ่น สี ฝุ่น และสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ จากวัสดุก่อสร้าง ซึ่งเป็นแหล่งสารมลพิษที่อาจจะหมุนเวียนอยู่ในอาคาร

2.8.3.4 การไหลเวียนอากาศเสียเฉพาะที่ เป็นการไหลเวียนอากาศของภายในห้องครัว ห้องน้ำ ร้านทำเล็บ ห้องซักรีด ร้านเสริมสวย และห้องถ่ายเอกซเรย์ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้อาจเป็นแหล่งของสารมลพิษถ้าหากไม่มีการระบายอากาศที่ดีพอ

2.8.3.5 วัสดุก่อสร้าง การนำวัสดุก่อสร้างมาใช้ เช่น ฉนวนกันความร้อน วัสดุกันเสียง ที่ชำรุดเสียหาย ผนัง เพดาน และพรม เป็นต้น อาจเป็นแหล่งของสารมลพิษทางอากาศภายในอาคารได้

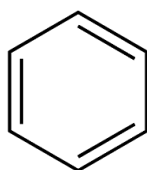
2.8.3.6 การตกแต่งอาคาร และการดูแลบำรุงรักษาอาคาร การใช้ของเพื่อตกแต่งอาคาร ได้แก่ เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ ซึ่งอาจปล่อยสารมลพิษสู่อากาศภายในอาคารได้ และในการดูแลบำรุงรักษาอาคาร ได้แก่ การใช้สารฆ่าแมลง สารทำความสะอาดหรือผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ

2.8.3.7 ผู้ใช้อาคาร สารมลพิษอาจมาจากตัวผู้ใช้อาคาร เกิดกิจกรรมของผู้ใช้อาคาร หรือผลิตภัณฑ์ที่ผู้ใช้อาคารใช้อยู่เป็นประจำ ได้แก่ น้ำหอมหรือโคโลญจน์ (กัญญา, 2559)

2.8.4 เบนซีน และโทลูอิน

เบนซีน และโทลูอิน เป็นสารอินทรีย์ระเหยในกลุ่ม BTEX ซึ่งสาร BTEX มีชื่อย่อที่ใช้เรียกสารอินทรีย์ระเหย 4 ชนิดรวมกัน คือ เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylene) สารกลุ่มนี้มีความดันไอสูงสามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ง่าย

2.8.4.1 เบนซีน (Benzene) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น C_6H_6 ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใส กลิ่นเหมือนน้ำมันปิโตรเลียม มีจุดวาบไฟ -11 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดเดือด 80 – 80.2 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 5.5 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย สามารถระเหยและติดไฟง่าย (ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี, 2546) สูตรโครงสร้างของเบนซีน แสดงดังรูปที่ 2.7



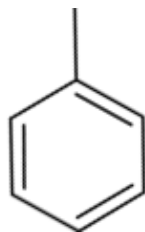
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเบนซีน

ที่มา : ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์, 2554

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน : การสัมผัสเบนซีนที่ระดับความเข้มข้นสูง ๆ โดยการหายใจส่งผลให้เกิดการกดของระบบประสาทส่วนกลาง หัวใจเต้นผิดจังหวะ ทำให้เซื่องซึม หน้ามืด ตาลาย หายใจเร็ว ปวดศีรษะ ใจสั่น มึนงง หมดสติ และเสียชีวิตได้ เนื่องจากระบบการหายใจล้มเหลว หากมีการสัมผัสเบนซีนโดยตรงทางการกินที่ระดับความเข้มข้นสูงอาจทำให้คลื่นไส้ อาเจียน ชีพจรเต้นเร็ว และหายใจเร็ว หากสัมผัสผิวหนังอาจทำให้เกิดรอยแดง แสบ และระคายเคืองตา ถ้าเบนซีนสัมผัสกับดวงตาอาจก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำลายกระจกตา (กระทรวงสาธารณสุข, 2555)

ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง : ความเป็นพิษจากการสัมผัสเบนซีนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เป็นระยะเวลานาน อาจมีอาการปวดศีรษะเล็กน้อย คลื่นไส้ เบื่ออาหาร และไม่สบายท้อง หากมีความเป็นพิษรุนแรง อาจเกิดความอ่อนเพลีย มองเห็นไม่ชัดเจน และหายใจลำบาก (กระทรวงสาธารณสุข, 2555) หรืออาจส่งผลกระทบต่อเม็ดเลือด เช่น เม็ดเลือดแดง เม็ดเลือดขาวหรือเกร็ดเลือดลดลง

2.8.4.2 โทลูอิน (Toluene) เป็นสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตรโมเลกุลเป็น C_7H_8 ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ -93 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่ 110.6 องศาเซลเซียส (ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี, 2546) สูตรโครงสร้างของโทลูอิน แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของโทลูอิน

ที่มา : ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์, 2554

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน : ไอรระเหยของโทลูอินทำให้เกิดการระคายเคืองจมูก คอ และทางเดินหายใจ มีอาการไอ แขนงหน้าอก และปวดบวมน้ำ หากมีการสัมผัสที่ผิวหนังทำให้ผิวหนังแดง เกิดผื่นแพ้ และอาจเกิดตุ่มน้ำขึ้น หากเข้าตาจะทำให้ระคายเคืองตา แต่ถ้ามีอาการหนักอาจเกิดเยื่อตาขาวบวม และกระจกตาบวมได้ มีฤทธิ์ต่อกล้ามเนื้อหัวใจ ทำให้หัวใจเต้นผิดจังหวะเป็นเหตุให้ผู้ที่สัมผัสปริมาณสูงอาจเสียชีวิตแบบฉับพลันได้

ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง : การสัมผัสโทลูอินในระยะยาวหรือจากการทำงานที่ไม่มีการควบคุม อาจทำให้มีอาการมึนเมา อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ วิงเวียน เบื่ออาหาร กล้ามเนื้ออ่อนแรง ความจำไม่ดี ตับเสื่อม ไตเสื่อม และระดับเกล็ดเลือดในเลือดผิดปกติ (อัญชลี, 2559)

2.9 การเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ

การเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ (Passive sampling) เป็นการเก็บตัวอย่างโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซจากความเข้มข้นสูงไปยังความเข้มข้นต่ำ ณ สภาวะคงที่ โดยการดูดซึมทางเคมีหรือทางกายภาพบนตัวกลางที่ทำให้เกิดการอิมมัลชันด้วยสารประกอบที่มีความจำเพาะกับสารที่ตรวจวัด ซึ่งการดูดซับแบบพาสซีฟไม่ต้องใช้ปั๊มในการเก็บตัวอย่าง และมีข้อดีคือ ไม่มีเสียงรบกวนจากปั๊มดูดอากาศ และมีต้นทุนต่ำ (สาวิตรี, 2548)

การเก็บตัวอย่างด้วยวิธีแบบพาสซีฟได้รับการพัฒนามากขึ้น เช่น มีวิธีการตรวจสอบการใช้งานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างสำหรับสารอินทรีย์ระเหยได้หลายระดับ สารดูดซับที่ใช้มีความเฉพาะเจาะจงกับสารมลพิษที่ต้องการศึกษา และใช้การผ่านความร้อนในการสกัดสารมลพิษ เพื่อให้สามารถตรวจวัดในระดับส่วนในพันล้านส่วน เป็นต้น

การพัฒนาอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟในช่วงผ่านมา ทำให้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟปัจจุบันมีหลายรูปแบบ และวิธีการเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟมีข้อดีมากมาย เช่น วิธีการใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ต้องใช้ปั๊มในการเก็บตัวอย่าง ปราศจากเสียงรบกวนจากการทำงานของปั๊ม ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยเมื่อเทียบกับอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างประเภทอื่น ๆ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟมี

การใช้งานแพร่หลาย และนำมาใช้เพื่อตรวจวัดหาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซมลพิษที่ปนเปื้อนในบรรยากาศ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แอมโมเนีย ไอร์ระเหยของกรดไนตริก รวมถึงสารอินทรีย์ระเหย และก๊าซชนิดอื่นที่มีระดับความเข้มข้นน้อยกว่า 1 ส่วนในพันล้านส่วน (อัญชลี, 2559)

2.9.1 หลักการของการดูดซับแบบพาสซีฟ

ทฤษฎีที่ใช้ออกแบบ และการทำงานของอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ แบ่งได้เป็น 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีการซึมผ่าน (Permeation) และทฤษฎีการแพร่ (Diffusion)

2.9.1.1 ทฤษฎีการซึมผ่าน (Permeation) เป็นการเคลื่อนที่ของก๊าซผ่านเมมเบรน โดยการรับเข้าของก๊าซขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีและแผ่นเมมเบรน การรับเข้าของก๊าซเป็นฟังก์ชันกับค่าคงที่ของการซึมผ่านความเข้มข้นของก๊าซในบรรยากาศ และระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง ทฤษฎีการซึมผ่านได้นำมาใช้ประโยชน์ในกรณีที่ต้องการตรวจวัดมลสารในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของสารมลพิษ สารระเหยหรือก๊าซรบกวนอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่กับก๊าซที่ต้องการตรวจวัดหรือเมื่อตัวกลางที่ใช้เป็นของเหลว การแยกเก็บก๊าซเฉพาะที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษกรอง สารเคมีที่ดูดซับบนกระดาษกรอง และสารดูดซับที่บรรจุอยู่ภายในอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง โดยจะมีค่าการซึมผ่านสูงต่อก๊าซที่ทำการตรวจวัด แต่ไม่ซึมผ่านสารอื่นในบรรยากาศ

2.9.1.2 ทฤษฎีการแพร่ (Diffusion) เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารผ่านความเข้มข้นที่แตกต่างกันหรือการแพร่ของสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ในเงื่อนไขสภาวะคงตัว การเก็บตัวอย่างด้วยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟเป็นการรับเข้าของมลสารที่ถูกควบคุมด้วยพื้นที่หน้าตัดของเส้นทางการแพร่ และสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของมลสาร โดยอัตราการเก็บตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแพร่ พื้นที่หน้าตัดและความยาวของเส้นทางการแพร่ (อัญชลี, 2559)

2.10 ไม้ยางพารา

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยปลูกยางพารามากที่สุดในพื้นที่ภาคใต้ ได้แก่ สงขลา สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช ไม้ยางพาราเป็นผลพลอยได้จากการปลูกต้นยางพาราเพื่อกรีดยางน้ำยาง ปริมาณไม้ยางพาราได้มาจากพื้นที่ตัดโค่นยางพาราที่มีอายุมาก (25 ถึง 30 ปี) เพื่อปลูกทดแทนสำหรับการโค่นยางพาราของประเทศโดยเฉลี่ยอยู่ที่ปีละ 350,000 ไร่ โดยพื้นที่โค่นไม้ยางพารา 1 ไร่ มีต้นยางพาราประมาณ 70 ต้น ได้ไม้ยางพาราประมาณ 14 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งไม้ยางพาราที่ได้จากการโค่นสามารถแบ่งการนำไปใช้งานได้เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของรากไม้และต่อไม้ ส่วนของเสี้ยน (ขี้เสี้ยน และเศษไม้จากการตัดโค่น) และส่วนของไม้ยางพารา ทั้งนี้ในส่วนของรากไม้ และต่อไม้ในอดีตเกษตรกรจะนำมากองรวมกันเพื่อเผาทิ้ง เนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิด

ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ แต่ในปัจจุบันได้นำรากและตอไม้มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าชีวมวล แต่ยังไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ส่วนของเสียที่ได้จากการโค่นต้นยางพาราจะได้ซีลี้อย และเศษไม้ ซึ่งจากการตัดโค่นหรือการเลื่อยต้นยางพาราจะมีส่วนของเสียประมาณ 3 ตันต่อไร่ ของเสียที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกษตรกรจะทำการเผาทิ้งเช่นเดียวกับรากและตอไม้ และส่วนของไม้ยางพาราถือเป็นวัตถุดิบสำคัญของอุตสาหกรรมไม้ยางพารา และผลิตภัณฑ์ไม้ และไม้ยางพาราที่ได้จากการตัดโค่นจะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ไม้พิน กิ่งไม้และปลายไม้ และไม้เลื้อย สำหรับส่วนของไม้เลื้อยที่ถูกส่งต่อไปยังโรงเลื่อยไม้แปรรูปส่งผลให้เกิดของเสียจำพวกปีกไม้ เศษไม้และซีลี้อย

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของซีลี้อยไม้ยางพารา

องค์ประกอบ	ร้อยละ	
	(1)	(2)
ปริมาณความชื้น	6.20	7.95
ปริมาณคาร์บอนคงตัว	23.38	24.15
ปริมาณสารระเหย	69.68	62.95
ปริมาณเถ้า	0.74	4.95

ที่มา : (1) Srinivasakannan and Bakar, 2004 และ (2) Kumar *et al.*, 2006

2.11 เทคนิคและเครื่องมือในการวิเคราะห์

2.11.1 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันการผลิตถ่านกัมมันต์มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ซึ่งการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานจำเป็นต้องวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์เพื่อให้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและสมบัติการดูดซับเพื่อที่จะนำไปใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ ดังนั้นเพื่อทราบถึงสมบัติของถ่านกัมมันต์ต้องทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้

2.11.1.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ เป็นการวิเคราะห์เพื่อทราบค่าปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวจากการวัดสมบัติของวัตถุดิบโดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศเพื่อคำนวณหาค่าที่ได้เปรียบเทียบกับน้ำหนักสารที่ไม่มี ความชื้น (Dry basis) เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารด้วยคุณสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัตถุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ และบรรยากาศภายในอาจเป็นไนโตรเจนหรือก๊าซที่มีความว่องไว เช่น อากาศหรือออกซิเจน ส่วนข้อมูล

การวิเคราะห์ถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง และอุณหภูมิ โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด (อัญชลี, 2559)

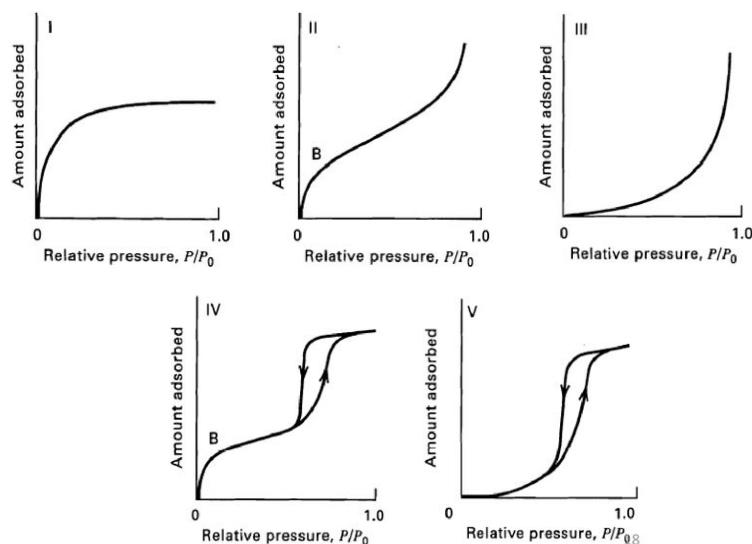
2.11.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว เป็นการวิเคราะห์โดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT – IR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล โดยข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างทางโมเลกุลที่ได้เป็นได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบสารอินทรีย์ ใช้ได้ดีกับสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูง ทั้งในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยเป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสง เมื่อแสงอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ผ่านสู่สารอินทรีย์พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลนี้จะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่า ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fourier transform) ซึ่งคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่น และแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะสามารถนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูล เพื่อใช้ในการพิสูจน์ และบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้ (วารางคณา, 2546)

2.11.1.3 การวิเคราะห์พื้นผิว และความเป็นรูพรุน โครงสร้างพื้นผิวของถ่านกัมมันต์สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้อุปกรณ์ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 นาโนเมตร โดยใช้หลักการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง วัสดุทำการวิเคราะห์โครงสร้างในลักษณะภาพ 3 มิติ เพื่อดูรูปร่างลักษณะหรือสัณฐานวิทยาทั่วไป (Morphology) ของถ่านกัมมันต์ และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

2.11.1.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Specific surface area) สามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว และการกระจายของรูพรุนของถ่านกัมมันต์คือ เครื่อง BET (Surface Area and Porosity Analyzer)

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์มีความจำเป็นต้องทราบไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซ ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับอธิบายความสามารถของตัวดูดซับเทียบกับความดันของตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ และข้อมูลที่ได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับคือ ค่าของพื้นที่ผิว ค่าของปริมาตรรูพรุน ข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ และประสิทธิภาพของสารดูดซับที่ใช้ในระบบกแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์

ไอโซเทอร์มการดูดซับทางกายภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด ซึ่งในอดีตเสนอโดย Brunauer-Deming-Deming and Teller (BDDT) ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุง และการแบ่งกลุ่มเรียกว่า Brunauer Emmett and Teller (BET) classification ในการดูดซับเมื่อค่าความดันน้อยมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วยจนกระทั่งการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นการดูดซับแบบหลายขั้น รูปของของไอโซเทอร์มการดูดซับแต่ละชนิด แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับทั้ง 5 แบบ

ที่มา : ธาราพงษ์, 2554

- ไอโซเทอร์มชนิดที่ 1 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ เป็นการดูดซับของตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูพรุนขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวภายนอก (External surface area) ที่ต่ำ ซึ่งที่ความดันภายนอกต่ำ ($< 0.1 p/p_0$) ยังสามารถดูดซับได้มาก ซึ่งเป็นการดูดซับชั้นเดียวเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยประมาณ $0.5 p/p_0$ ซึ่งตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอร์มชนิดที่ 1 คือ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน

- ไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่า ไอโซเทอร์มที่มีรูปแบบซิกมอยด์หรือแบบเอส (Sigmoid or S-shaped) เป็นรูปชนิดของไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ โดยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เสร็จสมบูรณ์ก่อน จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ต่อเมื่อมีความดันย่อยสูง ๆ เกิดเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

- ไอโซเทอร์มชนิดที่ 3 เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก แต่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและสารถูกดูดซับน้อยจึงทำให้เกิดการรวมตัวกันของสารถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกเสร็จสมบูรณ์ เช่น การดูดซับไอน้ำบนผิวถ่านที่ไม่มีรูพรุน

- ไอโซเทอร์มชนิดที่ 4 จะพบในสารที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 1.5 – 100 นาโนเมตร เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ตัวถูกดูดซับจะเริ่มเข้าไปในรูพรุน ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของแข็ง (Capillary condensation in pores) โดยลักษณะกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 คือมีการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์ เช่น การดูดซับเบนซีนบนโอออนออกไซด์เจลที่อุณหภูมิ 320 เคลวิน

- ไอโซเทอร์มชนิดที่ 5 การดูดซับที่มีลักษณะคล้ายกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 3 คือ เกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย แต่สามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนได้ ซึ่งพบในตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนชนิดเดียวกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 4 เช่น การดูดซับไอน้ำบนถ่านหินที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน

การคำนวณพื้นที่ผิว BET เป็นสมการการดูดซับของบรูเนาเออร์ แอมเมทท์ และเทลเลอร์ เป็นการนำไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มาประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้นในลักษณะของการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวตัวดูดซับ (ปรินทร, 2551) ซึ่งจากการศึกษาสมการที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{P}{n(P^0 - P)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \left(\frac{P}{P^0} \right) \quad (2.12)$$

- เมื่อ P คือ ความดันไออิ่มตัวของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล
 P^0 คือ ความดันไออิ่มตัวของตัวถูกดูดซับที่อุณหภูมิของการดูดซับ
 n คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
 n_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่เรียงตัวแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ
 C คือ ค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

จากสมการสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.13

$$C = \exp\left(\frac{\Delta H_A - \Delta H_L}{RT}\right) \quad (2.13)$$

- เมื่อ ΔH_A คือ ความร้อนของการดูดซับระหว่างการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว
 ΔH_L คือ ความร้อนของการควบแน่น
 R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)
 T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)

ดังนั้น

$$\Delta H_A - \Delta H_L = \text{ความร้อนสุทธิของการดูดซับ} \quad (2.14)$$

พื้นที่ผิวจำเพาะนิยมใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET เป็นสมบัติที่บอกถึงความสามารถในการดูดซับสารบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์มากน้อย ถ้าถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะมีความสามารถในการดูดซับสูง และสามารถบอกถึงขนาดและปริมาตรรูพรุน โดยบอกทั้งขนาดและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่จะเป็นตัวกำหนดถึงสมบัติการดูดซับด้วยเช่นกัน

2.11.1.5 การวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Bulk density) ถ่านกัมมันต์เกรดการค้ามีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.3 – 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ทำได้โดยชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร โดยปริมาตรอธิบายถึง ปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์กับปริมาตรเนื้อถ่านกัมมันต์ ดังนั้นค่าความหนาแน่นจึงขึ้นกับขนาด และความพรุนของถ่านกัมมันต์ ในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้ขนาดของอนุภาคคงที่จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นเชิงปริมาตรต่ำจะมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

2.11.1.6 การวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีน เป็นสารถูกดูดซับพื้นฐานที่ใช้ในการวัดความจุของถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เพราะว่าไอโอดีนเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ในการดูดซับไอโอดีน (Iodine adsorption) จึงบ่งบอกถึงปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 นาโนเมตร และสะท้อนถึงความสามารถในการดูดซับโมเลกุลที่มีน้ำหนักต่ำ และขนาดเล็กโดยการดูดซับไอโอดีนแสดงเป็นเลขไอโอดีน (Iodine number) ในหน่วยมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม (มิลลิกรัมต่อกรัม) (สัมฤทธิ์, 2558)

2.11.2 การวิเคราะห์ชนิด และปริมาณสารอินทรีย์ระเหย

2.11.2.1 การสกัดตัวอย่างสารกลุ่ม BTEX การสกัดก๊าซมลพิษออกจากสารดูดซับหรือที่เรียกว่า การคาย (Desorption) ซึ่งแบ่งการสกัดออกเป็น 2 วิธี คือ การใช้ความร้อน (Thermal desorption) และ การใช้สารละลาย (Solvent desorption) ซึ่งเป็นวิธีการสกัดเพื่อการวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมลพิษจากสารดูดซับขึ้นอยู่กับสารดูดซับที่ใช้ในขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง และความต้องการความแม่นยำของการวิเคราะห์ (อัญชลี, 2559) งานวิจัยนี้ทำการสกัดโดยใช้สารละลาย ซึ่งการใช้สารละลายเป็นเทคนิคในการสกัดสารกลุ่ม BTEX จากสารดูดซับ โดยการใช้สารเคมีในการทำละลาย ซึ่งนิยมนำมาใช้กับสารดูดซับที่เป็นของแข็ง เช่น ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีความจุสูงและมีปฏิกิริยาเชิงเร่งสูง

2.11.2.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph : GC) การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยกลุ่ม BTEX โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความสามารถในการแยก และวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบซับซ้อน และยังให้ผลเที่ยงตรง โดยเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และกลุ่มสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ปานกลาง ซึ่งแก๊สโครมาโทกราฟีใช้ได้กับสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิของคอลัมน์เท่านั้น ดังนั้นวิธีการของแก๊สโครมาโทกราฟีจึงเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น (อัญชลี, 2559)

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 การศึกษาการสังเคราะห์ และวิธีการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ทองฉัตร และ พรสวรรค์ (2559) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ โดยการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 48 32 และ 27 ตามลำดับ นำถ่านที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แช่กรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วนถ่าน 1 กรัม ต่อสารละลาย 20 มิลลิลิตร และกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 200 500 และ 800 วัตต์ เป็นเวลา 60 วินาที ซึ่งการวิเคราะห์พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ คือที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ซึ่งให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 416.10 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุน 0.24 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลถ่านกัมมันต์เกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดการระเหยของไอน้ำ และเกิดการสลายตัวของสารระเหยที่อุดตันในถ่านกัมมันต์

พิทักษ์ (2558) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้งจากผงถ่านไม้โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94 พบว่า มีค่าไอโอดีนสูงสุดคือ 1,247 มิลลิกรัมต่อกรัม การวิเคราะห์พื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET พบว่า มีพื้นที่ผิว 1,214.52 ตารางเมตรต่อกรัม การวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง FT-IR พบว่า ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $3600 - 3300 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้างและต่ำ เกิดจากพันธะ O-H และการศึกษาพื้นที่ผิว และรูพรุนโดยใช้เครื่อง SEM พบว่า ผงถ่านไม้มีรูพรุนจำนวนน้อยและมีขนาดเล็กใหญ่ไม่สม่ำเสมอ มีอนุภาคขนาดเล็กปนอยู่จำนวนมากทั้งบริเวณผิว และในรูพรุน ซึ่งจากการประมาณขนาดรูพรุนภายนอกอยู่ในช่วง 0.5 – 10 ไมครอน

วีระวัฒน์ และ พรสวรรค์ (2558) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วลิสง โดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไมโครเวฟ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 68.68 จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 โดยใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 300 500 และ 700 วัตต์ เป็นเวลา 30 60 และ 90 วินาที ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ อัตราส่วน 1:2 ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที มีค่าพื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET 303.1 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.14 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

ศิษฏาภรณ์ (2550) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกและไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพบว่า อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดที่ 1:1.5 การคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 68 นาที มีพื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET 1,331.82 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีน 580.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนขี้เลื่อยต่อกรดที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น แต่ถ้าอัตราขี้เลื่อยต่อกรดน้อยทำให้กรดฟอสฟอริกไม่สามารถแทรกซึมได้ทั่วถึงส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนน้อย และมีค่าการดูดซับต่ำ และพบว่า ถ้าปริมาณกรดมากเกินไปไม่ได้ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังสิ้นเปลืองสารเคมี

Agmur *et al.*, (2008) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากของเสียจากชา โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก การใช้ไมโครเวฟและที่ไม่ใช้ไมโครเวฟ และการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งใช้กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 85 เปอร์เซ็นต์ และใช้ไมโครเวฟภายในครัวเรือนที่กำลังไฟฟ้า 900 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที ผลการศึกษาที่เงื่อนไขเดียวกันพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ไมโครเวฟแล้วทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิว BET สูงสุดที่ 1,157 ตารางเมตรต่อกรัม และที่ไม่ใช้ไมโครเวฟ มีพื้นที่ผิว 928.80 ตารางเมตรต่อกรัม และผลการศึกษาพบว่า การใช้ไมโครเวฟให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แบบ Micropore ตามที่มีผู้เขียนกล่าวไว้ว่า พื้นที่ผิว Micropore ของตัวอย่างที่ได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟสูงกว่าพื้นที่ที่ได้จากวิธีการทั่วไป

Alslaibi *et al.*, (2013) ศึกษาการเปรียบเทียบผลของการกระตุ้นทางเคมีที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบทั่วไป และกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟสำหรับการใช้สารตั้งต้นเดียวกันพบว่า การกระตุ้นทางเคมีและผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนำไปสู่การพัฒนาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้ค่อนข้างสูงกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบทั่วไป

Budinova *et al.*, (2006) ศึกษาลักษณะของถ่านกัมมันต์โดยใช้ชีวมวลจากไม้ ซึ่งทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกตามด้วยการไพโรไลซิสด้วยไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว 1,360 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีน 1,280 มิลลิกรัมต่อกรัม และศึกษาการดูดซับปรอทพบว่า มีความสามารถในการดูดซับปรอท 160 มิลลิกรัมต่อกรัม

Dejang *et al.*, (2015) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถั่วแมคคาเดเมียโดยกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ ซึ่งทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้การกระตุ้นทางกายภาพ (H_2O) และการกระตุ้นทางเคมี ($ZnCl_2$) ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 90 และ 360 วัตต์ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย H_2O และ $ZnCl_2$ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ มีค่าการดูดซับไอโอดีน 680.8 และ 672.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 360 วัตต์ พบว่า การกระตุ้นด้วย H_2O มีค่าการดูดซับไอโอดีนใกล้เคียงกัน แต่การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ มีค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น 5 เปอร์เซ็นต์ คือ 716.3 มิลลิกรัมต่อกรัม

Liu *et al.*, (2010) ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่โดยการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟและกรดฟอสฟอริก ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์คือ แช่กรดฟอสฟอริก เป็นเวลา 48 ชั่วโมง อัตราส่วนกรดฟอสฟอริก 1:1 กระตุ้นด้วยเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 350 วัตต์ เป็นเวลา 20 นาที และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยมีพื้นที่ผิว 1,432 ตารางเมตรต่อกรัม และผลการศึกษาพบว่า การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟและกรดฟอสฟอริกใช้เวลากระตุ้นที่รวดเร็วมีประสิทธิภาพและประหยัด โดยทั่วไปการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ เวลาการแผ่รังสี และอัตราส่วนกรดฟอสฟอริกต่อถ่านกัมมันต์ช่วยให้โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดการพัฒนาขึ้น

Negara *et al.*, (2020) ศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ทาบาคีโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง และผสมกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วน 1.5:1 โดยทำการกวนผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แช่เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นล้างและกระตุ้นในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงสุดที่ 398.40 ตารางเมตรต่อกรัม ใช้เวลากระตุ้น 100 นาที และมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดกลาง ซึ่งรูพรุนขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

Siripanee *et al.*, (2019) ศึกษาวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์จากลิกนินโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่า สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ โดยแช่เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพื้นที่ผิว 806 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 2.02 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุน 0.41 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม โดยมีรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลาง ผลจากการศึกษาพบว่า วิธีการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกก่อนการคาร์บอนเซชันให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าการคาร์บอนเซชันแล้วกระตุ้นกรดฟอสฟอริก

การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การนำวัตถุดิบจากชีวมวลมาใช้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นที่แตกต่างกัน เช่น การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก การใช้กรดฟอสฟอริกและไอน้ำ การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับการไพโรไลซิสด้วยไอน้ำ รวมถึงการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟ โดยมีการศึกษาความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกช่วง 30 – 85 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เล็ยต่อกรดที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นเช่นกัน ถ้าอัตราที่เล็ยต่อกรดน้อยทำให้กรดฟอสฟอริกไม่สามารถแทรกซึมได้ทั่วถึงส่งผลให้มีรูพรุนน้อย แต่ถ้าปริมาณกรดมากเกินไปไม่ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอีกทั้งยังสิ้นเปลืองสารเคมี และมีการศึกษา กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ใช้ในกระตุ้นส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 90 – 900 วัตต์ ผลการศึกษาพบว่า การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าสูงยิ่งให้พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์สูงขึ้น และการกระตุ้นทางเคมีร่วมกับกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนำไปสู่การพัฒนาพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ได้ค่อนข้างสูงกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบทั่วไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพร้อมกับไมโครเวฟ เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่ได้จากการพัฒนาถ่านกัมมันต์ โดยทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์เพื่อตรวจหาลักษณะเฉพาะ และความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) วิเคราะห์พื้นผิว และความเป็นรูพรุนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูพื้นผิวทั่วไป การกระจายรูพรุน และขนาดรูพรุนภายนอกบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนโดยทฤษฎี BET และการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM

2.12.2 การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับ จลนศาสตร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับ

กุสุมา (2562) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ เพื่อการดูดซับสีย้อมผ้าบาติก โดยสภาวะที่เหมาะสมพบว่า ไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที มีปริมาณการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูสูงสุด และมีค่าการดูดซับไอโอดีน 674 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่น 0.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูและสารละลายสีย้อมผ้าบาติกพบว่า มีประสิทธิภาพเท่ากับ 94.95 และ 63.70 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของไอโซเทอร์มฟรุนดลิช แสดงว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็น Heterogeneous surface และจลนศาสตร์การดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

เกียรติศักดิ์ (2556) ศึกษาความสามารถในการดูดซับโทลูอินของถ่านที่ผลิตจากขบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 24.20 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.25 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และทำการทดลองด้วยกล่องทดสอบขนาด 15 x 15 x 15 เซนติเมตร ควบคุมโทลูอินด้วยปั๊มอัตราการไหล 450 มิลลิลิตรต่อนาที และตรวจวัดค่าความเข้มข้นของโทลูอินด้วยเครื่องมือวัดค่า VOC_s โดยที่ความเข้มข้นโทลูอิน 13.40 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความสามารถในการดูดซับโทลูอิน 532 มิลลิกรัมต่อกรัม และหลังการปรับสภาพทำให้ถ่านมีพื้นผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น และผลการศึกษาพบว่า คุณลักษณะของพื้นผิวทางเคมีมีความสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับโทลูอินมากกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ

มณีรัตน์ และคณะ (2019) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราและไม้กระถินยักษ์ เพื่อเป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร การศึกษาไอโซเทอร์มฟรุนดลิชของการดูดซับก๊าซโทลูอิน โดยให้เป็นตัวแทนมลพิษของสารอินทรีย์ระเหย ทำการปล่อยก๊าซโทลูอินให้เกิดการระเหยในขวดแก้วขนาด 10 มิลลิลิตร เมื่อความดันไออิ่มตัวจากนั้นเจือจางไอระเหยอิ่มตัวลงในขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ซึ่งภายในบรรจุถ่านที่ ปริมาณ 0.10 กรัม ให้ได้ความเข้มข้น 0.3 – 0.9 ส่วนในล้านส่วน (ppm) หรือเทียบเท่า 1.1 – 3.7 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลการศึกษาพบว่า ค่าไอโอดีนของถ่านชาร์ขี้เลื่อยไม้ และไม้กระถินยักษ์

เท่ากับ 732 และ 802 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลการศึกษาไอโซเทอร์มพรีนดิคชันของการดูดซับ ก๊าซโทลูอินของถ่านชาร์ซีลี่ยไม้ และไม้กระถินยักษ์พบว่า ค่า K_F เท่ากับ 2.6×10^{-4} และ 1.7×10^{-4} มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และค่า n เท่ากับ 0.44 และ 0.81 ตามลำดับ

ศศิกร (2554) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟ โดยใช้การกระตุ้นทางเคมี ด้วยซิงค์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกรดฟอสฟอริก และศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารได้แก่ เบนซีน โทลูอิน เอทิลเบนซีน และไซลีน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือ การคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พื้นที่ผิว 1,769 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 0.79 นาโนเมตร ปริมาตรรูพรุน 0.75 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยสีน้ำตาลภายในพบว่า ประสิทธิภาพ ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินสูงสุดเท่ากับ 99.76 และ 99.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

สุภาพร และ พนิดา (2561) ศึกษาการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู โดยทำการทดลอง แบบแบทช์ เพื่อศึกษาไอโซเทอร์ม จลนศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จาก เปลือกมังคุด ผลการทดลองพบว่า มีลักษณะการดูดซับบนพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับชั้นเดียว และเป็น การดูดซับทางกายภาพ โดยไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับ แบบแลงเมียร์ และจลนศาสตร์การดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

องอาจ (2558) ศึกษาการพัฒนาวัสดุดูดซับไอระเหยสารโทลูอินจากถ่านไม้ โดยทดลอง ในกล่องทดสอบพลาสติกอะคริลิกขนาด 8 ลิตร ใช้ถ่านปริมาณ 15 กรัม ความเข้มข้นของโทลูอินที่ 800 ppm และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโทลูอินทุก 5 นาที เป็นระยะเวลา 50 นาที โดยใช้ เครื่อง GC/FID ผลการศึกษาพบว่า ผงถ่านไม้มะขาม และผงถ่านไม้จันทน์มีประสิทธิภาพการดูดซับ เท่ากับ 393.05 และ 379.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

อรณิชา และคณะ (2015) ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารระเหยเบนซีนโดย เทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ โดยการวิเคราะห์ผลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณด้วยเทคนิคแก๊ส โครมาโทกราฟี (GC/FID) สภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง คือ ใช้อุณหภูมิคอลัมน์ 55 องศาเซลเซียส อุณหภูมิส่วนฉีดสาร 150 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเครื่องตรวจวัดเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส และผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 4 กรัม อะซิโตน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และใช้ระยะเวลาการสกัด 15 นาที

Anchalee and Nares (2017) ศึกษาสภาวะของการใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบ พาสซีฟชนิดหลอด โดยใช้ในการตรวจวัดสารกลุ่ม BTEX โดยใช้ขวดไวอัลเป็นอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง แบบพาสซีฟ ทำการทดสอบในกล่องแบบปิดขนาด $35 \times 40 \times 30$ เซนติเมตร เก็บตัวอย่างเป็น ระยะเวลา 1 3 5 และ 7 วัน โดยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/FID

Bandura *et al.*, (2017) ศึกษาการดูดซับสาร BTX ด้วยซีโอไลต์ที่ได้จากเถ้าลอยโดยทำการดูดซับด้วยเทคนิคแบทช์ ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับที่ความเข้มข้นเบนซีนและโทลูอีน 5.86 และ 5.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 5 นาที ถึง 6 ชั่วโมง โดยการวิเคราะห์ด้วย GC/FID ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน โดยใช้ตัวดูดซับ 0.5 กรัม พบว่า ระยะเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุลของการดูดซับคือ 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นจลนศาสตร์การดูดซับแบบอันดับสองเทียม และมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามลำดับโดยเบนซีน > โทลูอีน > ไซลีน และความสามารถในการดูดซับของเบนซีนเท่ากับ 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม

Duan *et al.*, (2017) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากฝ้าย โดยการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ศึกษาความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก และการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่ต่างกัน การศึกษาพบว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 640 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที พื้นที่ผิวสูงสุด 1,370 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาณรูพรุน 0.98 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และผลการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า มีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู 476 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ และจลนศาสตร์การดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

Konggidinata *et al.*, (2017) ศึกษาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX โดยการใช้คาร์บอนเมโสพอร์ัส ซึ่งทำการศึกษาเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ช่วงเวลา 0 – 36 ชั่วโมง ใช้ตัวดูดซับ 10 มิลลิกรัม ในการดูดซับสาร BTEX ที่ความเข้มข้น 10 – 20 ppm ผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับสาร BTEX ที่ 20 ชั่วโมง การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์

Kumar *et al.*, (2006) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพาราโดยใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 600 700 และ 750 องศาเซลเซียส พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพารา คือ กระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้ซีลี้อย่างพาราขนาด 0.46 มิลลิเมตร มีค่าการดูดซับไอโอดีน 765 มิลลิกรัมต่อกรัม และพื้นที่ผิว 1,092 ตารางเมตรต่อกรัม

Mazlan *et al.*, (2016) ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพาราโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาพบว่า ผลผลิตของถ่านกัมมันต์ลดลงเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น และความร้อนที่สูงมากเกินไปอาจทำให้โครงสร้างรูพรุนแตก และผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และสารไตรคลอโรเอธิลีน

โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/FID พบว่า ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารามีความสามารถในการดูดซับสารประกอบทั้งสองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Tehrani *et al.*, (2020) ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโน เพื่อทำการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน พบว่า โครงสร้างคาร์บอนนาโนมีพื้นที่ผิว 2,692 ตารางเมตรต่อกรัม การประเมินความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนด้วยการดูดซับแบบไดนามิก โดยทำการดูดซับที่ 12 ชั่วโมง และควบคุมการไหลของก๊าซ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 10 นาทีแรก และระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับเบนซีนที่ช่วงเวลา 45 นาที การดูดซับโทลูอีนที่ช่วงเวลา 65 นาที และมีความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน 228.18 และ 82.08 wt% ตามลำดับ

Zhang *et al.*, (2020) ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว 2,648 ตารางเมตรต่อกรัม และศึกษาการดูดซับเบนซีน โดยใช้ความเข้มข้น 10 ถึง 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ่านกัมมันต์ 10 มิลลิกรัม ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนพบว่า มีความสอดคล้องกับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และมีความสามารถในการดูดซับเบนซีน 1,419 มิลลิกรัมต่อกรัม

การศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์จากชีวมวลในการดูดซับไอระเหย เช่น พอร์มาลดีไฮด์ โทลูอีน เบนซีน พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์จากชีวมวลในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร ได้แก่ เบนซีน และโทลูอีน รวมทั้งทำการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ และไอโซเทอร์มการดูดซับโดยทำการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC/FID)

2.12.3 การศึกษาการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหย

Goodman *et al.*, (2018) ตรวจสอบสารอินทรีย์ระเหยที่มหาวิทยาลัยขนาดใหญ่ในออสเตรเลีย บริเวณห้องน้ำ ห้องทำงาน สำนักงานที่มีการปรับปรุง อาคารสีเขียว พื้นที่ประชุมและห้องเรียน ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นภายในอาคารสูงกว่าความเข้มข้นภายนอกอาคาร 97 เปอร์เซ็นต์ ของการวัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ซึ่งมลพิษทางอากาศที่เป็นอันตราย (พอร์มาลดีไฮด์ เบนซีน โทลูอีน และไซลีน) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น โดยที่ความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุดคือ บริเวณห้องเรียน (51.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และอาคารสีเขียว (23.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Kim *et al.*, (2011) ศึกษาปัจจัยการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยรวม (TVOC) และพอร์มาลดีไฮด์จากสีที่ได้มาตรฐานในประเทศเกาหลี (สีน้ำมัน สีอิมัลชัน และสีน้ำ) โดยใช้วิธีการทดสอบสำหรับห้องขนาดเล็กที่ 20 ลิตร พบว่า สภาวะการปล่อยที่ 24 (48) ทำการทดลองในช่วง

ระยะเวลา 1 3 5 7 14 21 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า สีนํ้ามันที่ทำการปล่อยให้ระเหยเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนใหญ่ปล่อยสารโทลูอิน เอทิลเบนซีน ไซลีน และสไตรีน และการปล่อยสาร TVOC ของสี ทั้ง 3 ชนิด มีความเสถียรหลังจากระยะเวลาผ่านไปอย่างน้อย 7 วัน

Ilgen *et al.*, (2001) ศึกษาความเข้มข้นภายในอาคาร โดยความเข้มข้นของสาร BTEX ภายในอาคารของบ้านที่ปลอดบุหรี่ 115 หลัง พบว่า เกิดผลกระทบจากการทาสีใหม่ของห้องนั่งเล่นมีการปล่อยสารกลุ่ม BTEX โดยความเข้มข้นสูงสุด คือ การปล่อยโทลูอินสูงสุดเท่ากับ 663.4 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมาเป็นไซลีน (m/p xylene) เท่ากับ 100.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเอทิลเบนซีน และเบนซีน 43.9 และ 2.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

Pak *et al.*, (2016) สารอินทรีย์ระเหยเป็นมลพิษทางอากาศโดยทั่วไป ซึ่งปล่อยออกมาจากสารเคมี และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งรวมถึงตัวทำละลาย เช่น ทินเนอร์ น้ำยาทำความสะอาด เชื้อเพลิงเหลว เป็นต้น ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยที่ได้รับการรายงานบ่อยที่สุด คือ ฟอร์มาลดีไฮด์ เบนซีน โทลูอิน และไซลีน ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยเหล่านี้ เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม

Srivastava *et al.*, (2000) สารอินทรีย์ระเหยสภาพแวดล้อมภายในอาคารของประเทศอินเดีย โดยศึกษาจากตัวอย่างอากาศที่เป็นตัวแทนของสภาพแวดล้อมภายในอาคาร และการวิเคราะห์สำหรับสารไฮโดรคาร์บอน 8 ชนิด โดยการใช้เครื่อง Preconcentration cryogenic และ Chromatograph พบว่า สภาพแวดล้อมภายในอาคาร 7 ประเภท ที่มีความแตกต่างกันพบว่า ระดับความเข้มข้นของโทลูอินในห้องโถงมีความเข้มข้นสูงสุด ซึ่งเป็นห้องที่ได้รับการปรับปรุงใหม่

Zhang *et al.*, (2017) สารอินทรีย์ระเหยเป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีสารพิษก่อกลายพันธุ์และสารก่อมะเร็ง การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของสารอินทรีย์ระเหยทำให้มีกฎระเบียบเพื่อลดการปล่อยสารอินทรีย์ระเหย และมีความสำคัญมากขึ้นจนมาถึงปัจจุบัน ซึ่งมีเทคโนโลยีการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยมากมาย แต่การดูดซับเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับว่า เป็นการบำบัดที่มีประสิทธิภาพ ประหยัด และมีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ โครงสร้างรูพรุน และมีความสามารถในการดูดซับสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ โดยเฉพาะการบำบัดสารอินทรีย์ระเหย

การศึกษาพบว่า การปล่อยสารอินทรีย์ระเหยส่งผลกระทบต่อด้านสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะกรณีที่ปล่อยออกมาจากอาคารที่ได้รับการก่อสร้างหรือปรับปรุงใหม่ ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยเป็นมลพิษสำคัญที่ปล่อยจากสภาพแวดล้อมภายในอาคาร อาทิเช่น ฟอร์มาลดีไฮด์ เบนซีน โทลูอิน และไซลีน เป็นต้น สารเหล่านี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ และอาจก่อให้เกิดการก่อกลายพันธุ์เป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นเพื่อลดความเสี่ยงด้านสุขภาพของมนุษย์ที่อาศัยภายในอาคาร ควรใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว โครงสร้างรูพรุน และมีความสามารถในการดูดซับสูง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย โดยรายละเอียดของการดำเนินการวิจัย แสดงดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป

การเตรียมวัตถุดิบ

- 1) ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ในครั้งนี้ เป็นขี้เลื่อยจากโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป ซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการแปรรูปไม้ยางพารา
- 2) นำขี้เลื่อยไม้ยางพารามาทำการบดละเอียด จากนั้นทำการคัดขนาดด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve shaker) โดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 35 60 70 120 และ 230
- 3) นำขี้เลื่อยไม้ยางพาราจากการคัดขนาดโดยผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 60 และค้ำงบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 70 (212 ไมโครเมตร) แสดงดังรูปที่ 3.1 มาล้างด้วยน้ำ DI จากนั้นทำการอบขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ เพื่อเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา



รูปที่ 3.1 ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ได้จากการคัดขนาดด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 70

3.1.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

- 1) นำขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบใส่ในถ้วยอะลูมินาครูซิเบิลทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราในการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที และมีก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านตลอดระยะเวลา

2) ทำซ้ำข้อ 1) โดยทำการเปลี่ยนอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันไปที่ 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้เงื่อนไขในการคาร์บอนเซชันเหมือนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

3) นำตัวอย่างที่ได้จากการคาร์บอนเซชันทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณ (%wt. dry basis) เพื่อทราบปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนเซชัน ถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพารา

- ทำการคำนวณหาค่าร้อยละผลผลิต (%Yield) ของถ่านชีเลื่อยไม้ยางพาราได้ ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักถ่าน (g)}}{\text{น้ำหนักชีเลื่อยไม้ยางพารา (g)}} \times 100 \quad (3.1)$$

- ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่าน โดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT – IR) เพื่อดูความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านชีเลื่อยไม้ยางพารา

- ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านจากชีเลื่อยไม้ยางพารา โดยการศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)

4) ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราเพื่อทำการศึกษาต่อในขั้นตอนต่อไป

3.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพารา

ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟ เป็นการศึกษากำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ 600 800 และ 1000 วัตต์ และส่วนที่ 2 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริก เป็นการศึกษาความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์

3.1.2.1 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟ

1) นำชีเลื่อยไม้ยางพาราที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบใส่ในถ้วยอะลูมินาครุซิเบลทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราในการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที และมีก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านตลอดระยะเวลา

2) นำตัวอย่างจากการคาร์บอนเซชันที่ในข้อ 1) แ่กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) นำถ่านที่ได้จากการแช่กรดฟอสฟอริกทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที

4) ทำซ้ำข้อ 2) และ 3) โดยเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าไปที่ 800 และ 1000 วัตต์ ตามลำดับ โดยใช้เงื่อนไขในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที

5) นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแช่กรดฟอสฟอริกร่วมกับการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟล้างด้วยน้ำ DI จนมีค่าพีเอชคงที่ จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์

6) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ โดยการศึกษาภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer

7) ได้สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟไปศึกษาต่อในขั้นตอนของการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริก

3.1.2.1 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริก

1) นำขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ได้จากการเตรียมวัตถุดิบโดยการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราในการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที และมีก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านตลอดระยะเวลา โดยขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมถ่าน

2) นำตัวอย่างจากขั้นตอนการเตรียมถ่านในข้อ 1) แช่กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) นำถ่านจากการแช่กรดฟอสฟอริกทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ คือไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ เป็นเวลา 90 วินาที

4) ทำซ้ำข้อ 2) และ 3) โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ โดยเงื่อนไขเดียวกัน การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์

5) ทำการกรองถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟ จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6) นำถ่านจากข้อ 5) ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกำหนดอัตราในการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที และมีก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านตลอดระยะเวลา

7) จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันล้างด้วยน้ำ DI จนมีค่าพีเอชของที่อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์

8) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- คำนวณหาค่าร้อยละผลผลิต (%Yield) ของถ่านกัมมันต์ซีลื้อยไม้ยางพาราได้ตั้งสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักถ่าน (g)}} \quad (3.2)$$

- ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ โดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT – IR) เพื่อดูความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์

- ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ โดยการศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer

7) ได้สภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป

3.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพารา

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป ขั้นตอนต่อไปทำการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยที่สำคัญ สามารถบอกถึงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์เพื่อบอกวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาเพิ่มเติมในด้านของการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร และค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ โดยแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์

ความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายถึงน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ในหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นตัวชี้วัดอย่างหนึ่งของถ่านกัมมันต์ โดยงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หาความหนาแน่นเชิงปริมาตรตามมาตรฐาน JIS 1474-1975 ซึ่งแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

1) อบถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์

2) ชั่งน้ำหนักระบอกลงที่มีความจุ 10 มิลลิลิตร ให้ความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือมีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม) และบันทึกผล (X_0)

3) ใส่ถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพาราลงในระบอกลงจนเต็ม จากนั้นกระแทกกันระบอกลงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของถ่านกัมมันต์ในระบอกลงคงที่ และอ่านปริมาตร (V)

4) ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพาราพร้อมระบอกลง และบันทึกผล (X_1)

5) คำนวณความหนาแน่นเชิงปริมาตร (กรัมต่อมิลลิลิตร) ได้ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร} = \frac{(X_1 - X_0)}{10} \quad (3.3)$$

การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

การศึกษาการดูดซับไอโอดีน เป็นการวิเคราะห์ที่ง่ายในการเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์และเป็นสารที่ถูกดูดซับพื้นฐานที่ใช้เป็นตัวแทนของรูพรุนขนาดเล็ก โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์โดยเปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ และการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607-86 ซึ่งแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

- 1) ทำการบด และคัดขนาดถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราให้ละเอียด จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- 2) ทำการชั่ง และบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3) เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ ต้มให้เดือดเป็นเวลา 6 นาที แกว่งขวดเบา ๆ จากนั้นนำขวดรูปชมพู่ออก และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 4) ปิเปตสารละลายไอโอดีน 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่เขย่า 30 วินาที จากนั้นกรองสารละลายอย่างรวดเร็ว
- 5) ทำการไทเทรตสารละลายด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตจนเป็นสีเหลืองอ่อน
- 6) เติมน้ำแ่ง 2 มิลลิลิตร ไทเทรตจนไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ และคำนวณค่าการดูดซับค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์
- 7) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1) ถึงข้อ 6) โดยการเติมน้ำหนักถ่านกัมมันต์ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน (วิธีการวิเคราะห์ และการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

3.2 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราแปรรูปในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

3.2.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการใช้ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน

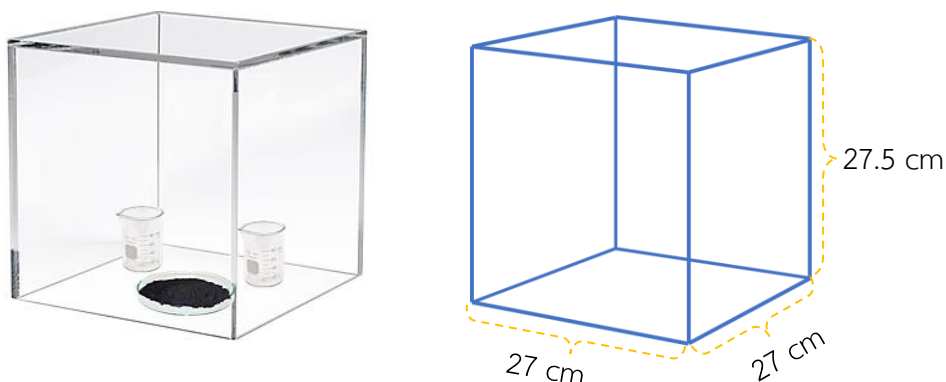
การเตรียมถ่านกัมมันต์

- 1) นำงานเพาะเชื้อมาล้างทำความสะอาด และอบไล่ความชื้น
- 2) บดถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราให้ละเอียด จากนั้นอบเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการปนเปื้อนของเบนซีน และโทลูอีนในถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ครอบคลุมจุดเดือดของเบนซีน และโทลูอีน และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- 3) นำงานเพาะเชื้อที่ได้จากข้อ 1) มาบรรจุถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการอบ จากนั้นชั่งน้ำหนัก 1 กรัม ปิดฝาให้สนิท และเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

การเตรียมกล่องทดลอง

- 1) ล้างกล่องทดลองด้วยน้ำ และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
- 2) เตรียมสารเบนซีน และโทลูอีนใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ในปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นปิดปากบีกเกอร์ให้สนิทด้วยพาราฟิน และอะลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการระเหย
- 3) นำถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพาราที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ และนำบีกเกอร์ที่มีสารเบนซีน และโทลูอีนที่เตรียมจากข้อ 2) วางลงในกล่องทดลอง จากนั้นเปิดด้วยพาราฟิน และอะลูมิเนียมฟอยล์ที่ปิดไว้ก่อนเพื่อให้สารเบนซีน และโทลูอีนระเหยภายในกล่องทดลอง และปิดฝากล่องทดลองให้สนิท เพื่อให้ถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพาราทำการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนภายในกล่องทดลอง โดยใช้การดูดซับแบบพาสซีฟที่วางไว้ในห้องปฏิบัติการ

กล่องทดลองที่ใช้ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเป็นวัสดุที่ทำจากแผ่นกระจกชนิดใส มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีขนาด $27 \times 27 \times 27.5$ เซนติเมตร แสดงรูปกล่องทดลอง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กล่องทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.2.2 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน

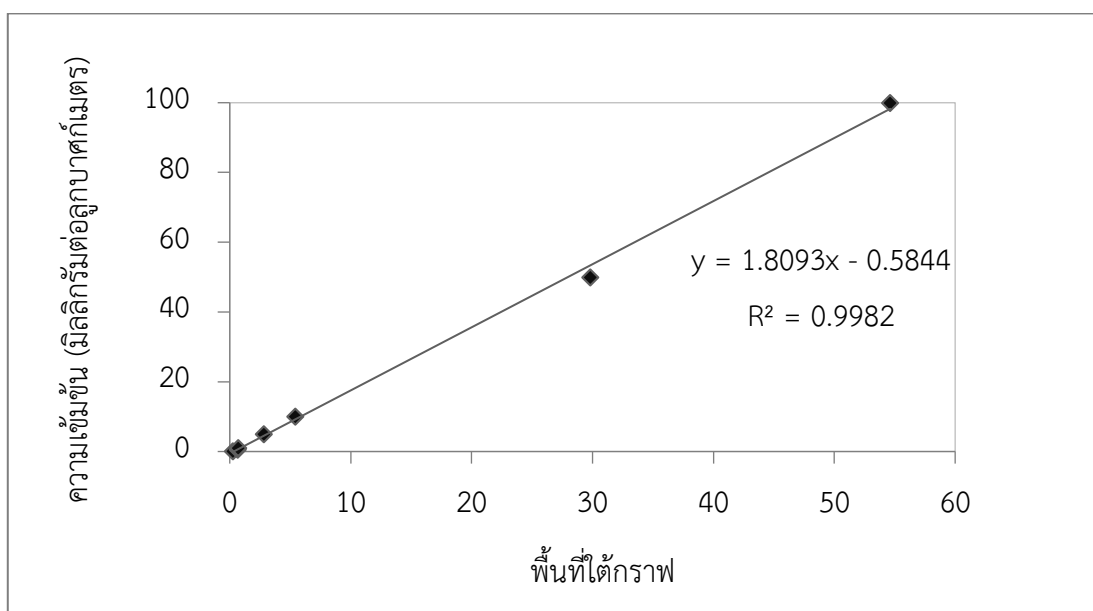
การหาสถานะที่เหมาะสมของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography Flame Ionization Detector : GC/FID) รุ่น 7890A เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอีน โดยนำสถานะที่เหมาะสมจากงานวิจัยของ อัญชลี (2559) มาใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นเชิงปริมาณด้วยเครื่อง GC/FID แต่เนื่องจากสถานะของเครื่องที่ใช้อาจมีความแตกต่างกัน และการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ต่างกัน โดยมีงานวิจัยกล่าวว่า การใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารสกัดสามารถวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ระเหยได้ต่ำสุดที่สามารถตรวจพบเท่ากับ 2 ไมโครกรัม (วิญญู และคณะ, 2550) งานวิจัยนี้ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายและใช้ในการสกัดจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาปรับเปลี่ยนสถานะเพื่อความเหมาะสมในการวิเคราะห์ความเข้มข้นเบนซีน และโทลูอีน โดยผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงรายละเอียด ดังนี้

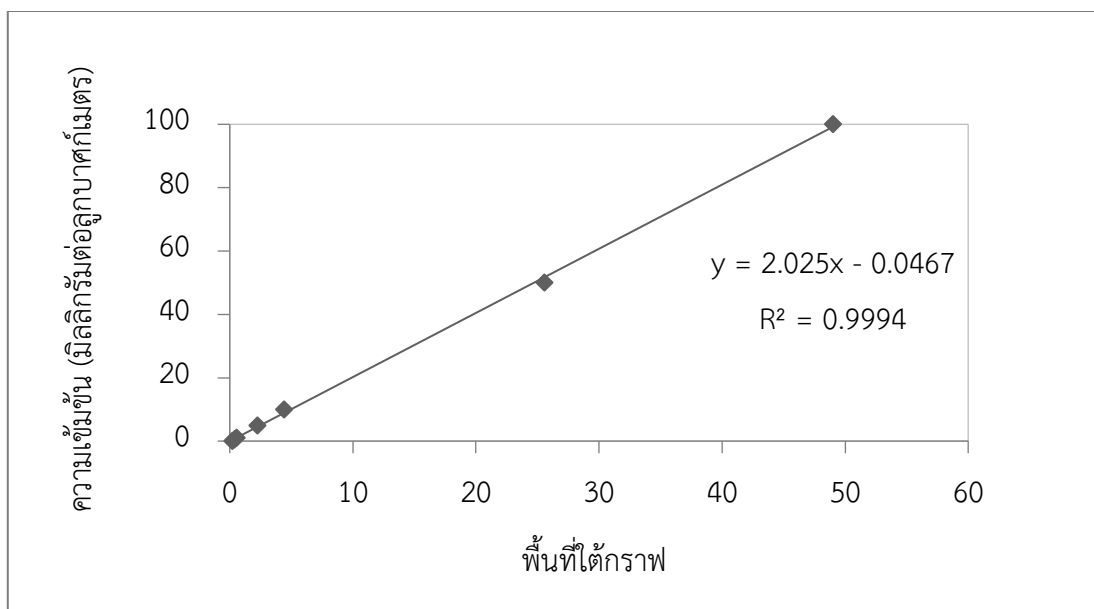
- คอลัมน์ชนิด HP-5 ขนาด 30 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร x 0.25 ไมโครเมตร (19091J-413)		
- โหมด Splitless	10	
- ปริมาณตัวอย่าง	1	ไมโครลิตร
- อุณหภูมิของส่วนฉีดสาร (Injection Port)	300	องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิคอลัมน์ในการตรวจวัด	300	องศาเซลเซียส
- อัตราการไหลของก๊าซฮีเลียม	2.5	มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน	30	มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	300	มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน	25	มิลลิลิตรต่อนาที

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานเบนซีน และโทลูอีน

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานเบนซีน และโทลูอีน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความเข้มข้น เพื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณของตัวอย่างเบนซีน และโทลูอีน โดยใช้เครื่อง GC/FID รุ่น 7890A ซึ่งใช้คอลัมน์ชนิด HP-5 ขนาด 30 เมตร x 0.32 มิลลิเมตร x 0.25 ไมโครเมตร (19091J - 413) และใช้ก๊าซไนโตรเจน ฮีเลียม ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยกำหนดสารละลายเบนซีนและโทลูอีนที่มีความเข้มข้นต่างกัน 6 ระดับ ดังนี้ 100 50 10 5 1 และ 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้น และพื้นที่ที่ได้กราฟมาตรฐาน ดังนั้นได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้น และพื้นที่ที่ได้กราฟมาตรฐาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ผลการวิเคราะห์สามารถสร้างกราฟมาตรฐาน ดังรูปที่ 3.3 – 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของสารมาตรฐานเบนซีน



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของสารมาตรฐานโทลูอิน

การหาปริมาณตัวทำละลาย

- 1) ทำการเตรียมสารละลายเบนซีน และโทลูอินใส่ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในกล่องทดลองที่ผ่านขั้นตอนการเตรียม เพื่อปล่อยสารระเหยภายในกล่องทดลอง
- 2) นำถ่านกัมมันต์จากขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์เปิดฝาเพื่อปล่อยให้ถ่านกัมมันต์ทำการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน จากนั้นปิดกล่องทดลองให้สนิท ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับเบนซีน และโทลูอินมาบรรจุลงในขวดไว้อัลขนาด 40 มิลลิลิตร และปิดฝาขวดให้สนิท
- 4) นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากข้อ 3) มาสกัดด้วยตัวทำละลายในปริมาตร 4 6 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปแยกด้วยเครื่องแยกความถี่สูง เป็นเวลา 5 นาที
- 5) กรองสารละลายด้วยไซริงค์กรองสาร และเก็บสารที่สกัดได้ใส่ขวดเก็บไว้อัลขนาด 2 มิลลิลิตร และปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอิน ด้วยเครื่อง GC/FID

การหาระยะเวลาในการสกัด

- 1) ทำการเตรียมสารละลายเบนซีน และโทลูอินใส่ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในกล่องทดลองที่ผ่านขั้นตอนการเตรียม เพื่อปล่อยสารระเหยภายในกล่องทดลอง
- 2) นำถ่านกัมมันต์จากขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์เปิดฝาเพื่อปล่อยให้ถ่านกัมมันต์ทำการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน จากนั้นปิดกล่องทดลองให้สนิท ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

3) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนมาบรรจุลงในขวดไว้อัลขนาด 40 มิลลิลิตร และปิดฝาขวดให้สนิท

4) นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากข้อ 3) มาสกัดด้วยตัวทำละลายในปริมาตรที่ได้จากการหาปริมาณตัวทำละลาย จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความถี่สูง เป็นเวลา 5 10 และ 15 นาที

5) กรองสารละลายด้วยไซริงค์กรองสาร และเก็บสารที่สกัดได้ใส่ขวดเก็บไว้อัลขนาด 2 มิลลิลิตร และปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอีนด้วยเครื่อง GC/FID

3.2.3 การศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน

1) ทำการเตรียมสารละลายเบนซีน และโทลูอีนใส่ลงในปิ๊กเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในกล่องทดลองที่ผ่านขั้นตอนการเตรียม เพื่อปล่อยสารระเหยภายในกล่องทดลอง

2) นำถ่านกัมมันต์จากขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์เปิดฝาเพื่อปล่อยให้ถ่านกัมมันต์ทำการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน จากนั้นปิดกล่องทดลองให้สนิท ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 0 4 8 12 16 20 24 28 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ

3) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนมาบรรจุลงในขวดไว้อัลขนาด 40 มิลลิลิตร และปิดฝาขวดให้สนิท

4) นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากข้อ 3) มาสกัดด้วยตัวทำละลายในปริมาตร 6 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความถี่สูง เป็นเวลา 10 นาที

5) กรองสารละลายด้วยไซริงค์กรองสาร และเก็บสารที่สกัดได้ใส่ขวดเก็บไว้อัลขนาด 2 มิลลิลิตร และปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอีนด้วยเครื่อง GC/FID

6) ทำการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนได้ ดังสมการที่ 3.4

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad (3.4)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V คือ ปริมาตรที่ใช้ในการดูดซับ (ลิตร)

m คือ น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

3.2.4 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับตามแบบจำลองปฏิกิริยาทางเคมีของการดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์ และสารอินทรีย์ระเหย ซึ่งการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอินทำการศึกษาโดยนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา โดยการดูดซับที่ช่วงเวลา 0 4 8 12 16 และ 20 ชั่วโมง ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ในปริมาตร 20 ลิตร มาคำนวณจลนศาสตร์การดูดซับตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)

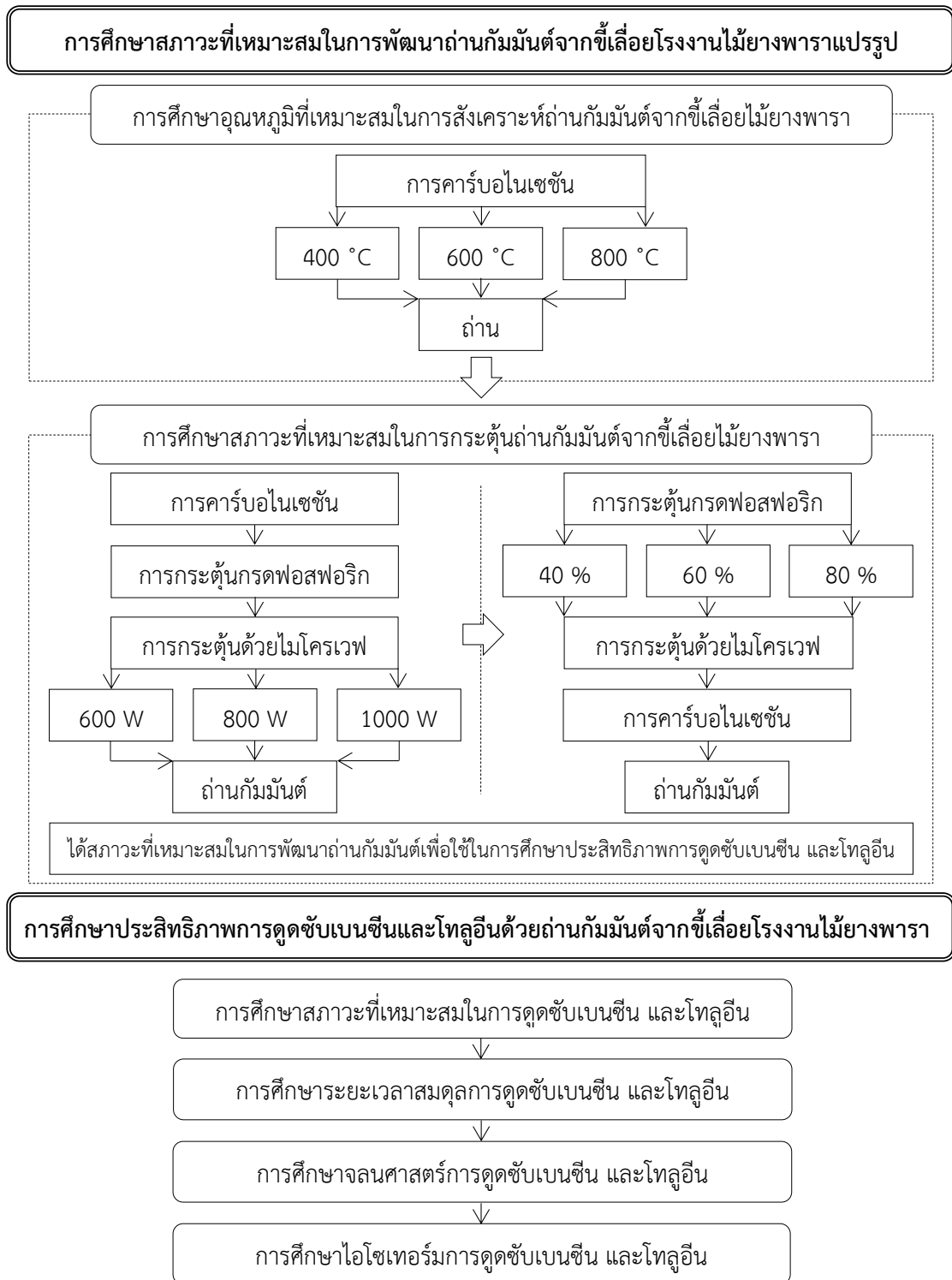
3.2.5 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

- 1) ทำการเตรียมสารละลายเบนซีน และโทลูอินใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางในกล่องทดลองที่ผ่านขั้นตอนการเตรียม เพื่อปล่อยสารระเหยภายในกล่องทดลอง
- 2) นำถ่านกัมมันต์จากการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่แตกต่างกัน โดยมีน้ำหนักปริมาณ 0.5 1 2 3 และ 4 กรัม ตามลำดับ เปิดฝาเพื่อปล่อยให้ถ่านกัมมันต์ทำการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน จากนั้นปิดกล่องทดลองให้สนิท
- 3) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับเบนซีน และโทลูอินมาบรรจุลงในขวดไว้อัลขนาด 40 มิลลิลิตร และปิดฝาขวดให้สนิท
- 4) นำตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากข้อ 3) มาสกัดด้วยตัวทำละลายในปริมาตร 6 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความถี่สูง เป็นเวลา 10 นาที
- 5) กรองสารละลายด้วยไซริงค์กรองสาร และเก็บสารที่สกัดได้ใส่ขวดเก็บไว้อัลขนาด 2 มิลลิลิตร และปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินด้วยเครื่อง GC/FID และทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

3.2.6 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพาราในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินภายในอาคาร

การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพาราในการกำจัดเบนซีนและโทลูอินภายในอาคารที่เกิดจากสีทาบ้าน โดยได้ตั้งสมมุติฐานในการใช้ค่าที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับจากขั้นตอนที่ผ่านมา มาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดของเบนซีน และโทลูอินภายในอาคารที่เกิดจากสีทาบ้าน โดยให้มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับขนาด และความสูงของคอนโดมิเนียมเพื่อทราบปริมาณภายใน จากนั้นใช้ความเข้มข้นของสารเบนซีน และโทลูอินจากการเปรียบเทียบที่ได้จากการอ้างอิงงานวิจัยด้านการทาสีและการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยกลุ่มเบนซีน และโทลูอิน

โดยรายละเอียดของวิธีการดำเนินการวิจัยที่ได้อธิบายมาแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการวิจัยสรุปโดยรวม

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคาร โดยศึกษาในส่วนของสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา และทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารได้แก่ เบนซีน และโทลูอีนด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยแสดงรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้

4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป

การที่ได้จะถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้นั้นต้องทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากการใช้วัตถุดิบ และกระบวนการสังเคราะห์แตกต่างกัน ส่งผลต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราในด้านของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์ และสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์โดยใช้กรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟ

4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

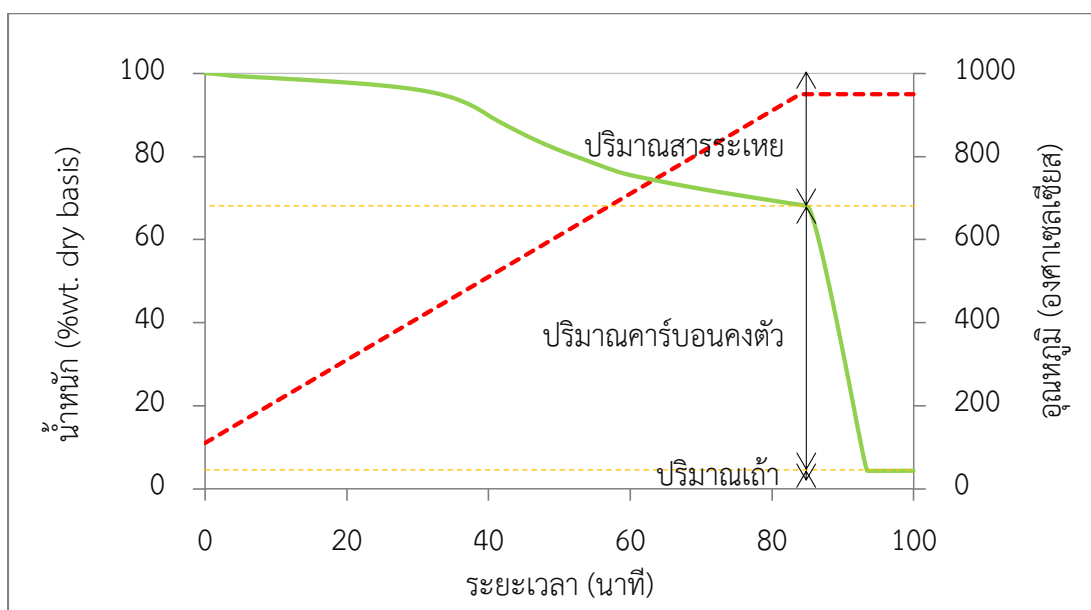
การคาร์บอนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่สารชีวมวลจนเกิดโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และปริมาณสารระเหยระหว่างการให้ความร้อนลดลง จนได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง (Omri and Benzina, 2012) ซึ่งกระบวนการคาร์บอนเซชันจะมีการสลายตัวของโมเลกุลระเหยง่ายในระหว่างการให้ความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นก๊าซ ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนและปริมาณสารระเหย และส่วนที่เป็นของแข็งจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง เรียกกันว่า ถ่าน (ธราพงษ์, 2554)

วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบถึงจะมีความเป็นไปได้ในการเป็นวัสดุดูดซับ โดยวัตถุดิบนั้นเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติหรือได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งวัตถุดิบที่ดีในการนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ควรมีปริมาณสารระเหยต่ำ และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง (ธราพงษ์, 2554) ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้ทำการศึกษาปริมาณสารระเหย (Volatile matter) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของตัวอย่างขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เกิดขึ้น

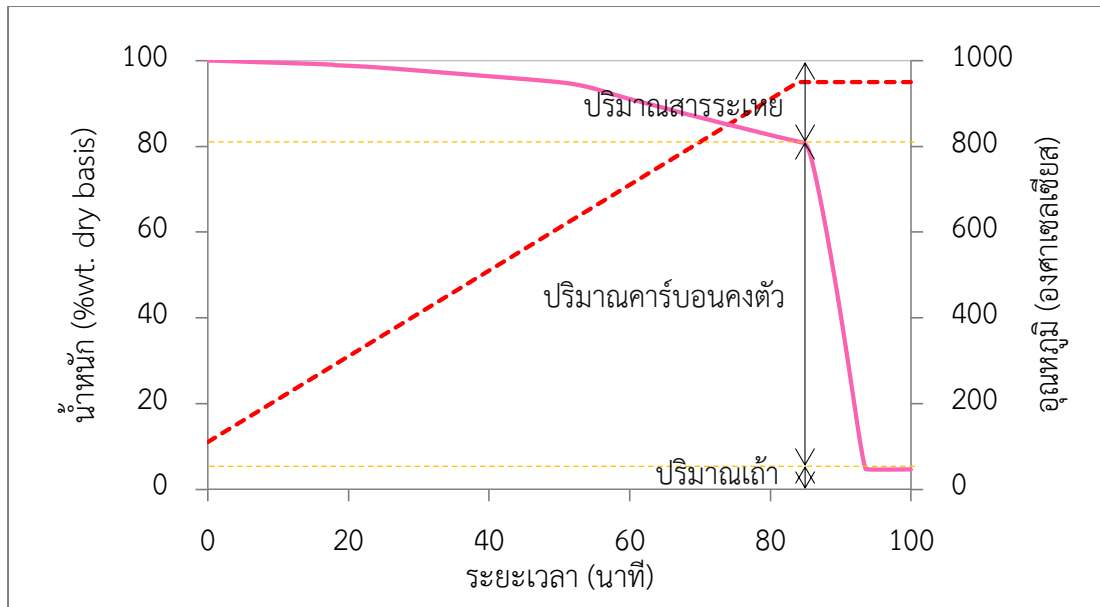
1) การหาค่าองค์ประกอบแบบประมาณ (%wt. dry basis)

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) จากการวิเคราะห์โดยน้ำหนักที่หายไปเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งการศึกษาพบว่า การสลายตัวทางความร้อนของถ่านกัมมันต์จากในช่วงแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 110 ถึง 600 องศาเซลเซียส น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวของปริมาณสารระเหยต่าง ๆ โดยระเหยออกไปจากถ่านกัมมันต์เหลือแต่องค์ประกอบที่เป็นส่วนของปริมาณคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 950 องศาเซลเซียส และส่วนที่เหลืออยู่ในถ่านกัมมันต์หลังจากการให้ความร้อนส่วนนี้จะเป็นผลของปริมาณเถ้า ซึ่งผลการศึกษาของการคาร์บอนไนเซชันถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ของงานวิจัยนี้ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.1 – 4.3 ตามลำดับ

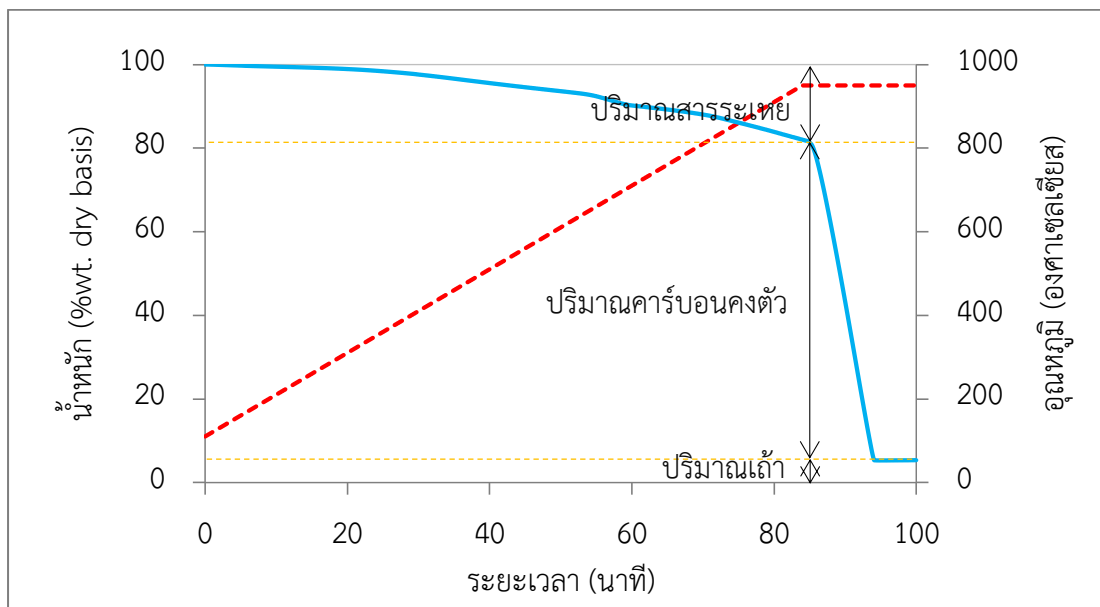
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (%wt. dry basis) ด้วยเทคนิค TGA ของถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราแต่ละอุณหภูมิพบว่า ส่วนที่เป็นปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวของแต่ละส่วนมีมากน้อยต่างกัน และเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วย TGA ของถ่านกัมมันต์ในการคาร์บอนไนเซชันของแต่ละอุณหภูมิในรูปแบบเดียวกันเพื่อให้เห็นความแตกต่าง โดยแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.4



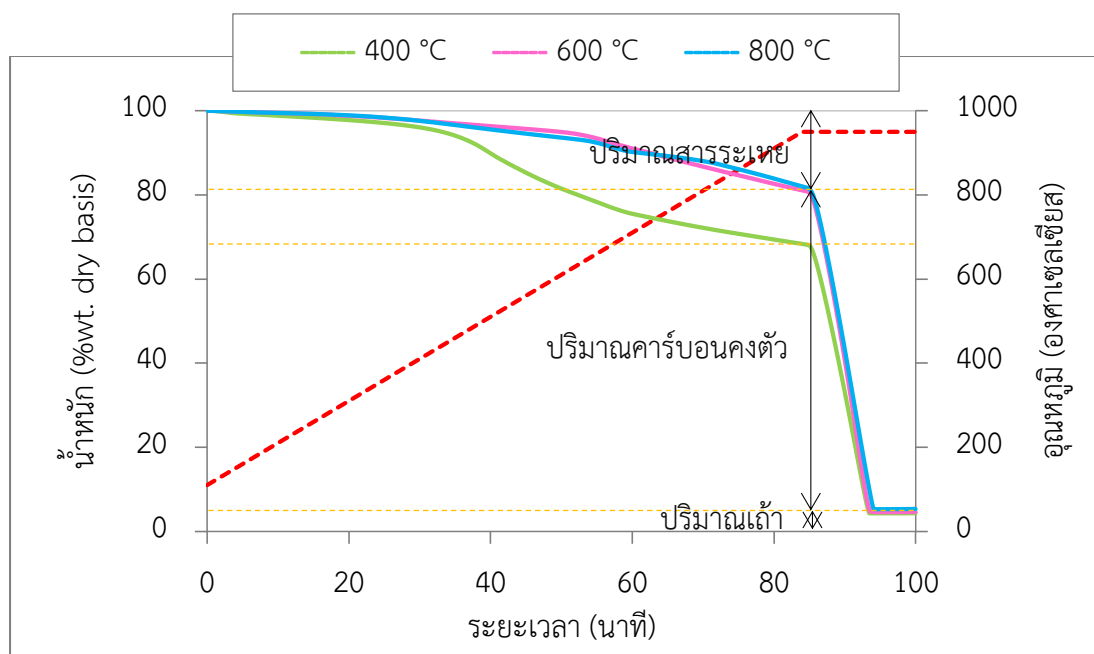
รูปที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)



รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)



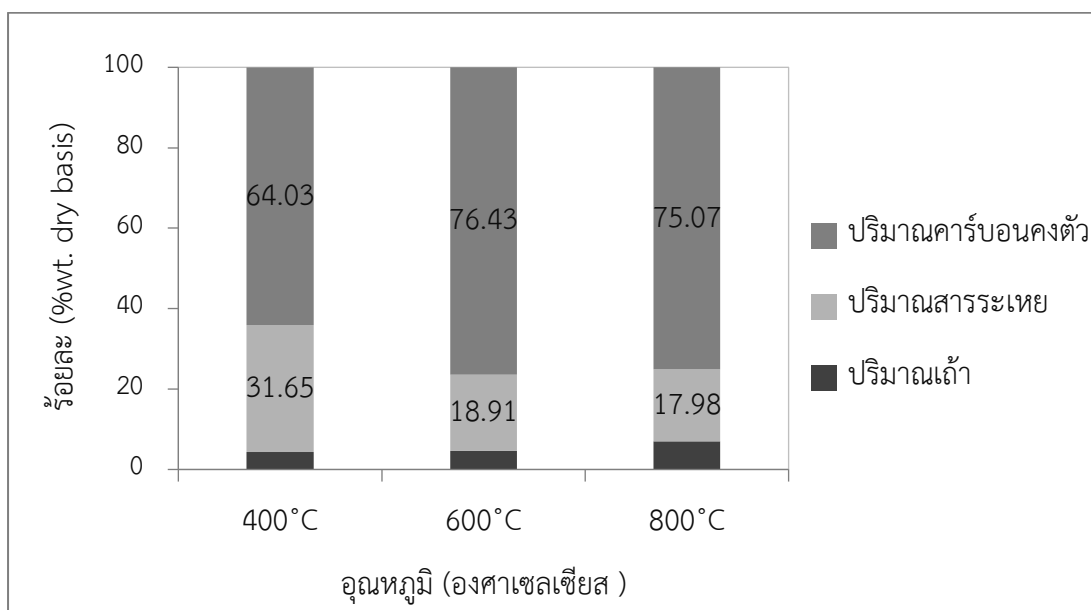
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพาราที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไมยางพาราที่ผ่านการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไมยางพาราที่ทำการคาร์บอนในเซชันอุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส มีร้อยละปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไม่มาก เมื่อทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 6.96 ดังนั้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเกิดปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณเถ้าแสดงถึงความบริสุทธิ์ของถ่านกัมมันต์ เพราะเถ้าเป็นสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่ในถ่านกัมมันต์หลังจากการให้ความร้อนกับวัตถุดิบตั้งต้นนั้น และเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้มีการปนเปื้อนอยู่ในถ่านกัมมันต์ (Dwivedi *et al.*, 2008) ปริมาณสารระเหยของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไมยางพาราที่ผ่านการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่ามีร้อยละปริมาณสารระเหยสูงที่สุดอย่างเห็นได้ชัดคือ ร้อยละ 31.65 และปริมาณสารระเหยลดลงเหลือร้อยละ 18.91 และ 17.98 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600 และ 800 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณสารระเหยจะระเหยออกจากถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสารระเหยในถ่านกัมมันต์ลดลง และในส่วนของปริมาณคาร์บอนคงตัวพบว่า อุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันที่ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุดคือ ร้อยละ 76.43 โดยในการเพิ่มอุณหภูมิของการคาร์บอนในเซชันทำให้มีปริมาณเถ้าและปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันส่งผลให้ปริมาณสารระเหยลดลงเช่นกัน (ธราพงษ์, 2554) และการสำรวจเอกสารพบว่า วัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง โดยปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นคาร์บอนที่สามารถทนการสลายตัวต่ออุณหภูมิสูงได้ (ไชยยันต์ และคณะ, 2551) ดังนั้นงานวิจัยนี้้นำค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวที่

ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณมาใช้เป็นดัชนีในการเลือกอุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชัน เพื่อใช้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพารา แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.5

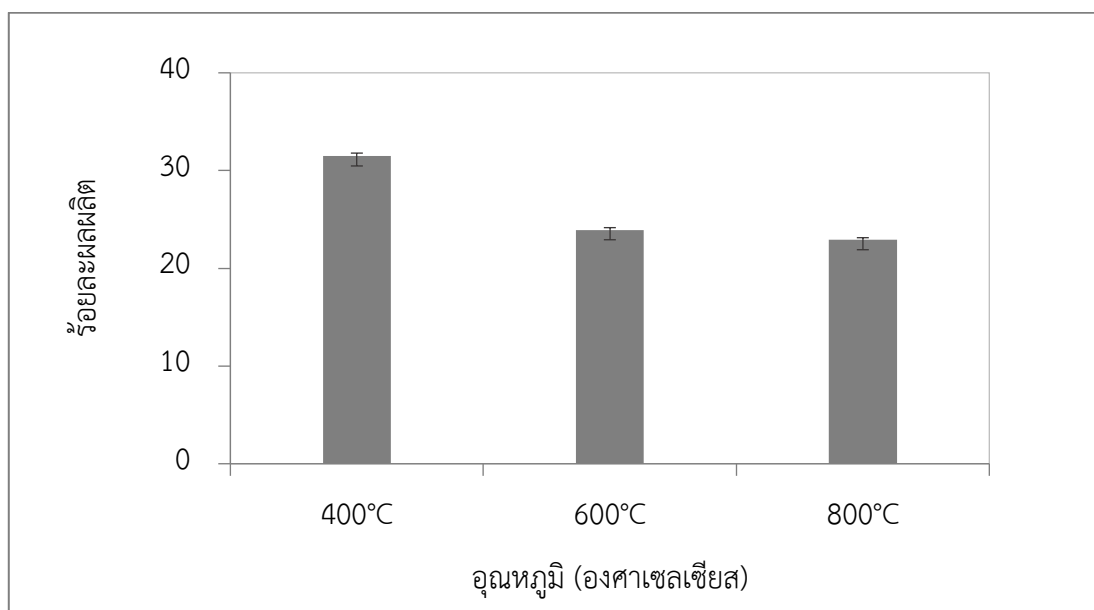


รูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอไนเซชันที่มีผลต่อร้อยละปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว

2) ผลของอุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต

ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลผลิตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอไนเซชันอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เท่ากับ 31.47 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 600 และ 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตลดลงเล็กน้อยคือ มีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 23.92 และ 22.90 ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันสูงขึ้น ทำให้รูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดการขยายตัวส่งผลให้น้ำหนักลดลง ค่าร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จึงลดลง โดยผลผลิตของถ่านกัมมันต์เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญสำหรับการกระตุ้นหรือการคาร์บอไนเซชัน เมื่อใช้อุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันสูงทำให้โครงสร้างเกิดการขยาย และธาตุที่ไม่ใช่คาร์บอนจะสลายไป (ธราพงษ์, 2554) เพราะสาเหตุนี้จึงทำให้ร้อยละผลผลิตถ่านกัมมันต์ลดลง เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอไนเซชันสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ ไชยยันต์ และคณะ (2551) พบว่าการคาร์บอไนเซชันเปลือกเมล็ดยางพาราอุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งร้อยละผลผลิตที่ได้ใกล้เคียงกัน มีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 24.29 และผลการศึกษาของ Mopoung and Nogklai (2008) พบว่าการคาร์บอไนเซชันเมล็ดลำไยที่อุณหภูมิ 400 และ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละ

ผลผลิต 38.90 และ 22.20 ตามลำดับ โดยร้อยละผลผลิตลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลการศึกษาแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงร้อยละผลผลิตของการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

3) หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างทางเคมีถ่านกัมมันต์ (Puziy *et al.*, 2002 ; Ceyhan *et al.*, 2013) เนื่องจากมีผู้รายงานว่ ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับที่ต่างกัน โดยเกิดจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เปลี่ยนแปลงไป (ปรินทร, 2551) และปริมาณธาตุออกซิเจน และไฮโดรเจนบนพื้นผิวมีผลต่อคุณสมบัติถ่านกัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเกิดการรวมตัวกับคาร์บอนทำให้เกิดเป็นพันธะเคมีของกลุ่มฟังก์ชันเกิดขึ้นบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (ศศิกร, 2554) โดยปริมาณธาตุที่พบมากที่สุดบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์คือ คาร์บอน รองลงมาเป็นออกซิเจน และการเกิดหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพการดูดซับ (ธราพงษ์, 2554)

จากผลการศึกษาของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกันพบว่า มีความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันปรากฏอยู่บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ โดยมีตำแหน่งเลขคลื่นที่มีผลต่อการคาร์บอนไนเซชันบนถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา คือ

- ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $3650 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้าง เกิดจากพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเลขคลื่นสูงที่ 3452 cm^{-1} พบว่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชัน

เพิ่มขึ้นส่งผลให้พีคลดลงแสดงให้เห็นว่า หมู่ O-H ถูกสลายไป เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลน้ำ (Mimmo *et al.*, 2014)

- ตำแหน่งเลขคลื่นช่วง 1780 – 1520 cm^{-1} เกิดจากพันธะ C=O หมู่คาร์บอนิล และเมื่อการคาร์บอนไฮดรอกซิลที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส ทำให้มีความเข้มสูง แต่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีความเข้มน้อยมาก เนื่องจากอุณหภูมิในการคาร์บอนไฮดรอกซิลสูง ทำให้ปริมาณสารระเหยถูกกำจัดออกไปมาก (ปริญทร, 2551)

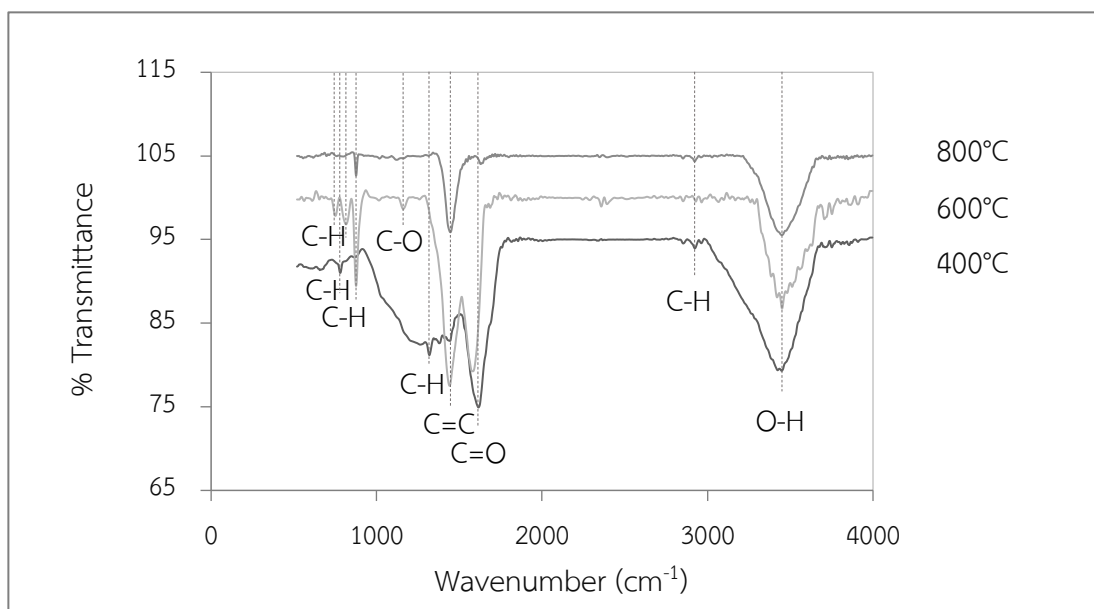
- ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 875 817 754 และ 657 cm^{-1} เกิดจากพันธะ C-H ในวงเบนซินที่มีหมู่แทนที่ต่างๆ เป็นความเข้มของแถบอะโรมาติก และอะลิฟาติกที่ลดลงโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการคาร์บอนไฮดรอกซิล ซึ่งความเข้มของคลื่นที่ต่ำ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการลดปริมาณสารระเหยในช่วงการคาร์บอนไฮดรอกซิลที่อุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส และคลื่นจะหายไปเมื่อคาร์บอนไฮดรอกซิลที่ 800 องศาเซลเซียส (สัมฤทธิ์, 2558)

การคาร์บอนไฮดรอกซิลทำให้ตำแหน่งเลขคลื่นบนถ่านกัมมันต์เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตำแหน่งเลขคลื่นมีสเปกตรัมน้อยมากหรือไม่มีเลย แสดงให้เห็นว่า สารระเหยหมู่ฟังก์ชันที่ไม่เสถียรต่อความร้อนถูกกำจัดออกไป และเหลือธาตุคาร์บอนเป็นหลัก (สัมฤทธิ์, 2558) จากผลการศึกษาที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสรุปในเชิงเปรียบเทียบตำแหน่งที่เกิดพันธะ และปริมาณสูงต่ำของพันธะบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากซีลีโอไม้อย่างพาราที่ทำการคาร์บอนไฮดรอกซิลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.1 สรุปช่วงเลขคลื่นที่เกิดหมู่ฟังก์ชัน และพันธะของตำแหน่งช่วงเลขคลื่นของถ่านกัมมันต์จากซีลีโอไม้อย่างพาราที่ทำการคาร์บอนไฮดรอกซิลที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส

ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})	พันธะ	ตำแหน่งเลขคลื่น		
		400°C	600°C	800°C
3650 – 3000	O-H	3452 ***	3452 **	3452 *
2950 – 2970	C-H	2922 **	-	2922 *
1780 – 1520	C=O	1593 **	1585 ***	1630 *
1520 – 1300	C=C	1440 **	1440 ***	1440 *
1350 – 1330	C-H	1317 ***	-	-
1200 – 1130	C-O	-	1166 ***	-
940 – 650	C-H	875 *, 817 **	875 ***, 817 ***	875 **
		754 **, 657 ***	754 ***	

หมายเหตุ ***, **, * หมายถึง % Transmittance (***) มากที่สุด, ** ปานกลาง, * น้อย)



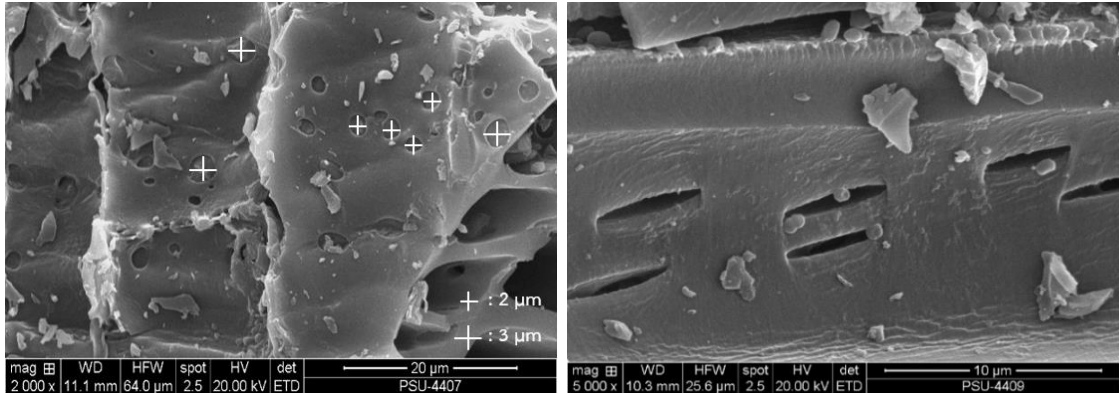
รูปที่ 4.7 หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากซีลื้ออ้อยไม่ย่างพาราที่ทำการคาร์บอนเซชัน ที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส

4) ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุน

การศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลื้ออ้อยไม่ย่างพาราที่คาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) ซึ่งวัตถุประสงค์ในการใช้เทคนิค SEM เพื่อศึกษารูปร่างลักษณะหรือสัณฐานวิทยาทั่วไป และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวภายนอก รวมถึงการกระจายรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นจากการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

การศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้ออ้อยไม่ย่างพาราพบว่า ลักษณะพื้นผิวที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.8) ค่อนข้างเรียบปรากฏรูพรุนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ค่อนข้างน้อย และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันไปที่ 600 และ 800 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10) พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น กล่าวได้ว่าลักษณะทางกายภาพที่มองด้วยเครื่อง SEM ปรากฏพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคาร์บอนเซชัน (สัมฤทธิ์, 2558) และเมื่อเปรียบเทียบความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์พบว่า รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างกันไม่มาก การกระจายตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีทั้งขนาดใหญ่ และขนาดกลาง และเมื่อประมาณขนาดของรูพรุนภายนอกบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (External pore) ด้วยการเทียบจากเส้นสเกลของเทคนิค SEM พบว่ามีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 5 ไมโครเมตร ดังนั้นการศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์สรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิใน

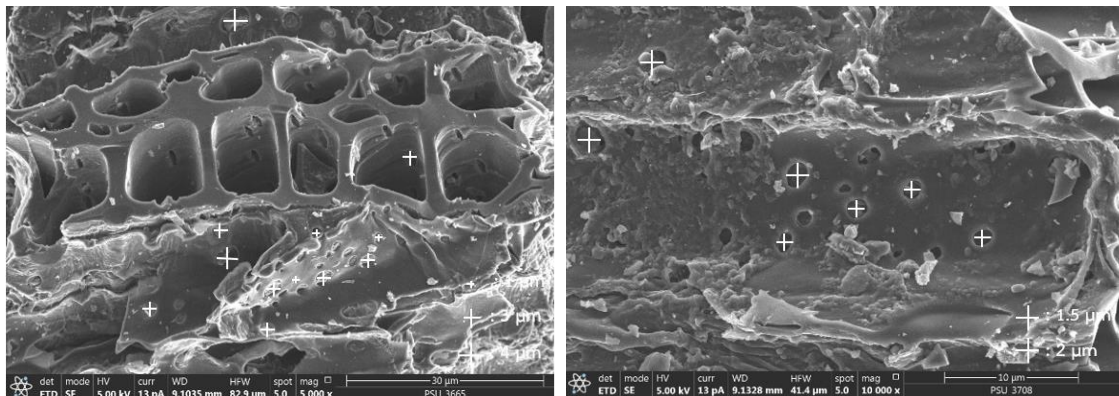
การคาร์บอนเซชัน คือ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและรูพรุนภายนอกที่เหมาะสม เป็น
 อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก และยังสามารถลดพลังงานในขั้นตอนของการคาร์บอนเซชันอีกด้วย



(ก)

(ข)

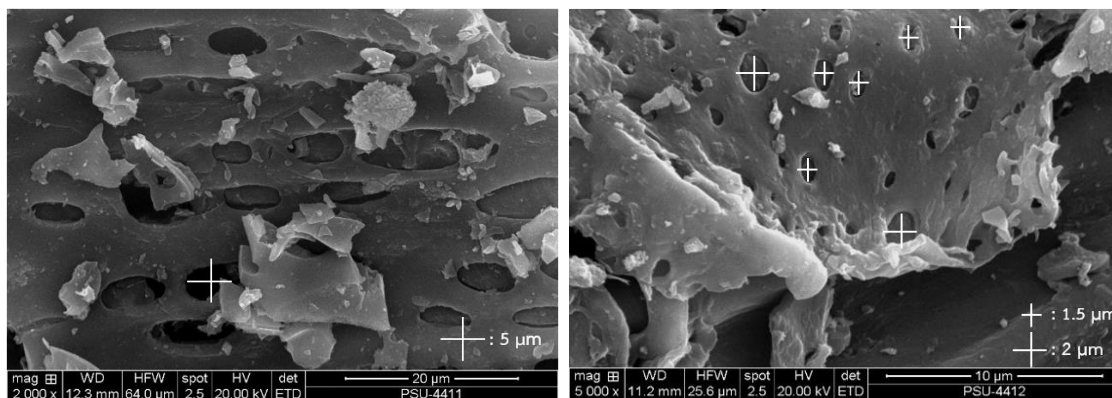
รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา
 ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส
 ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา
 ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส
 ที่กำลังขยาย (ก) 5000 เท่า (ข) 10000 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า

จากภาพรวมของการศึกษาทั้งหมดพบว่า วัสดุดิบที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ให้ได้คุณสมบัติที่ดีต้องมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้นำค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวมาใช้เป็นดัชนีในการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชันถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA สรุปได้ว่า อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันที่ 600 องศาเซลเซียส ให้ค่าปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงสุด ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมินี้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ต่อไป

4.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

การกระตุ้นเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพโดยการทำให้ ถ่านกัมมันต์มีพื้นผิวมากขึ้น และเป็นการทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ ถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟ โดยผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา แสดงรายละเอียด ดังนี้

4.1.2.1 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟ

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราของงานวิจัยนี้ ทำการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟ ซึ่งมีการรายงานไว้ว่า กระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนำไปสู่ การพัฒนาพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้ค่อนข้างสูง (Alslaibi *et al.*, 2013) ในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ และกรดฟอสฟอริกช่วยให้โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดการพัฒนาขึ้น (Liu *et al.*, 2010) โดยก่อนทำการศึกษาความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่เหมาะสมได้ทำการศึกษาการกระตุ้นถ่าน

กัมมันต์ด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน และควบคุมความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกเท่ากันคือที่ 40 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษากลไกของไมโครเวฟที่มีผลต่อการกำจัดสิ่งปนเปื้อนภายในรูพรุน ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุน และการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในการใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ผลการศึกษาแสดงรายละเอียด ดังนี้

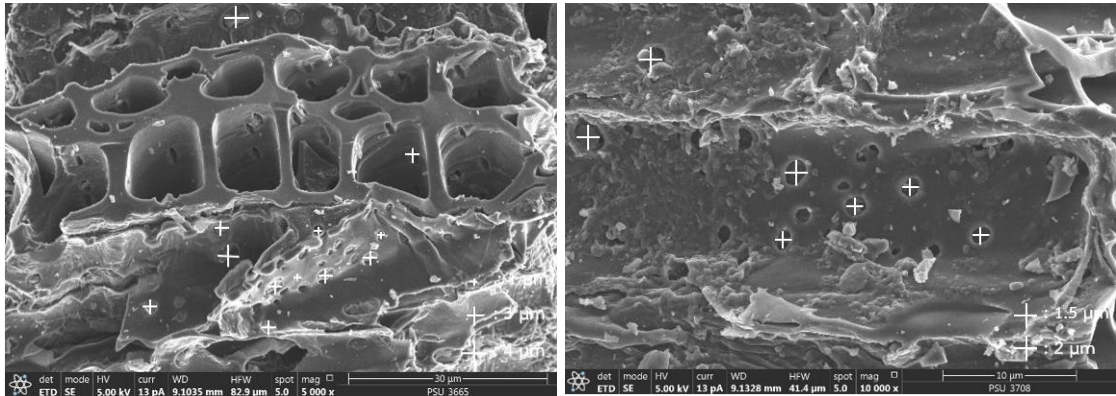
1) ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุน

การศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ รวมถึงกลไกของไมโครเวฟที่มีส่วนช่วยในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ขัดขวางในรูพรุน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลีเนียมอย่างพาราโดยการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส กับถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนในเซชันร่วมกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าพื้นที่ผิวมีลักษณะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย โดยที่กำลังขยาย 10000 และ 30000 เท่า ขนาดรูพรุนภายนอกโดยประมาณอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3 ไมโครเมตร รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.11 – 4.12

เมื่อทำการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์จากซีลีเนียมอย่างพาราที่ทำการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 800 และ 1000 วัตต์ พบว่าลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นโดยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ ให้พื้นผิวมีความขรุขระ และเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่ 800 และ 1000 วัตต์ ทำให้มีพื้นผิวขรุขระเพิ่มขึ้น และเกิดการกระจายตัวของรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) และขนาดกลาง (Mesopore) เพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ซึ่งจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับด้วยเช่นกัน (ปริญทร, 2551) และเมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 และ 1000 วัตต์ ที่กำลังขยาย 10000 เท่า พบว่าไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ มีขนาดรูพรุนภายนอกที่ได้จากการประมาณอยู่ในช่วง 2 ถึง 4 ไมโครเมตร แต่ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ ให้พื้นผิวที่ขรุขระเพิ่มขึ้น และมีขนาดรูพรุนภายนอกอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 2 ไมโครเมตร

การที่มีสิ่งปนเปื้อนอุดตันภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ส่งผลต่อพื้นผิวและปริมาตรรูพรุนด้วยเช่นกัน เนื่องจากเมื่อมีสิ่งปนเปื้อนขัดขวางรูพรุน ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนน้อย และพื้นผิวก็จะน้อย ซึ่งในส่วนนี้เป็นการศึกษากลไกของไมโครเวฟที่มีส่วนช่วยในการสั่นเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ขัดในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นโดยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ มีสิ่งปนเปื้อนอุดตันภายในรูพรุน แต่เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น 800 และ 1000 วัตต์ ช่วยในการลดสิ่งปนเปื้อนที่อุดตันภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ตามการเพิ่ม

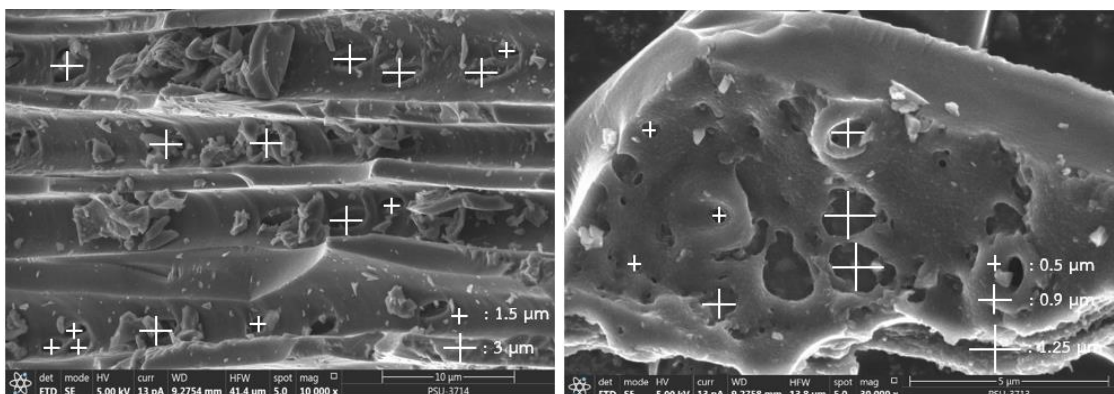
กำลังของไมโครเวฟ โดยผลจากการศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้ยางพารา การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าสูง สามารถช่วยในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ขัดขวางรูพรุน รวมถึงการเพิ่มพื้นผิว และปริมาตรรูพรุน รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.15



(ก)

(ข)

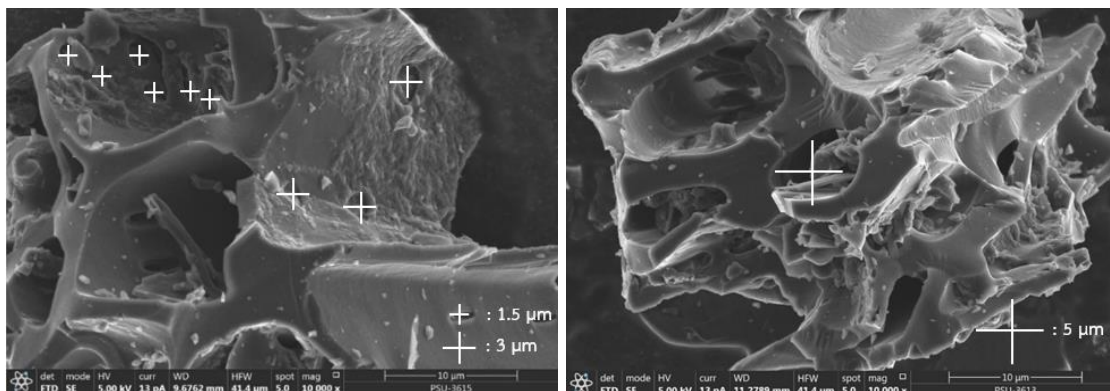
รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้ยางพารา ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 5000 เท่า (ข) 10000 เท่า



(ก)

(ข)

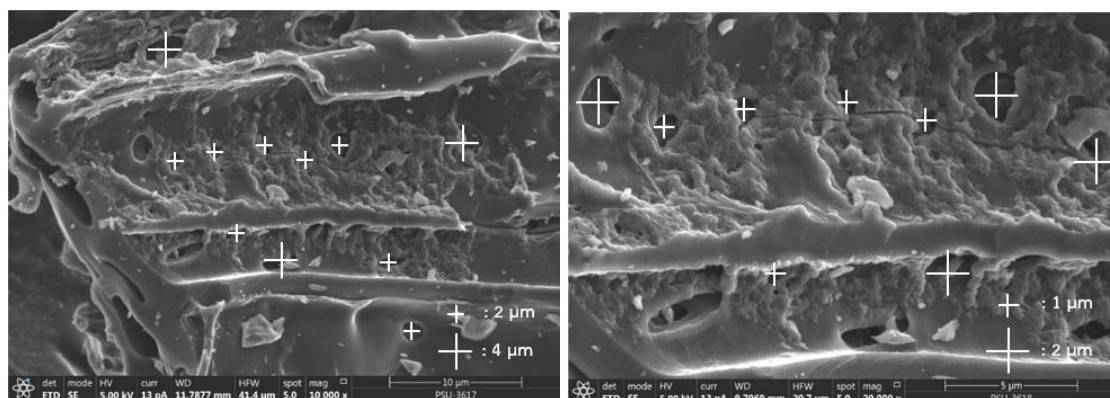
รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้ยางพารา ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ ที่กำลังขยาย (ก) 10000 เท่า และ (ข) 30000 เท่า



(ก)

(ข)

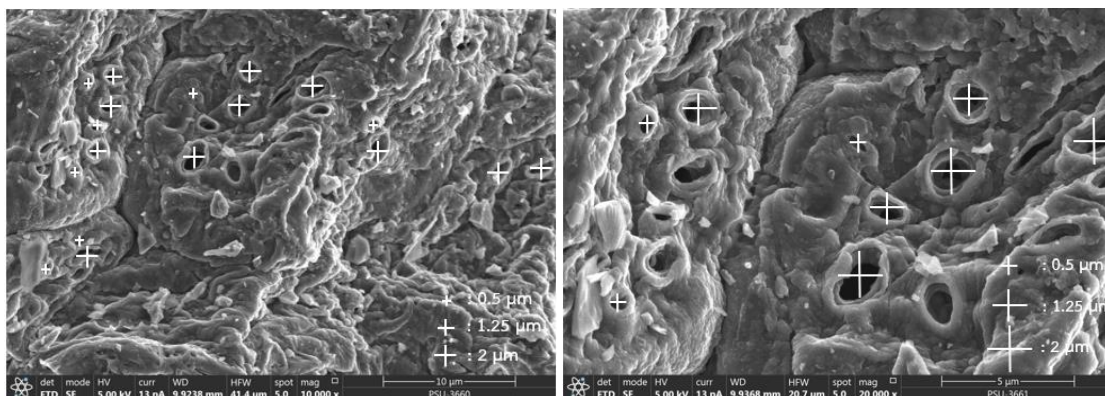
รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพารา ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริกที่ 40 เปอร์เซ็นต์ และไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ ที่กำลังขยาย (ก) และ (ข) 10000 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพารา ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ และไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ที่กำลังขยาย (ก) 10000 และ (ข) 20000 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วย กรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ และไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ ที่กำลังขยาย (ก) 10000 เท่า และ (ข) 20000 เท่า

2) การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย ไม้ยางพารา โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer หรือ BET ซึ่งวัตถุประสงค์การศึกษา พื้นที่ผิว และรูพรุนภายในถ่านกัมมันต์ ตลอดจนบอกถึงขนาดและปริมาตรรูพรุน โดยถ่านกัมมันต์มี ทั้งขนาดและปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่จะเป็นตัวกำหนดถึงสมบัติการดูดซับ ด้วยเช่นกัน (ธราพงษ์, 2554) ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ดังนี้

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (600°C_40% H_3PO_4) มีพื้นที่ผิวเพียง 212.16 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อทำการกระตุ้นถ่านกัมมันต์แสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ (600°C_40% H_3PO_4 _600W) ให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น คือ 406.18 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 และ 1000 วัตต์ (600°C_40% H_3PO_4 _800W และ 600°C_40% H_3PO_4 _1000W) มีพื้นที่ผิวคือ 725.94 และ 981.25 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Liu *et al.*, (2010) พบว่า กำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดการพัฒนารูพรุน

ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพาราที่ทำการสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (600°C_40% H_3PO_4) มีขนาดรูพรุน 12.41 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดกลาง เมื่อกระตุ้นถ่านกัมมันต์แสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟส่งผลให้ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ลดลง ซึ่งจะลดลงเมื่อทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 800 และ 1000 วัตต์ (600°C_40% H_3PO_4 _600W, 600°C_40% H_3PO_4 _800W และ 600°C_40% H_3PO_4 _1000W) มีขนาดรูพรุนเล็กลงเมื่อทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 3.14 ถึง 2.32 นาโนเมตร

ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพาราที่ทำการสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก 40 เปอร์เซ็นต์ (600°C_40% H_3PO_4) มีปริมาตรรูพรุนเพียง 0.12 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อการกระตุ้นร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ (600°C_40% H_3PO_4 _600W) มีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นคือ 0.19 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเมื่อทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยการกระตุ้นร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 และ 1000 วัตต์ (600°C_40% H_3PO_4 _800W และ 600°C_40% H_3PO_4 _1000W) ปริมาตรรูพรุนคือ 0.28 และ 0.37 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุต่าง ๆ ทำให้มีการสั่นของโมเลกุล และเกิดความร้อนขึ้นภายในโมเลกุลอย่างรวดเร็ว เมื่อถ่านกัมมันต์ได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้สารระเหยภายในเกิดการสลายตัวหรือระเหยออก ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น (Namazi *et al.*, 2015) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพาราที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
600°C_40% H_3PO_4	212.16	12.41	0.12
600°C_40% H_3PO_4 _600W	406.18	3.14	0.19
600°C_40% H_3PO_4 _800W	725.94	2.82	0.28
600°C_40% H_3PO_4 _1000W	981.25	2.32	0.37

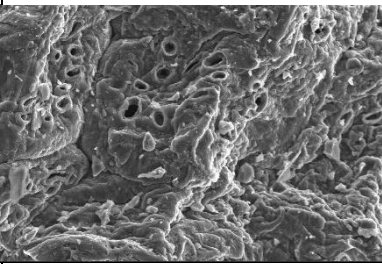
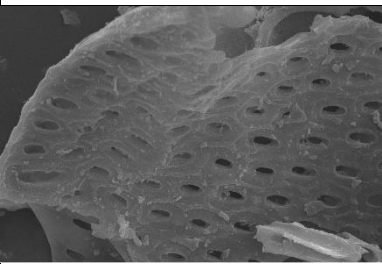


การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ (600°C _40% H_3PO_4 _1000W) ปรากฏลักษณะพื้นผิว และกระจายรูพรุนสูงสุด ซึ่งการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า พบว่ามีขนาดรูพรุนภายนอกอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 2 ไมโครเมตร และผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุน โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ ให้พื้นที่ผิวสูงสุด มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีปริมาตรรูพรุนสูงสุด โดยพบว่า การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์จากซีล้อยไม้ยางพารามีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยสอดคล้องกับการศึกษาที่กล่าวว่า การนำไมโครเวฟมาใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถทำให้เกิดการระเหยของสารระเหยที่ยังเหลือ และอุดตันอยู่ในถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนให้สูงขึ้น (ทองฉัตร และ พรสวรรค์, 2016)

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากซีล้อยไม้ยางพาราโดยการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ (600°C _40% H_3PO_4 _1000W) โดยผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนโดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer พบว่า ให้พื้นที่ผิวสูงสุดคือ 981.25 ตารางเมตรต่อกรัม แต่การศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (40% H_3PO_4 _1000W_600 $^{\circ}\text{C}$) ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นก่อนการคาร์บอนเซชันพบว่า ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีการกระจายตัวของรูพรุนอย่างเป็นระเบียบ แต่ให้พื้นที่น้อยกว่า คือ 908.59 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่า ซึ่งอยู่ในช่วงของรูพรุนขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามทั้งสองกระบวนการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวที่มีค่าที่ใกล้เคียง และยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในประเด็นของปริมาณน้ำที่ใช้ในการปรับสภาพเพื่อขจัดสารกระตุ้น และสิ่งปนเปื้อนก่อนนำถ่านกัมมันต์ไปใช้งานพบว่า ถ่านกัมมันต์จากซีล้อยไม้ยางพารา โดยการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ (600°C _40% H_3PO_4 _1000W) ซึ่งทำการคาร์บอนเซชันก่อนการกระตุ้นให้ค่าความเป็นกรดที่สูงกว่า และต้องใช้ปริมาณน้ำในการปรับสภาพที่

เยื่อกว่าประมาณ 2 – 3 เท่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟก่อนทำการคาร์บอนเซชัน เพื่อลดผลกระทบจากความเปราะ และปริมาณน้ำที่ต้องใช้ ผลการศึกษาแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม้อย่างพาราที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ตัวอย่าง คุณสมบัติ	600°C_40%H ₃ PO ₄ _1000W	40%H ₃ PO ₄ _1000W_600°C
พื้นผิว และความเป็นรูพรุน		
พื้นที่ผิว (m ² /g)	981.25	908.59
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	2.32	1.67
ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	0.37	0.38
ค่าพีเอช (pH)	pH 0 	pH 1 

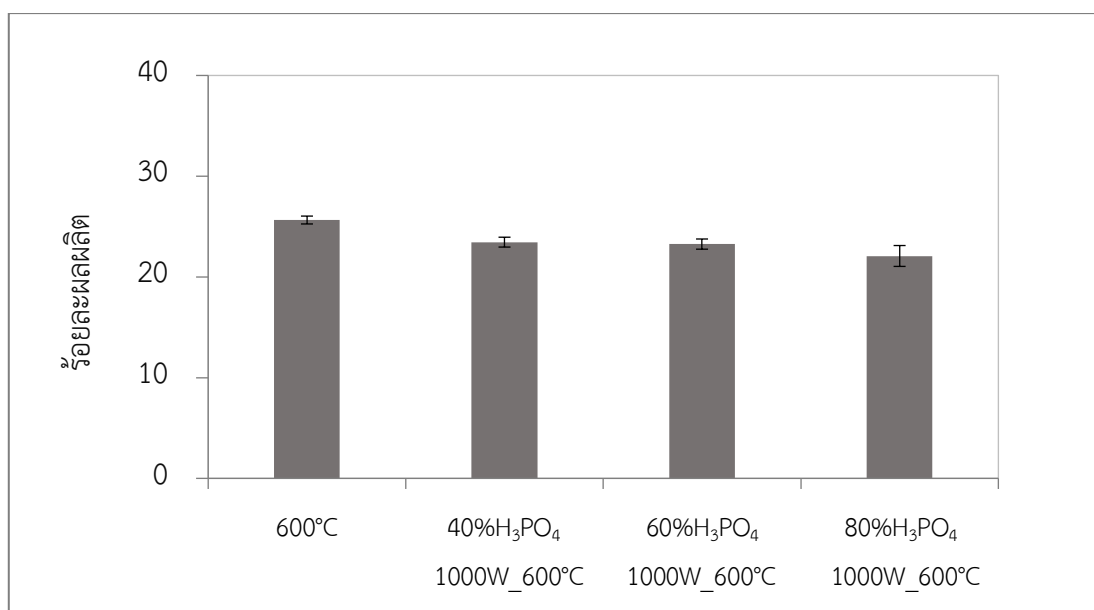
4.1.2.2 การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริก

การศึกษากการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟที่ผ่านมาพบว่า ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และการคาร์บอนเซชัน ยังมีโครงสร้างพื้นผิวและรูพรุนที่ไม่มากนัก และจากการศึกษามีการรายงานว่าการกระตุ้นมีผลต่อพื้นผิวและการกระจายรูพรุน (สัมฤทธิ์, 2558) ตลอดจนโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Angin, 2014) ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการวิเคราะห์ร้อยละผลผลิต หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ลักษณะพื้นผิวและความเป็นรูพรุน และการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน เพื่อเปรียบเทียบผลการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นแตกต่าง ผลการศึกษาแสดงรายละเอียด ดังนี้

1) ผลของการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่มีต่อผลผลิต

ผลการศึกษาการกระตุ้นกรดฟอสฟอริกที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม้อย่างพาราพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำ

การกระตุ้น (600°C) ให้ค่าร้อยละผลผลิต 24.76 เมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตลดลง โดยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ และการคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ($40\%\text{H}_3\text{PO}_4_{1000\text{W}}_{600^{\circ}\text{C}}$, $60\%\text{H}_3\text{PO}_4_{1000\text{W}}_{600^{\circ}\text{C}}$ และ $80\%\text{H}_3\text{PO}_4_{1000\text{W}}_{600^{\circ}\text{C}}$) ให้ค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 23.45 22.92 และ 22.87 ตามลำดับ ซึ่งอัตราการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จึงทำให้น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ลดน้อยลง และผลผลิตที่ได้ลดลง แสดงรายละเอียด ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ร่วมกับไมโครเวฟที่ 1000 วัตต์ และคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

2) หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพารา

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ผลการศึกษาแสดงรายละเอียด ดังนี้

จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราพบว่า มีความหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันปรากฏอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ โดยตำแหน่งเลขคลื่นที่มีผลต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกบนถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพารา ได้แก่

- ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $3650 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้าง เกิดจากพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล เมื่อพิจารณาที่ความสูงของคลื่น โดยตำแหน่งเลขคลื่นสูงที่ 3448 cm^{-1} พบว่าคลื่นลดลงเล็กน้อย เมื่อการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

- ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $1780 - 1520 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากพันธะ C=O ของหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิล แสดงว่ามีกรดคาร์บอกซิลิก และเมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกส่งผลให้คลื่นสูงขึ้น และลดลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าพื้นผิวบนถ่านกัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดส่งผลทำให้มีคุณสมบัติของการชอบดูน้ำมากขึ้น โดยการดูน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (ธราพงษ์, 2554)

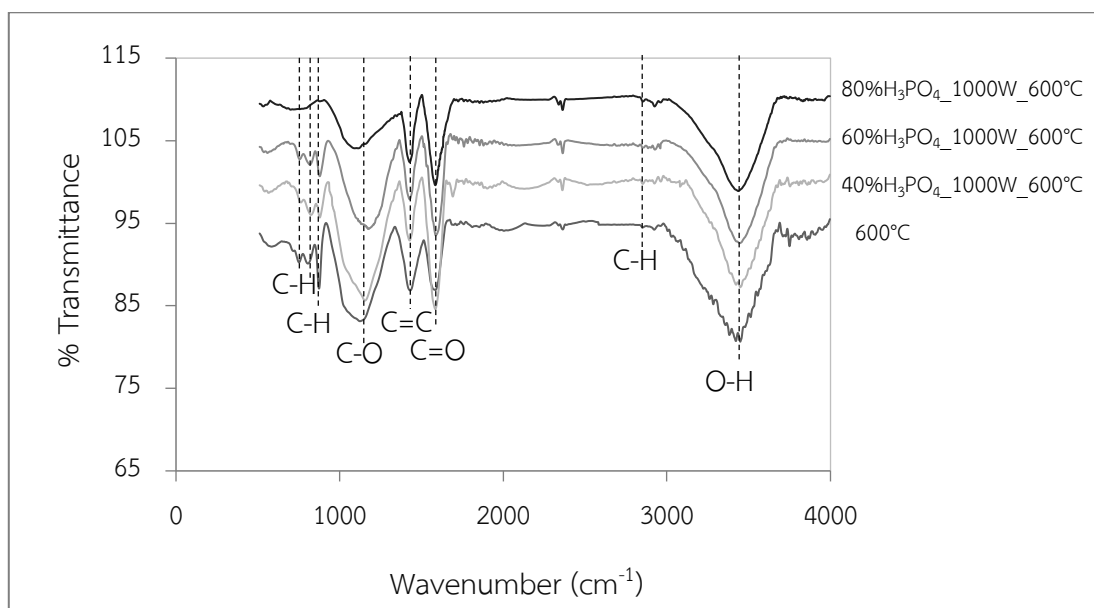
- ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $1200 - 1100 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากพันธะ C-O เป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอรัส และออกซิเจนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C-O ในกรด โดยคลื่นจะหายไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (สัมฤทธิ์, 2558) และคลื่นลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น และมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุชาติ และ ภควดี (2557) พบว่า ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ $1200 - 1190 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดหดของพันธะ P-O และ O-C ของ P-O-C (อะโรมาติก) แสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกมีหมู่ฟังก์ชันที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบเกิดขึ้น ซึ่งฟอสฟอรัสมีส่วนช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น

ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวจำนวนมาก แสดงถึงสมบัติที่ดีสำหรับการเป็นตัวดูดซับ (Sun and Webley, 2010) ซึ่งจากการศึกษามีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่ตำแหน่งเลขคลื่นปรากฏใกล้เคียงกับงานวิจัยของ อาอีเซาะส์ (2561) ซึ่งได้ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเช่นกัน ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกสูงขึ้นถึงจุดสูงสุดคลื่นจะลดลง โดยองค์ประกอบที่พบมากที่สุดคือ คาร์บอน รองลงมาเป็นออกซิเจน และจากการศึกษาที่ได้สามารถสรุปในเชิงเปรียบเทียบตำแหน่งที่เกิดพันธะ และปริมาณสูงต่ำของพันธะในถ่านกัมมันต์จากชีเลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.4 สรุปช่วงเลขคลื่นที่เกิดหมู่ฟังก์ชัน และพันธะของตำแหน่งช่วงเลขคลื่นของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ในยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})	พันธะ	ตำแหน่งเลขคลื่น			
		600°C	40% H_3PO_4 1000W 600°C	60% H_3PO_4 1000W 600°C	80% H_3PO_4 1000W 600°C
3650 – 3000	O-H	3448 ***	3448 **	3448 ***	3448 **
3100 – 2900	C-H	2924 *	-	-	2924 *
		2854 *	-	-	2856 *
1780 – 1520	C=O	1585 **	1585 ***	1585 **	1585 **
1520 – 1300	C=C	1431 *	1427 ***	1407 ***	1429 **
1200 – 1100	C-O	1124 ***	1155 ***	1153 **	1156 *
910 – 650	C-H	874 **, 806 *	874 **, 807 *	819 *, 756 *	877 *, 751 *
		752 *	751 *	678 **	

หมายเหตุ ***, **, * หมายถึง % Transmittance (***) มากที่สุด, ** ปานกลาง, * น้อย)

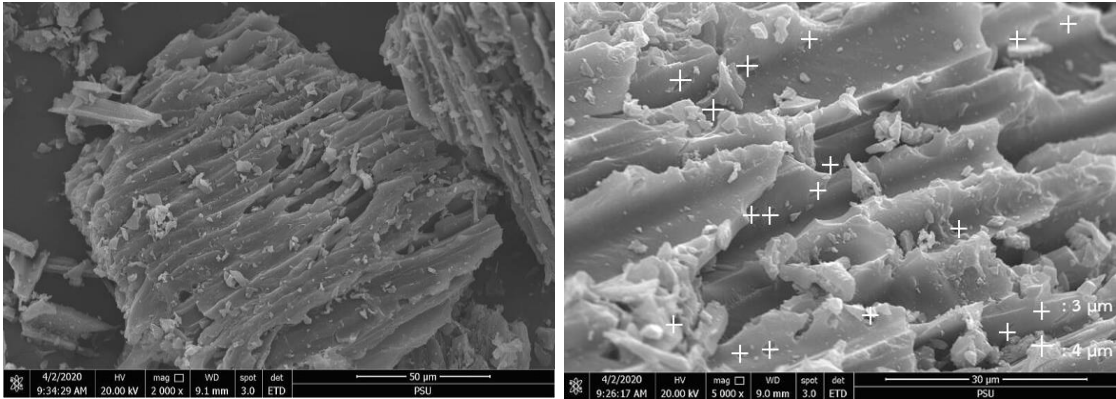


รูปที่ 4.17 หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ในยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

3) ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุน

การศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปร่างลักษณะหรือสัณฐานวิทยาทั่วไป และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวภายนอก รวมถึงการกระจายรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยผลของการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลื้อยไม้ยางพาราพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและไมโครเวฟ ให้ลักษณะพื้นผิวก่อนข้างเรียบ และปรากฏรูพรุนค่อนข้างน้อย ซึ่งจากการประมาณขนาดรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์พบว่า มีขนาดรูพรุนโดยประมาณอยู่ในช่วง 3 ถึง 4 ไมโครเมตร แสดงลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุน ดังรูปที่ 4.18

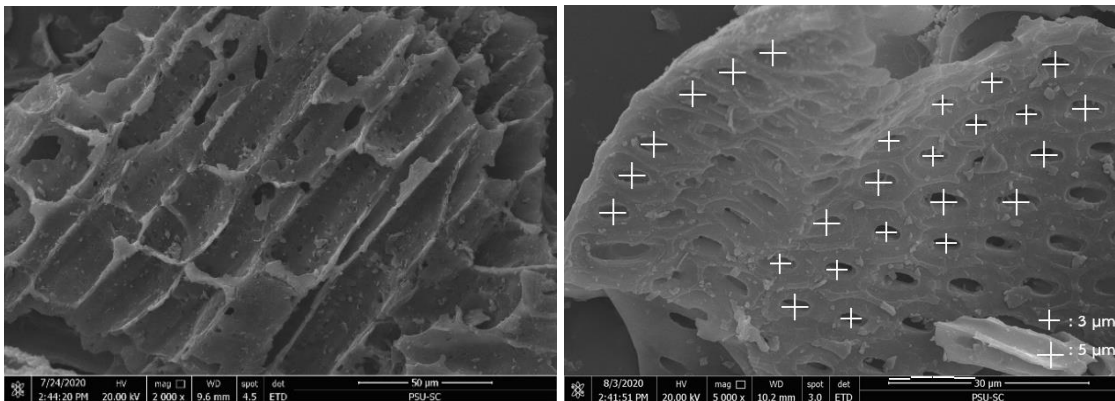
เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ที่ได้ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.19) ให้ลักษณะพื้นที่ผิว และเกิดการกระจายตัวของรูพรุนภายนอกอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งจากการประมาณขนาดรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์พบว่า ขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 3 ถึง 5 ไมโครเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.20) ให้ลักษณะพื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.21) ทำให้มีพื้นผิว และเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นลักษณะของรูพรุนที่มีช่องเปิดกว้าง ดังงานวิจัยที่กล่าวถึงความเข้มข้นของสารที่กระตุ้น และอุณหภูมิมีผลเป็นอย่างมากต่อพื้นผิว การกระจายรูพรุน (สัมฤทธิ์, 2558) และโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Angin, 2014) ซึ่งจากการประมาณขนาดรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์เมื่อใช้กรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยการเปรียบเทียบพบว่า มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 8 ไมโครเมตร ผลการศึกษาแสดงรายละเอียด ดังนี้



(ก)

(ข)

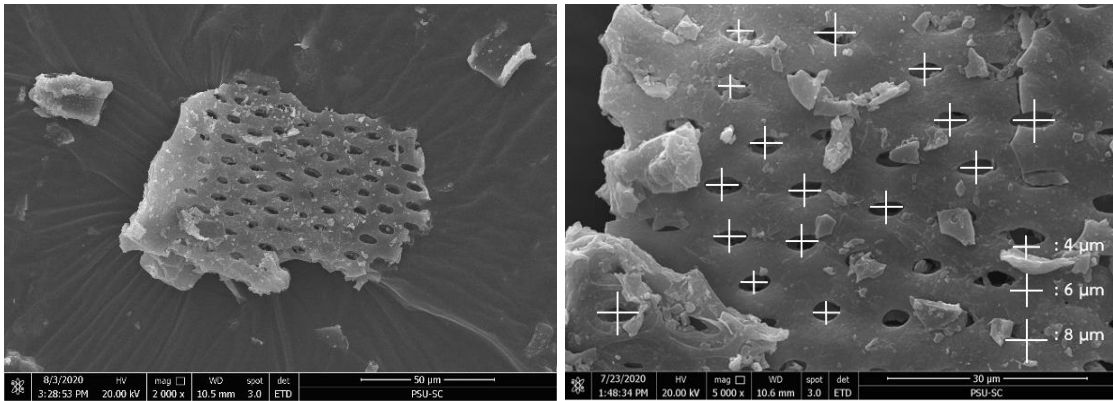
รูปที่ 4.18 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไมยางพารา โดยไม่ทำการกระตุ้น และคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า



(ก)

(ข)

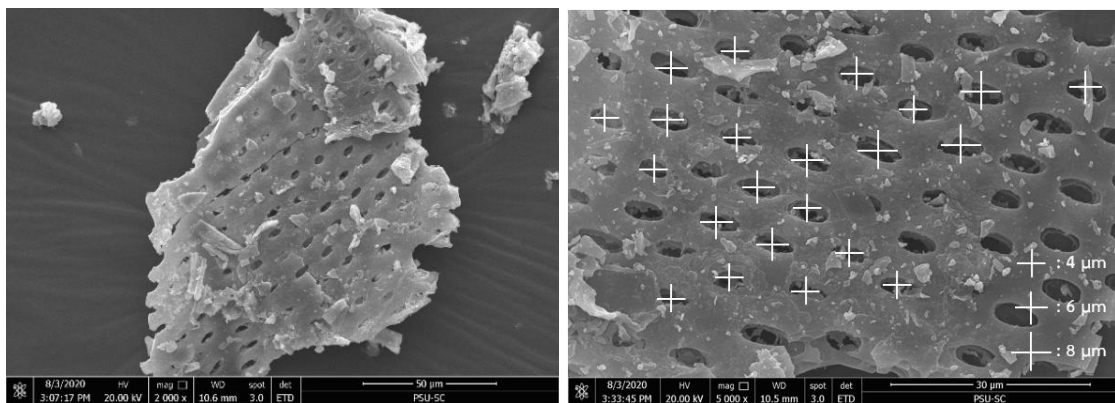
รูปที่ 4.19 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไมยางพารา ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.20 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.21 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า

4) การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ ยางพาราโดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer วัดคุณสมบัติในการศึกษารายละเอียด ของพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนที่มีผลมาจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความ เข้มข้นแตกต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุน ผลการศึกษา แสดงรายละเอียด ดังนี้

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยางพาราที่ทำการสังเคราะห์พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการกระตุ้น (600°C) มีพื้นที่ผิว 485.98 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อกระตุ้นถ่านกัมมันต์แสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้น ด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และการ คาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (40% H_3PO_4 _1000W_600°C) มีพื้นที่ผิวสูงสุดคือ 908.59 ตารางเมตรต่อกรัม รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความ เข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ (60% H_3PO_4 _1000W_600°C) และ 80 เปอร์เซ็นต์ (80% H_3PO_4 _1000W_ 600°C) มีพื้นที่ผิว 838.98 และ 751.45 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการกระตุ้นด้วยกรด ฟอสฟอริกเกิดการกัดกร่อนทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีความพรุน และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น (ศศิกร, 2554)

ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยางพาราที่ทำการสังเคราะห์พบว่า ถ่าน กัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการกระตุ้น (600°C) มีขนาด รูพรุนคือ 1.56 นาโนเมตร และเมื่อทำการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (40% H_3PO_4 _1000W_600°C, 60% H_3PO_4 _1000W_600°C และ 80% H_3PO_4 _ 1000W_600°C) มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 1.67 ถึง 1.73 นาโนเมตร ซึ่งขนาดรูพรุนที่ได้เมื่อเทียบกับ มาตรฐาน IUPAC พบว่า ขนาดรูพรุนจัดอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก โดยความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิเกิดการขยายตัวกว้างขึ้น เมื่อมีสารเข้าไปอยู่ในปริมาณมาก (Budinova *et al.*, 2008) ส่งผลให้เกิดการทำลายรูพรุนขนาดกลาง และสามารถเปลี่ยนเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ (Foo and Hameed, 2012) และอาจไม่เหมาะสมในการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่ยางพาราที่ทำการสังเคราะห์พบว่า ถ่าน กัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยไม่ทำการกระตุ้น (600°C) มีปริมาตรรูพรุนเพียง 0.21 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเมื่อทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ ความเข้มข้น 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนไนเซชันที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (40% H_3PO_4 _1000W_600°C และ 60% H_3PO_4 _1000W_600°C) มี ปริมาตรรูพรุนใกล้เคียงเช่นกัน คือ 0.36 และ 0.38 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ในขณะที่

ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ($80\%H_3PO_4$ _1000W_600°C) ปริมาตรรูพรุนลดลงอยู่ที่ 0.31 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการทำลายรูพรุน ทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนน้อย เพราะสาเหตุนี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวต่ำ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ในยางพาราที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m^2/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)
600°C	485.99	1.56	0.21
40% H_3PO_4 _1000W_600°C	908.59	1.67	0.38
60% H_3PO_4 _1000W_600°C	838.98	1.73	0.36
80% H_3PO_4 _1000W_600°C	751.45	1.69	0.32

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริก ผลการพิจารณาลักษณะพื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนภายนอก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ถ่านกัมมันต์ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ปรากฏลักษณะพื้นที่ผิว และเกิดการกระจายตัวของรูพรุนภายนอกอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งจากการประมาณขนาดรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์พบว่า อยู่ในช่วงประมาณ 3 ถึง 5 ไมโครเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เกิดรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่สูง อาจเกิดการทำลายโครงสร้างพื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ และการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ในยางพารา โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer พบว่า ถ่านกัมมันต์ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้พื้นที่ผิวสูงสุด

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ให้ได้คุณสมบัติในการดูดซับที่ดีต้องมีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนสูง รูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็กเพื่อความเหมาะสมกับการดูดซับ รวมถึงมีการกระจายตัวของรูพรุนอย่างเป็นระเบียบ ดังนั้นสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ในยางพารา คือ การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์

4.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

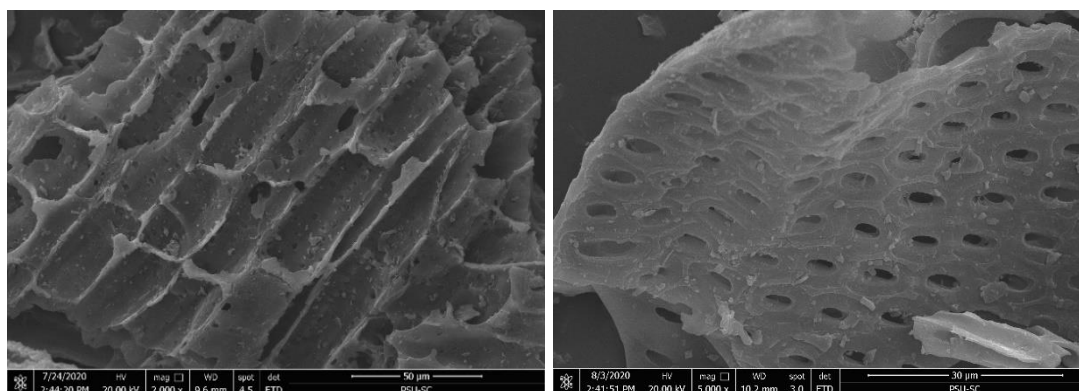
การศึกษาสภาพที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และคาร์บอนไอโซไซยานที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

คุณสมบัติถ่านกัมมันต์	หน่วย	ค่าที่ได้
ผลผลิต	%	23.45
ความหนาแน่น	g/ml	0.47
พื้นที่ผิว	m ² /g	908.59
ขนาดรูพรุน	nm	1.67
ปริมาตรรูพรุน	cm ³ /g	0.36
การดูดซับไอโอดีน	mg/g	677.89 ± 21.65

1) ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์

การศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ให้ลักษณะพื้นที่ผิว และเกิดการกระจายตัวของรูพรุนเป็นระเบียบ ซึ่งจากการประมาณขนาดรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์พบว่า ขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 3 ถึง 5 ไมโครเมตร แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.22



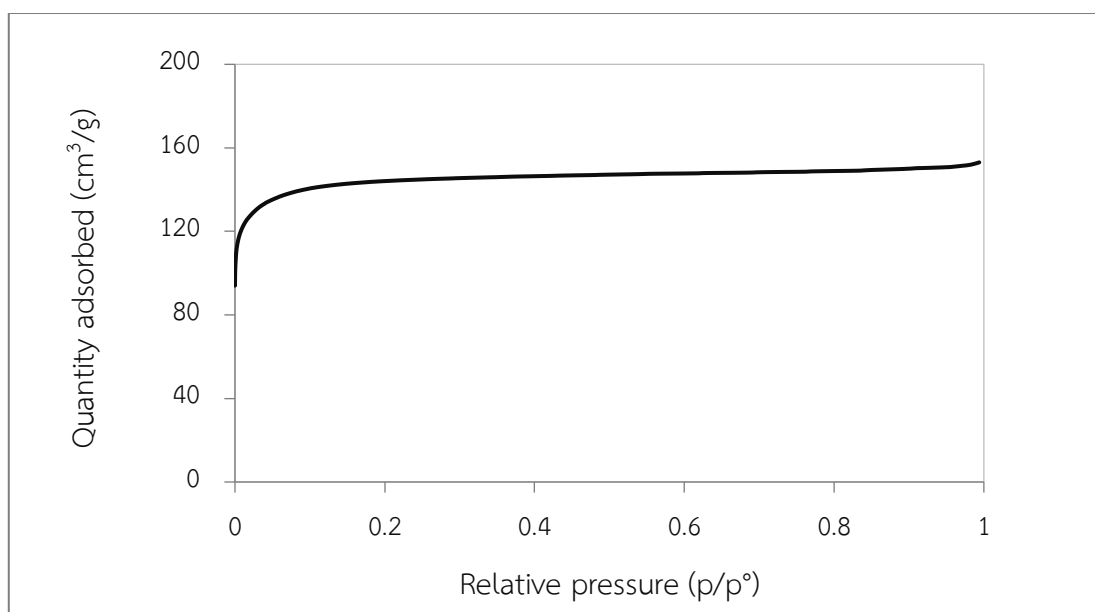
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.22 ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า

2) ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพารา โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer แสดงถึงความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์กับความดันของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน โดย p/p_0 หมายถึงความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ซึ่งเป็นความดันของสารถูกดูดซับ ณ จุดสมดุลของการดูดซับเทียบกับความดันมาตรฐาน (ศศิก, 2554) ผลการศึกษาพบว่า เป็นไอโซเทอร์มชนิดที่ 1 ตามข้อเสนอที่กล่าวไว้ของ Brunauer-Deming-Deming and Teller (BDDT) เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มคงที่ แสดงให้เห็นว่า เป็นการดูดซับก๊าซบนถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.23

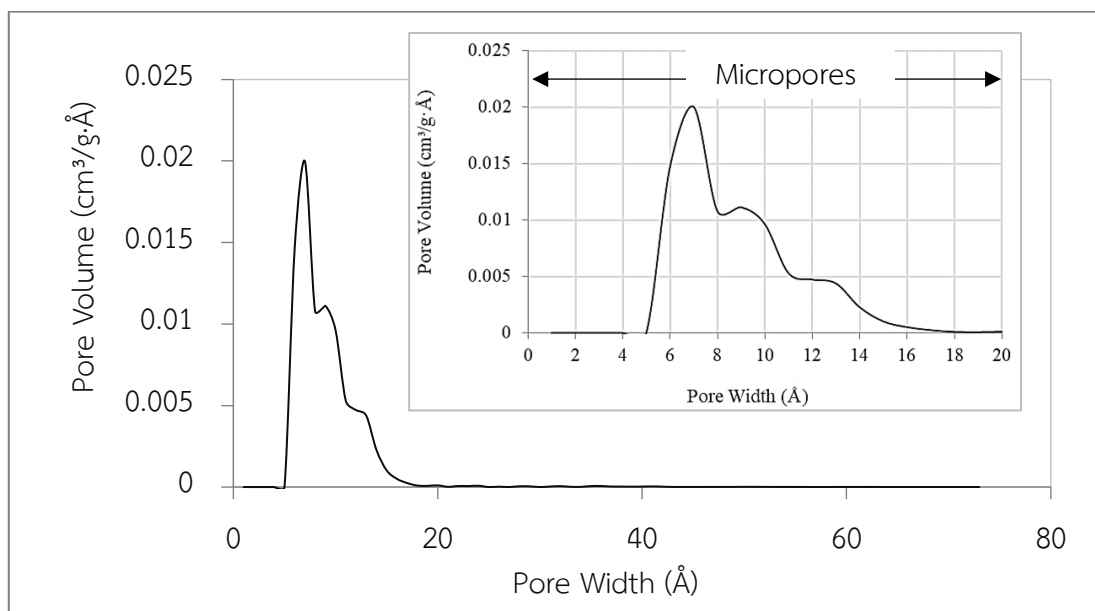


รูปที่ 4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพารา

3) การกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

การกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพาราที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน โดยใช้เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer ซึ่งศึกษาผลของการกระจายขนาดรูพรุนสูงสุดถึง 70 อังสตรอม ผลการศึกษาพบว่า การกระจายขนาดรูพรุน โดยแสดงรายละเอียดของขนาดรูพรุนในช่วง 20 อังสตรอม แสดงความแตกต่างของโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อย่างพารา ซึ่งกราฟแสดงโครงสร้างขนาดรูพรุนจากถ่านกัมมันต์โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 20 อังสตรอม หรือ 2 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับโครงสร้างรูพรุนตามการแบ่งประเภทตามมาตรฐานของ IUPAC พบว่า จัดอยู่

ในช่วงรูพรุนขนาดเล็ก (รูพรุนขนาดเล็กมีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร) โดยผลการศึกษากการกระจายขนาดรูพรุนประกอบด้วยรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดประมาณ 7 อังสตรอม หรือ 0.7 นาโนเมตร และมีปริมาตรรูพรุนสูงสุด 0.02 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมอังสตรอม รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การกระจายขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

4) การดูดซับไอโอดีน

การหาค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ เป็นการถูกดูดซับพื้นฐานที่ใช้ในการบอกความสามารถในการดูดซับถ่านกัมมันต์ เนื่องจากไอโอดีนเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยความสามารถของการดูดซับไอโอดีนในหน่วยมิลลิกรัมบนถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ถ่านกัมมันต์มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงจะให้ความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำ โดยการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์จะต้องมีค่าการดูดซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนพบว่า ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารามีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 677.89 ± 21.65 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (มอก. 900 – 2547)

ดังนั้น ในการศึกษาประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารได้แก่ เบนซีน และโทลูอีน ในงานวิจัยนี้จึงใช้สภาวะในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และทำการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน แสดงรายละเอียดในข้อ 4.3 ดังนี้

4.2 ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

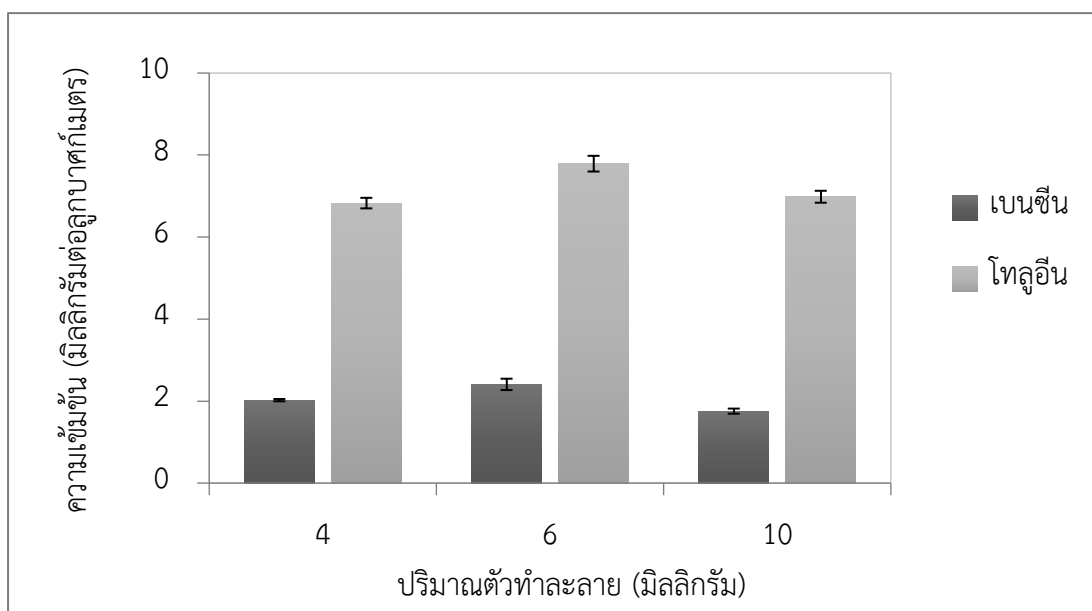
การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds : VOCs) ได้แก่ เบนซีน (Benzene) และโทลูอิน (Toluene) ของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับ จลนศาสตร์การดูดซับ และไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

4.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับมีความแตกต่าง โดยใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ที่ทำการสังเคราะห์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา เพื่อใช้ในการดูดซับเบนซีนและโทลูอิน ซึ่งทำการศึกษาโดยวิธีการสกัด และการวิเคราะห์เชิงปริมาณเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยแสดงรายละเอียด ดังนี้

4.2.1.1 ปริมาณตัวทำละลาย

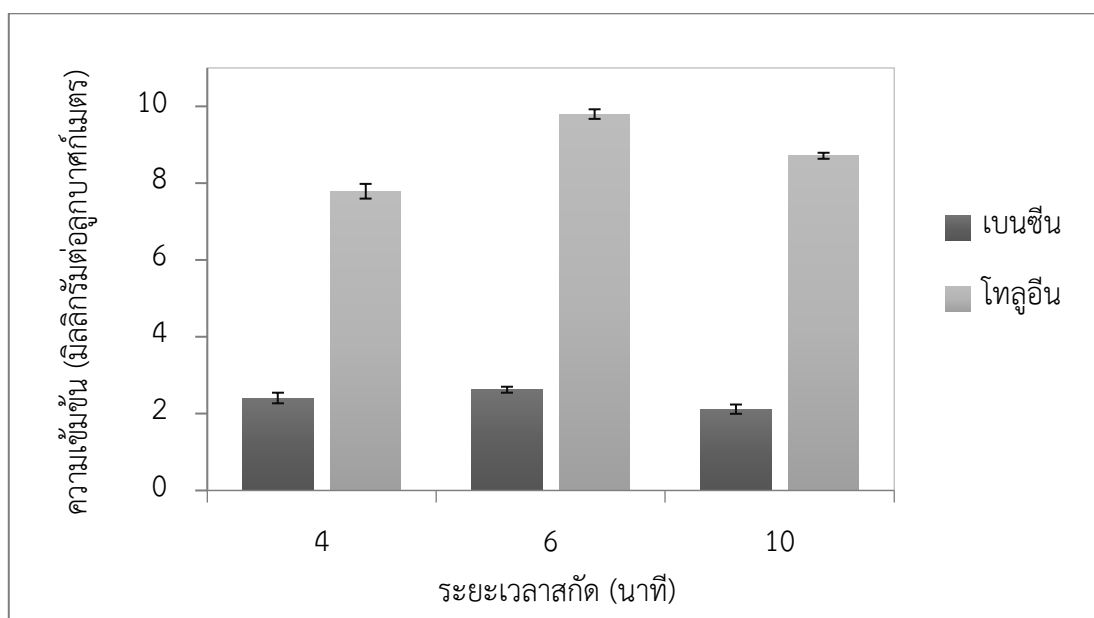
ผลการศึกษาหาปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา พบว่า ปริมาณตัวทำละลายสามารถสกัดเบนซีน และโทลูอินให้ความเข้มข้นได้ดีขึ้น เมื่อใช้ปริมาณตัวทำละลายเพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 6 มิลลิลิตร และเมื่อใช้ปริมาณตัวทำละลายเพิ่มขึ้นเป็น 10 มิลลิเมตร พบว่า ปริมาณตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินที่สกัดออกจากถ่านกัมมันต์มีความเข้มข้นลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณตัวทำละลาย 6 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดถ่านกัมมันต์ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินต่อปริมาณตัวทำละลาย

4.2.1.2 ระยะเวลาในการสกัด

ผลการศึกษาระยะเวลาในการสกัดถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า เมื่อระยะเวลาในการสกัด 5 และ 10 นาที ส่งผลให้ความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้นเป็น 15 นาที พบว่า ระยะเวลาที่นานขึ้นส่งผลต่อความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินที่สกัดออกจากถ่านกัมมันต์โดยมีความเข้มข้นลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาในการสกัด 10 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดถ่านกัมมันต์ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินต่อระยะเวลาสกัด

4.2.2 การศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

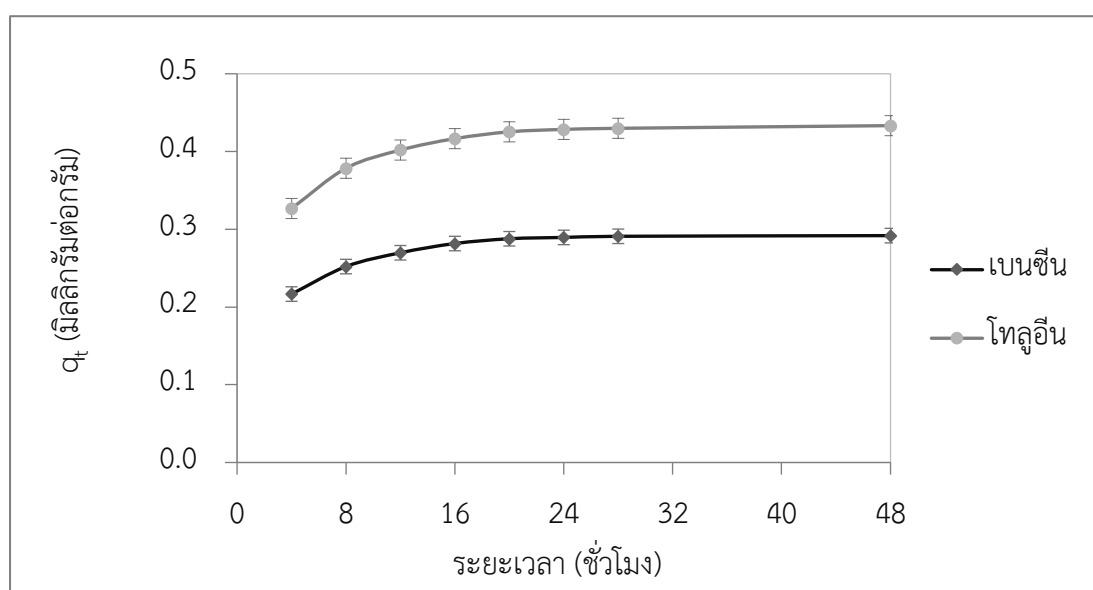
การศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับ และเวลาที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยทำการศึกษาระยะเวลาสมดุลในช่วงเวลา 4 8 12 16 20 24 28 และ 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลในการดูดซับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน และโทลูอินที่ความเข้มข้น 22.93 และ 41.15 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองคือ 1 กรัม ซึ่งผลการศึกษาแสดงรายละเอียด ดังนี้

4.2.2.1 ระยะเวลาในการดูดซับ

ผลการศึกษาระยะเวลาในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_t คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุดูดซับที่ระยะเวลา t (มิลลิกรัมต่อกรัม) และระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) พบว่า ในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง

ระยะแรก ซึ่งค่าการดูดซับที่เวลา 4 ชั่วโมงแรก ให้ความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน เท่ากับ 0.22 และ 0.33 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเวลาการดูดซับนานขึ้น ทำให้การดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเป็นผลจากการเพิ่มโอกาสในการสัมผัสของสารอินทรีย์ระเหยกับ ถ่านกัมมันต์ (Abbas *et al.*, 2016) และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 20 ชั่วโมง การดูดซับของถ่านกัมมันต์ เริ่มคงที่ และเข้าสู่ภาวะสมดุลจนถึง 48 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา เข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนที่ช่วงเวลา 20 ชั่วโมง มีความสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Konggidinata *et al.*, (2017) ซึ่งศึกษาการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ด้วยคาร์บอนเมโสพอร์สพบว่า เข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับที่ช่วงเวลา 20 ชั่วโมง เช่นกัน

ในส่วนของการศึกษาความสามารถ และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนของงานวิจัยนี้พบว่า ความสามารถในการดูดซับเบนซีนเท่ากับ 0.29 มิลลิกรัมต่อกรัม ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน 62.74 เปอร์เซ็นต์ และความสามารถในการดูดซับโทลูอีนเท่ากับ 0.43 มิลลิกรัมต่อกรัม ให้ประสิทธิภาพการดูดซับโทลูอีน 51.67 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับที่ได้จากการศึกษาอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ ในการทดลองมีความเข้มข้นสูง ซึ่งการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนช่วงเวลาที่ 24 28 และ 48 ชั่วโมง ให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาในการศึกษาเพื่อหาค่าจลนศาสตร์การดูดซับ และไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนที่ช่วงระยะเวลา 20 ชั่วโมง แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.27



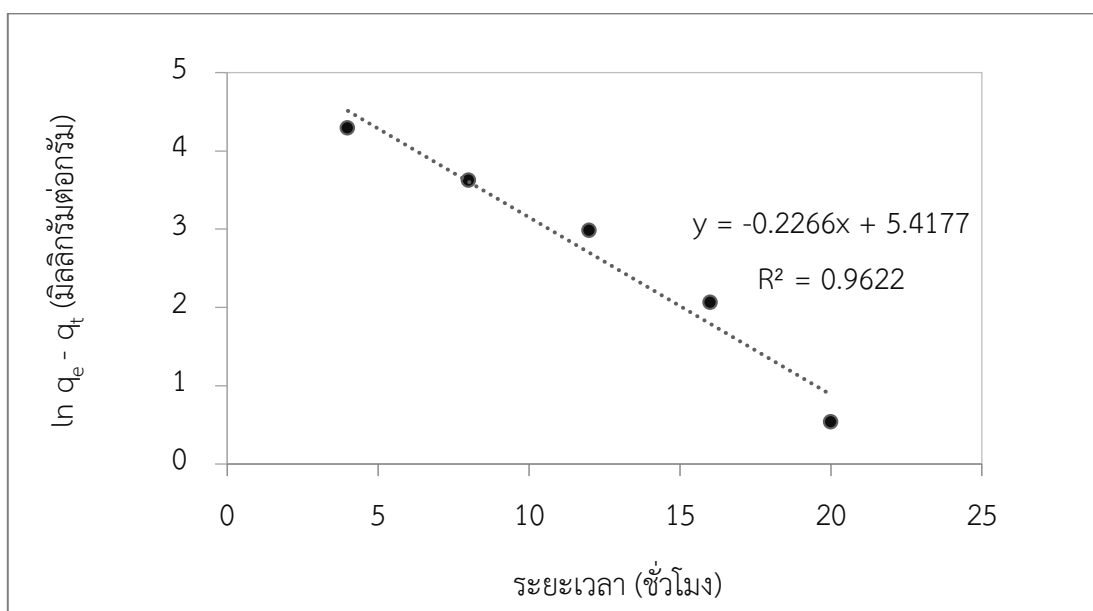
รูปที่ 4.27 ความสามารถในการดูดซับเบนซีนและโทลูอีน และระยะเวลาสัมผัส

4.2.3 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

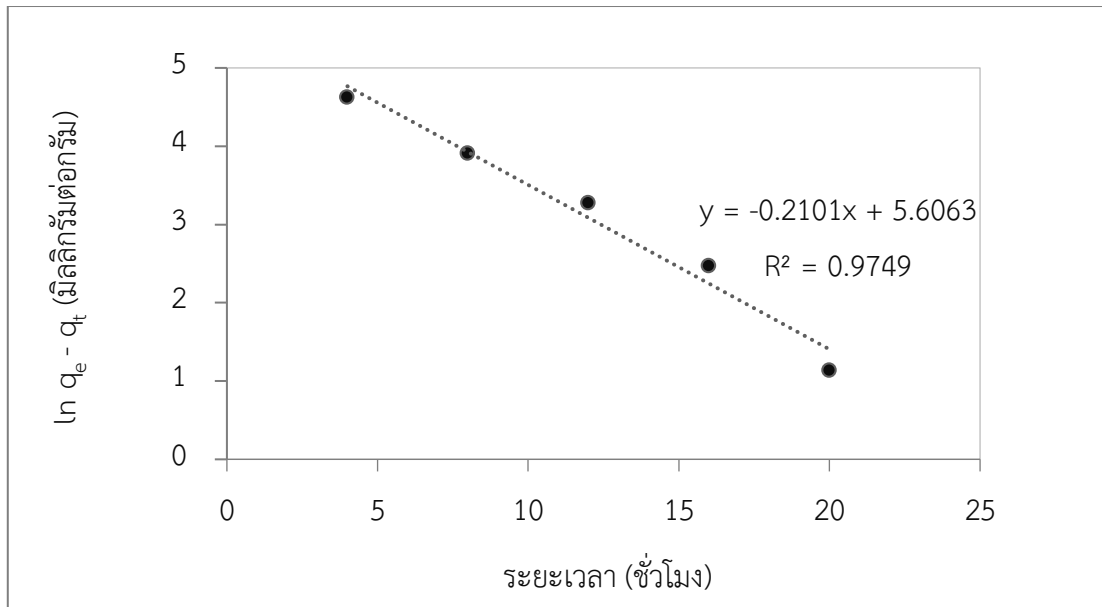
การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอินมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับตามแบบจำลองปฏิกิริยาทางเคมีของการดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่มางพาราและสารอินทรีย์ระเหยได้แก่ เบนซีน และโทลูอิน ซึ่งจลนศาสตร์การดูดซับอธิบายลักษณะของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลหรือการแพร่ของสารตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อทราบถึงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นด้วยอัตราการดูดซับที่ช้าหรือเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลข้างต้นของการศึกษาระยะเวลาสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอินหาค่าจลนศาสตร์การดูดซับ โดยใช้แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ และหาค่าคงที่อัตราเร็วของการดูดซับ โดยผลการศึกษาแสดงรายละเอียด ดังนี้

- สมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)

ผลการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่มางพารา โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (q_e - q_t)$ กับระยะเวลาที่เปลี่ยนไป t ตามสมการ โดยที่ค่า k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.28 และ 4.29



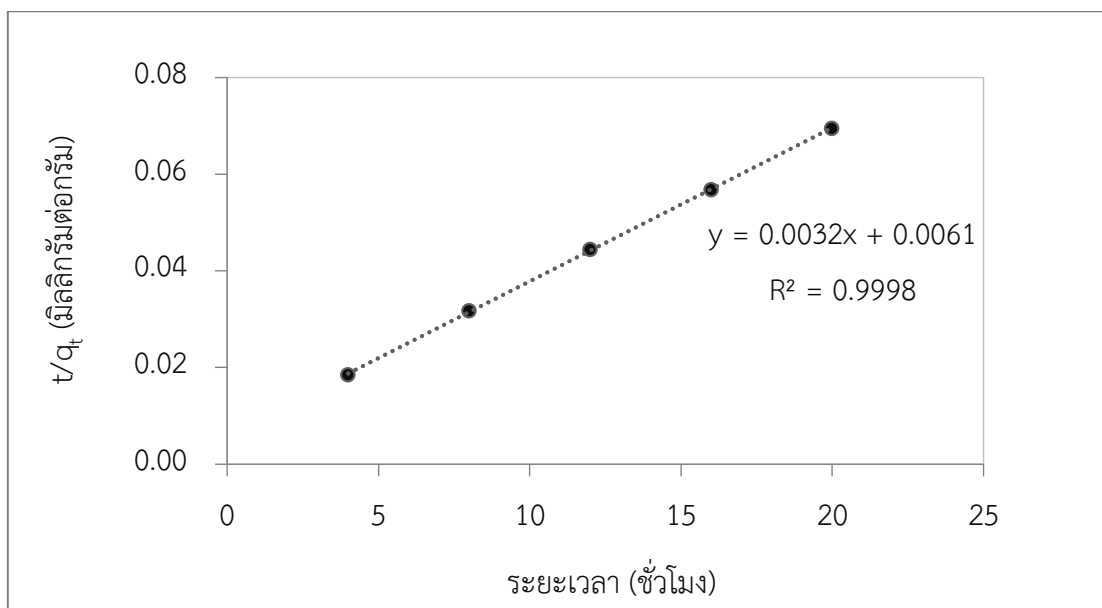
รูปที่ 4.28 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอันดับหนึ่งเทียม



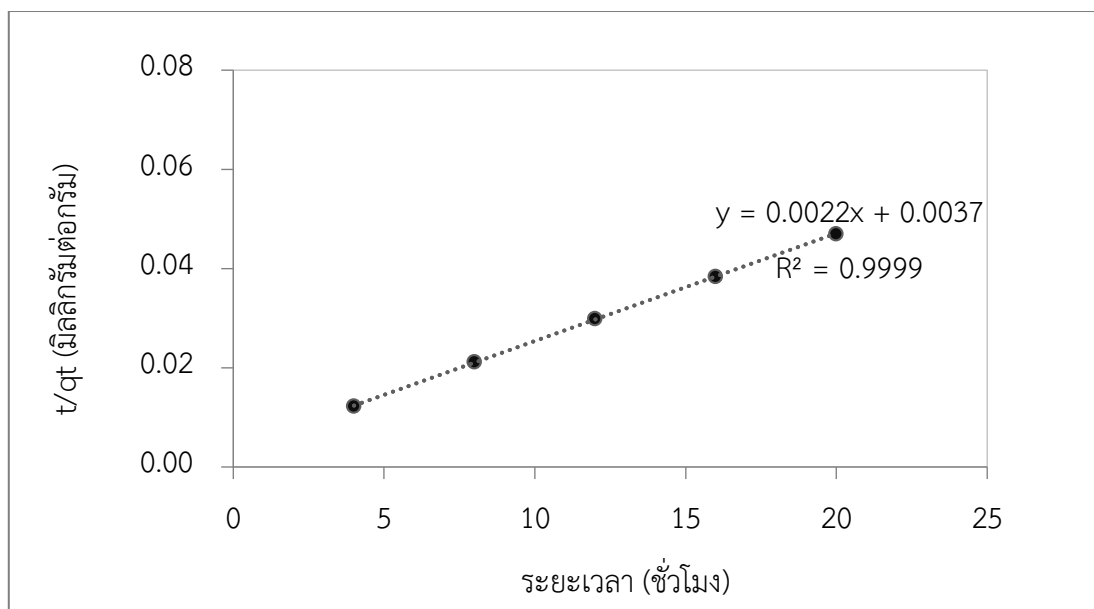
รูปที่ 4.29 จลนศาสตร์การดูดซับโพลูอินแบบอันดับหนึ่งเทียม

- สมการแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)

ผลการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเบนซีน และโพลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป t ตามสมการ โดยที่ค่า K_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.30 – 4.31



รูปที่ 4.30 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอันดับสองเทียม



รูปที่ 4.31 จลนศาสตร์การดูดซับโพลูอินแบบอันดับสองเทียม

ผลการศึกษาที่ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเบนซีน และโพลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากซีเลื้อยไม้ยางพารา เมื่อนำข้อมูลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ และระยะเวลาในการดูดซับมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับระยะเวลาที่เปลี่ยนไป t ตามสมการ โดยใช้แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับระยะเวลาที่เปลี่ยนไปของแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) เมื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้จากแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับพบว่า ค่าประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองอันดับสองเทียมของเบนซีน และโพลูอินเท่ากับ 0.9998 และ 0.9999 ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องมากกว่าค่า R^2 ของแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม ซึ่งมีค่า R^2 ของเบนซีน และโพลูอิน เท่ากับ 0.9622 และ 0.9749 ตามลำดับ เนื่องจากให้ค่าประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า

เมื่อพิจารณาค่า q_e ที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) ของเบนซีน และโพลูอิน พบว่า $q_{e,exp}$ มีค่า 0.29 และ 0.43 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบกับค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e,cal}$) โดยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมมีค่า $q_{e,cal}$ ของเบนซีน และโพลูอินเท่ากับ 0.23 และ 0.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่า $q_{e,cal}$ ของเบนซีน และโพลูอินเท่ากับ 0.31 และ 0.45 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบพบว่า $q_{e,exp}$ มีค่าใกล้เคียงกับค่า $q_{e,cal}$ ที่ได้จากแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Bandura *et al.*, (2017) พบว่าศึกษาการดูดซับเบนซีน และโพลูอิน

โดยใช้ซีโอไลต์ และการศึกษาของ Konggadinata *et al.*, (2017) โดยการดูดซับสารกลุ่ม BTEX ด้วยคาร์บอนเมโสพอร์สพบว่า เป็นแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเช่นกัน

เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation หรือ S.D.) ที่เข้าใกล้ 0 (Ozacar, 2006) พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม ซึ่งให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 0.03 และ 0.02 ตามลำดับ

ดังนั้นผลการศึกษากลศาสตร์การดูดซับโดยรวมสรุปได้ว่า จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอีนด้วยถ่านกัมมันต์จากซีโอไลต์ไม่แย่งพารามีเตอร์ของแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และเมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสอง (k_2) พบว่า การดูดซับเบนซีนมีค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเร็วกว่าการดูดซับโทลูอีน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.68 และ 1.31 มิลลิกรัมต่อกรัมต่ออนาที ตามลำดับ ซึ่งค่าคงที่ของการดูดซับที่ได้จากจลนศาสตร์การดูดซับต่ำบ่งบอกถึงอัตราการดูดซับที่ช้า (Carvalho *et al.*, 2012)

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟไปหาค่าพารามิเตอร์ของจลนศาสตร์การดูดซับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) สามารถแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรจากการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอีน

พารามิเตอร์	เบนซีน	โทลูอีน
$q_{e,exp}$ (mg/g)	0.29	0.43
อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)		
q_e (mg/g)	0.23	0.27
k_1 (mg/g.min)	0.23	0.21
R^2	0.9622	0.9749
อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
q_e (mg/g)	0.31	0.45
k_2 (mg/g.min)	1.68	1.31
R^2	0.9998	0.9999

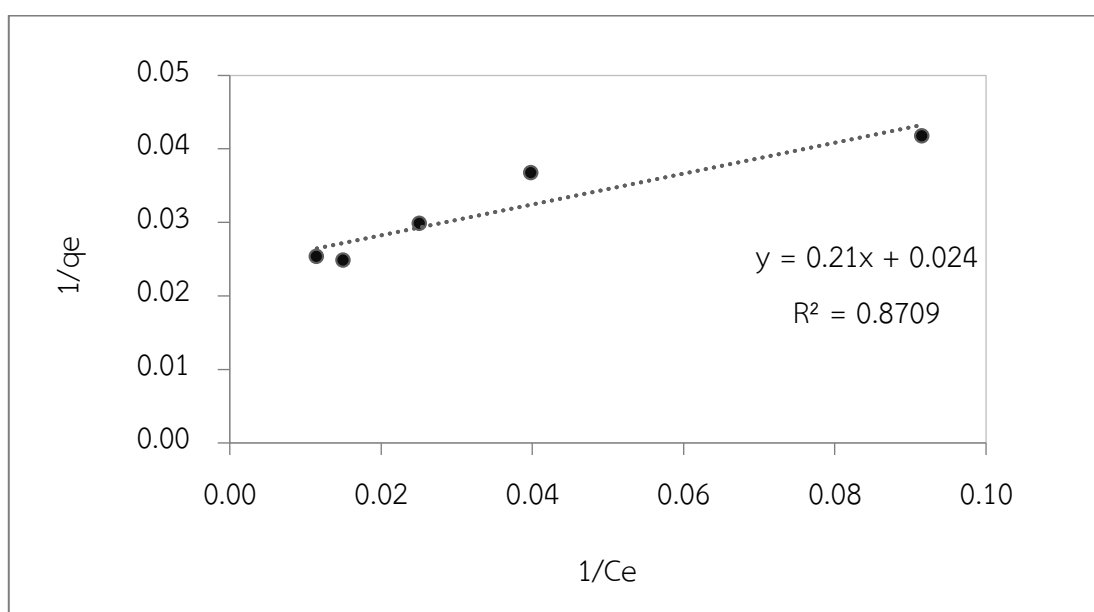
4.2.4 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอินมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของการดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน เป็นการศึกษาผลที่มีความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินที่สภาวะสมดุลมาหาค่าไอโซเทอร์มที่เหมาะสมต่อการดูดซับ เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากซีเลื้อยไม้ยางพารา โดยทำการศึกษาการดูดซับเบนซีน และโทลูอินในช่วงระยะเวลาที่ 20 ชั่วโมง ซึ่งใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่น้ำหนักแตกต่างกันคือ 0.5 1 2 3 และ 4 กรัม ผลการดูดซับเบนซีน และโทลูอินที่ได้นำมาใช้ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และแบบจำลองการดูดซับฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

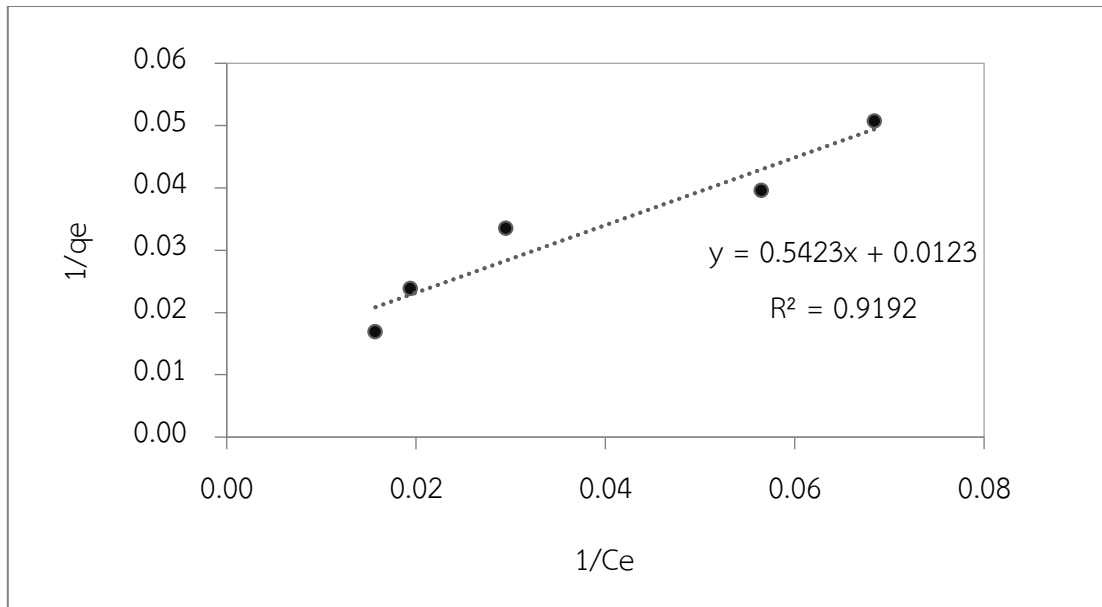
การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ซึ่งค่า R^2 เป็นค่าที่สามารถบ่งชี้ถึงข้อมูลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ และแบบจำลองการดูดซับฟรอนด์ลิช โดยค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด แสดงว่าการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับชนิดนั้น และเหมาะสมที่จะนำไอโซเทอร์มชนิดนั้นมาใช้ในการอธิบายถึงลักษณะของการดูดซับ

- ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากซีเลื้อยไม้ยางพารา โดยใช้แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ ในการอธิบายถึงลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับหรือถ่านกัมมันต์แบบชั้นเดียว โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.32 – 4.33



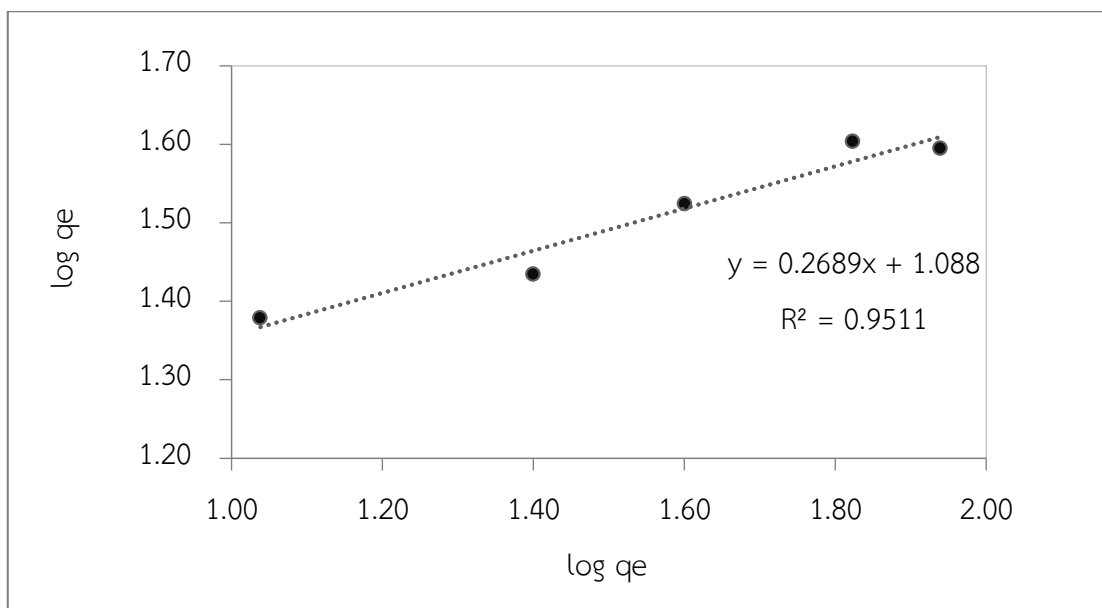
รูปที่ 4.32 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของเบนซีน



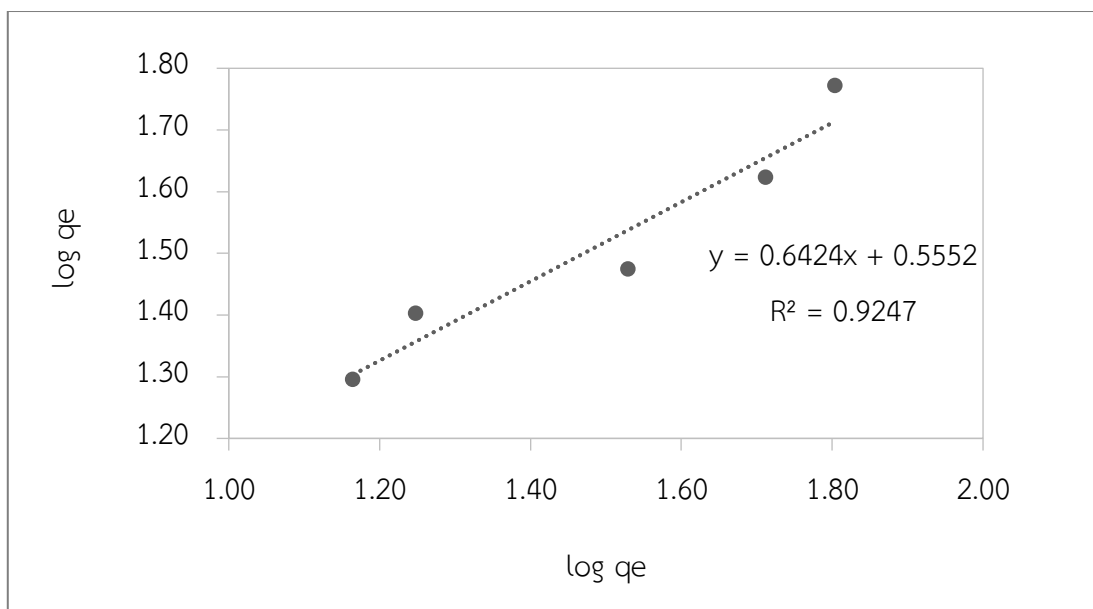
รูปที่ 4.33 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของโพลีเอทิลีน

- ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโพลีเอทิลีนด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าแอมโมเนีย โดยใช้แบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช ในการอธิบายถึงลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับหรือถ่านกัมมันต์แบบหลายชั้น โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.34 และ 4.35



รูปที่ 4.34 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของเบนซีน



รูปที่ 4.35 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโกลูอิน

ผลการศึกษการดูดซับเบนซีน และโกลูอินที่ได้จากกราฟแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ และแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิชพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของเบนซีน และโกลูอินมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช ซึ่งค่า R^2 ของเบนซีน และโกลูอินเท่ากับ 0.9511 และ 0.9247 ตามลำดับ โดยแสดงว่า ผลการดูดซับที่เกิดขึ้นอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นการดูดซับที่มีลักษณะบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) และงานวิจัยของ มณีรัตน์ และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซโกลูอินด้วยถ่านชาร์จากขี้เลื่อยไม้ และไม้กระถินยักษ์ โดยผลการศึกษามีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาค่า $1/n$ ที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชพบว่า ค่า $1/n$ ของเบนซีน และโกลูอินมีค่าเท่ากับ 0.26 และ 0.64 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งอธิบายค่า $1/n$ ได้ว่า ค่าน้อยกว่า 1 (เมื่อค่า $1/n < 1$) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับหรือถ่านกัมมันต์มีปริมาณจำกัดในการใช้เป็นตัวดูดซับเบนซีนและโกลูอิน และค่า $1/n$ ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 สามารถอธิบายถึงลักษณะพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่เป็น Heterogeneous surface ปานกลาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แต่ละตำแหน่งมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกันหรือหมู่ฟังก์ชันที่ดูดซับมีแรงกระทำที่มีแตกต่างกัน (Yao *et al.*, 2010) อาจส่งผลให้ลักษณะของการดูดซับที่เป็นได้ทั้งชั้นเดียวหรือหลายชั้น

เมื่อพิจารณาค่า n ที่ได้จากการคำนวณพบว่า ค่า n ของเบนซีน และโกลูอินมีค่าเท่ากับ 3.72 และ 1.56 ตามลำดับ เนื่องจากค่า n สามารถอธิบายถึงความแข็งแรงของการดูดซับเบนซีนและ

โพลีอินบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ถ้าค่า n ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 10 แสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับที่ดี ถ้าค่า n มากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น (กุสุมา, 2562) ซึ่งจากผลการศึกษาการดูดซับเบนซีน และโพลีอินบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า ความแข็งแรงในการดูดซับเบนซีนอยู่ในระดับปานกลาง แต่ความแข็งแรงของในการดูดซับโพลีอินอยู่ในค่าปานกลางหรือค่อนข้างน้อย

และเมื่อพิจารณาค่าคงที่จากแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิช ซึ่งเป็นค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับ (K_F) พบว่า ค่า K_F ของเบนซีน และโพลีอินมีค่าเท่ากับ 12.25 และ 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นไอโซเทอร์มตามแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิชโดยมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ มณีรัตน์ และคณะ (2019) ซึ่งศึกษาการดูดซับก๊าซโพลีอินด้วยถ่านชาร์จากขี้เลื่อยไม้ และไม้กระถินยักษ์โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วพบว่า เป็นไอโซเทอร์มฟรุนดลิชเช่นกัน (ค่า K_F เท่ากับ 2.6×10^{-4} และ 1.7×10^{-4} มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟไปหาค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) สามารถแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิช

พารามิเตอร์	เบนซีน	โพลีอิน
ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)		
q_m (mg/g)	41.67	81.30
K_L (l/mg)	0.11	0.02
R^2	0.8709	0.9192
ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)		
K_F (mg/g)	12.25	3.59
$1/n$	0.27	0.64
R^2	0.9511	0.9247

4.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราในการดูดซับเบนซีน และโพลีอิน

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโพลีอินโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นตัวดูดซับ ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน และโพลีอินที่ 106.88 และ 93.66 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 4 กรัม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

ของเบนซีน และโทลูอินมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองการดูดซับฟรอนดลิช โดยค่าคงที่สัมพันธ์กับความความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับ (K_F) พบว่า ค่า K_F ของเบนซีน และโทลูอินมีค่าเท่ากับ 12.25 และ 3.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดลิช โดยมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ มณีรัตน์ และคณะ (2019) ซึ่งทำการดูดซับก๊าซโทลูอินด้วยถ่านชาร์จากขี้เลื่อยไม้และไม้กระถินยักษ์โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วพบว่า เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดลิชเช่นกัน (ค่า K_F ของถ่านชาร์จากขี้เลื่อยไม้ และไม้กระถินยักษ์เท่ากับ 2.6×10^{-4} และ 1.7×10^{-4} มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ) และความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินที่เวลา 20 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน 89.78 และ 84.40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนดลิช ดังสมการที่ 4.1

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4.1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

และเมื่อนำผลการศึกษาที่ได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับแทนค่าในแบบจำลองฟรอนดลิช ได้ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3

$$\text{เบนซีน : } q_e = 12.25 C_e^{0.27} \quad (4.2)$$

$$\text{โทลูอิน : } q_e = 3.59 C_e^{0.64} \quad (4.3)$$

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งสมมุติฐานในการใช้ค่าที่ได้จากผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับมาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับของเบนซีน และโทลูอินในสีทาบ้าน โดยมีความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินที่ 1.57 และ 7.10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (ศศิกร, 2554) ในปริมาตร 20 ลิตร ซึ่งเป็นปริมาตรเดียวกันกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ กำหนดให้อากาศที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราให้เหลือความเข้มข้นเบนซีน และโทลูอินน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งผลการศึกษาพบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินเท่ากับ 93.62 และ 98.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

และประสิทธิภาพการดูดซับของเบนซีน และโทลูอินภายในอาคารของคอนโดมิเนียมที่เกิดจากสีทาบ้าน ซึ่งขนาดของคอนโดมิเนียมโดยทั่วไปมีความสูงประมาณ 2.5 เมตร มีพื้นที่ 75

ตารางเมตร ความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอีน 30.35 และ 60.00 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยให้อากาศที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่อย่างพาราให้เหลือความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอีนผ่านมาตรฐาน (กำหนดค่า VOC ในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง เบนซีนต้องไม่เกิน 7.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าโทลูอีนในสถานประกอบการโดยความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานปกติไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของเบนซีน และโทลูอีนภายในอาคารของคอนโดมิเนียมที่เกิดจากสีทาบ้านพบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 99.97 และ 99.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

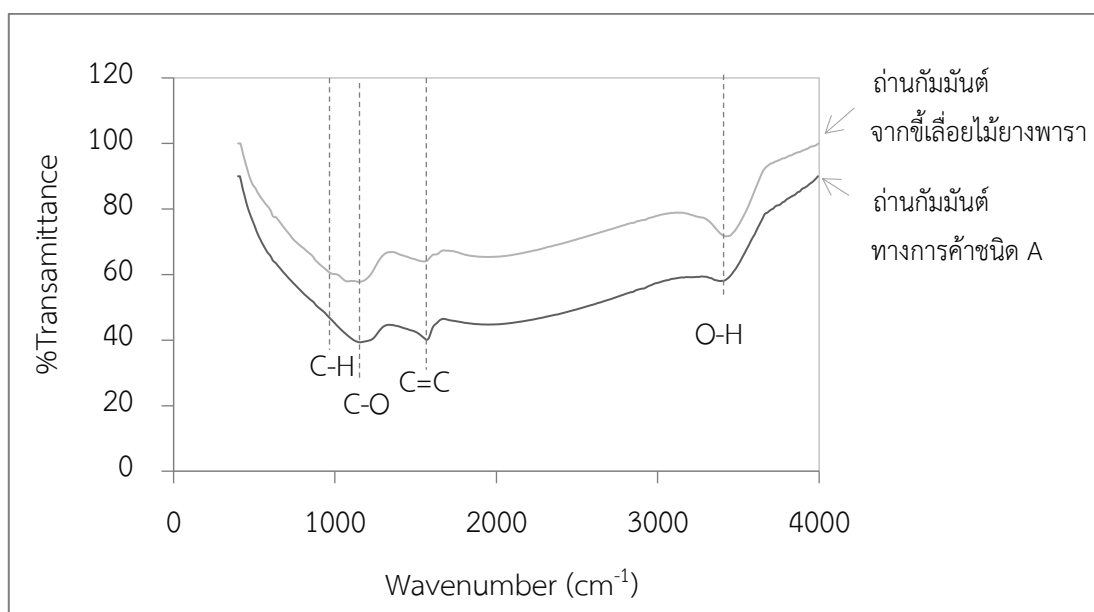
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยการเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่อย่างพาราโดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับไมโครเวฟ กับถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิด A ซึ่งทำการศึกษาโดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้น เช่น การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ การดูดซับไอโอดีน และทำการศึกษากการดูดซับเบนซีนและโทลูอีนในช่วงระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับที่ 20 ชั่วโมง เพื่อหาความสามารถในการดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีนและโทลูอีน ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่อย่างพารา และถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิด A

คุณสมบัติถ่านกัมมันต์	หน่วย	ถ่านกัมมันต์ ซีลี้อยู่ไม่อย่างพารา	ถ่านกัมมันต์ ทางการค้า ชนิด A
พื้นที่ผิว	m ² /g	908.59	*ไม่ได้ทำการ วิเคราะห์
ขนาดรูพรุน	nm	1.67	
ปริมาตรรูพรุน	cm ³ /g	0.36	
การดูดซับไอโอดีน	mg/g	677.89	990.08
ความสามารถในการดูดซับเบนซีน	mg/g	0.29	0.18
ความสามารถในการดูดซับโทลูอีน	mg/g	0.43	0.51
ประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน	%	62.74	39.24
ประสิทธิภาพการดูดซับโทลูอีน	%	51.67	61.74

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ซึ่งการที่ถ่านกัมมันต์มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้มีความสามารถดูดซับสารอินทรีย์ระเหยได้ดี (ฮัญซลี, 2559) โดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม่อย่างพารา และถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิด A หลังการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนพบว่า มีธาตุคาร์บอน

และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีพันธะ O-H C=C C-O และ C-C แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.36 และผลจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนพบว่า การดูดซับเบนซีนของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยไม้ยางพาราให้ความสามารถในการดูดซับดีกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิด A แต่การดูดซับโทลูอีนของถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิด A ให้ความสามารถในการดูดซับดีกว่าถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยไม้ยางพารา



รูปที่ 4.36 หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยไม้ยางพารา และถ่านกัมมันต์ทางการค้าชนิด A ที่ผ่านการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน

ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป ที่ทำการสังเคราะห์มีความจำเพาะกับสารที่ต้องการกำจัด จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ก่อนนำไปใช้งาน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากชี้เลี้ยงโรงงานไม้ยางพาราแปรรูป

ผลการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากชี้เลี้ยงไม้ยางพาราพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชันคือ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนคงตัว 76.43 เปอร์เซ็นต์ และมีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 18.91 และเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากชี้เลี้ยงไม้ยางพาราที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากชี้เลี้ยงไม้ยางพารา โดยผลการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟพบว่า ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์มีความขรุขระและเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ โดยสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟคือ 1000 วัตต์ ซึ่งมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด และผลการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรดฟอสฟอริกพบว่า ลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์จากชี้เลี้ยงไม้ยางพาราที่ทำการกระตุ้นกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุนภายนอกอย่างเป็นระเบียบ และเมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้นเป็น 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เกิดการทำลายโครงสร้างรูพรุนทำให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาตรรูพรุนน้อย และมีพื้นที่ผิวลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกที่เพิ่มขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกคือ ความเข้มข้นที่ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์สูงสุด

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากชี้เลี้ยงโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนของงานวิจัยนี้คือ ถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ และการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งมีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 23.45 ความหนาแน่น 0.47 กรัมต่อมิลลิกรัม มีพื้นที่ผิว 908.59 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 1.67 นาโนเมตร ปริมาตรรูพรุน 0.36 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีค่าการดูดซับไอโอดีน 677.89 ± 21.65 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2 ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินพบว่า ปริมาณตัวทำละลาย คือ 6 มิลลิลิตร และระยะเวลาการสกัด 10 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเบนซีน และโทลูอินออกจากถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ผลการศึกษาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเบนซีน และโทลูอินพบว่า ระยะเวลาในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะแรก เมื่อเวลาการดูดซับนานขึ้นทำให้การดูดซับเบนซีน และโทลูอินเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเมื่อระยะเวลาผ่านไป 20 ชั่วโมง การดูดซับเริ่มคงที่ และเข้าสู่สภาวะสมดุลจนถึง 48 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับเบนซีน และโทลูอินที่ช่วงเวลา 20 ชั่วโมง

ผลการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอินพบว่า การดูดซับที่ระยะเวลา 20 ชั่วโมง มีความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินเท่ากับ 0.23 และ 0.27 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งอัตราเร็วปฏิกิริยาการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน 62.74 และ 51.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอินพบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิช ผลการพิจารณาค่าคงที่จากแบบจำลองฟรุนดลิชพบว่า ค่าคงที่ของการดูดซับเบนซีน และโทลูอินเท่ากับ 2.97 และ 1.74 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับเบนซีน และโทลูอินเท่ากับ 0.26 และ 0.64 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินที่บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีปริมาณจำกัด

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของเบนซีน และโทลูอินที่เกิดจากสีทาบ้านในปริมาตร 20 ลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินเท่ากับ 93.62 และ 98.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับของเบนซีน และโทลูอินภายในอาคารที่เกิดจากสีทาบ้าน ของคอนโดมิเนียมในพื้นที่ 75 ตารางเมตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินเท่ากับ 99.97 และ 99.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยโรงงานไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพร้อมกับไมโครเวฟมีความเหมาะสมที่ใช้เพิ่มทางเลือกในการลดของเสียจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ และมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินที่เกิดขึ้นภายในอาคาร

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรนำสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากชีลี้อย่างพาราที่ได้จากการศึกษานี้ ไปพัฒนาใช้กับเตาเผาขนาดใหญ่หรือเตาเผาระดับอุตสาหกรรม
- 2) ควรศึกษาประเด็นเรื่อง สภาพความเป็นกรดของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ โดยใช้สภาพความกรดเป็นที่ย่างกัน เพื่อดูความเหมาะสมของการใช้น้ำในการปรับสภาพ
- 3) ควรทำการศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ และไอโซเทอร์มการดูดซับเฉพาะเบนซีน และโทลูอีน เพื่อดูประสิทธิภาพของการดูดซับในกรณีที่ใช้สารประเภทใด ประเภทหนึ่ง
- 4) ควรนำถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ใช้สำหรับการดูดซับก๊าซโดยเฉพาะ มาทำการศึกษา ประสิทธิภาพการดูดซับเพื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้

บรรณานุกรม

- กุสุมา เชาวลิต. (2562). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยไมโครเวฟร่วมกับการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ เพื่อการดูดซับสีย้อมผ้าบาติก. หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีศึกษา. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- เกียรติศักดิ์ สมสัย, พลกฤษณ์ จิตรโธ และ วรนนต์ นาคบรรพต. (2556). ความสามารถในการดูดซับไอระเหยโทลูอินของถ่านจากกระบวนการไพโรไลซิสยางรถยนต์. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- กัญญา ม่วงแก้ว. (2559). คุณภาพอากาศภายในอาคาร. กลุ่มงานสิ่งแวดล้อม. โครงการพิสิทธ์และวิศวกรรม. กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- กระทรวงพลังงาน. (2564). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สืบค้นจาก : <http://www.dede.go.th>. (สืบค้นเมื่อ : 23/3/2564)
- กระทรวงสาธารณสุข. (2555). คู่มือวิชาการ เรื่อง สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (Volatile Organic Compounds: VOCs). สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2547). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ มอก.900-2547. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2554). โครงการการจัดการสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยเทคโนโลยีป้องกันมลพิษสำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก. สืบค้นจาก: <http://www.pcd.go.th>. (20/5/2561)
- จิตตรี พละกุล. (2552). การดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เฉลิมพร ทองพูน. (2557). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกหุ้มเมล็ดสบู่ดำเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.
- ไชยยันต์ ไชยยะ, ปทุมทิพย์ ต้นทับทิมทอง และ ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. (2551). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดยางพาราโดยใช้การกระตุ้นด้วยไอน้ำ. โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

- ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี. (2546). ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย. สืบค้นจาก: <http://www.chemtrack.org>. (23/11/2561)
- ทองฉัตร จิ่งสมาน และ พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์. (2559). การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 33 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2559.
- ธราพงษ์ วิทิตสานต์. (2554). ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.
- นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์ (2550). หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นภาพร พานิช, แสงสันต์ พานิช, วันชัย รั้วไพบูลย์, พูนศิริ สินธุ์รัตน์, ปรัชญ์ สง่างาม และ ปัทมา บุณนาค. (2547). ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. กรุงเทพฯ : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นภคณีย์ อาชวาคม. (2554). คุณภาพอากาศภายในอาคาร. สืบค้นจาก : <http://www.eng.chula.ac.th>. (29/12/2561)
- บุญชัย ตรีสกุลมหชัย. (2536). การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรินทร เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์ คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง และไผ่หมาจู้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิทักษ์ อยู่มี. (2558). การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากผงถ่านไม้ โดยการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง. สารวิทยาศาสตร์ มข.
- พรชกร ใจประดับเพชร. (2549). การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มณีรัตน์ องค์กรธนดี, ทับทิม ชาตีสวรรณ์ และ อติศักดิ์ ปัตติยะ. (2019). การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้ถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร. วารสารวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตราชชมงคลธัญบุรี.

- รุจิรา ปิ่นแก้ว. (2556). การผลิตและการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดเพื่อใช้ในการดูดซับมีเทน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตร์บัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- วิจิตร จินดำพันธ์ไพโรจน์. (2543). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิญญู จิตสัมพันธ์เวช, วินัย สมบูรณ์, ภัณฑิรา เกตุแก้ว, ประภา เทพสินธพสกุล และอภิษฎา มุ่งพัฒนกิจ. (2550). เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสาร BTEX จากอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ [ฉบับพิเศษ]. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 30(4): 633-640.
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2558). ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย โดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.
- วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ และ พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์. (2558). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยลิสงโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและพลังงานไมโครเวฟ. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรางคณา อนุชิตโอฬาร. (2546). ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สืบค้นจาก : https://www.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/212_67-70.pdf. (29/12/2561)
- ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. (2554). สูตรทางเคมีของสาร BTEX. สืบค้นจาก : <http://msds.pcd.go.th/index.asp>. (9/5/2561)
- ศูนย์วิทยาศาสตร์. (2564). มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี. สืบค้นจาก: www.ssct.sru.ac.th. (24/12/2563)
- ศศิกร แสงพงษ์ชัย. (2554). การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยภายในอาคารด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากกาแฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิษฏาภรณ์ เครือสุวรรณ. (2550). สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ. (2564). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สืบค้นจาก:
www.osit.psu.ac.th. (24/12/2563)

สาวิตรี พูลมา. (2548). การรับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยจากสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในเขต
กรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชาดา ละม้ายพันธุ์ และ ภควดี สุขอนันต์. (2557). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากฝักมะค่าโมง (1
ขั้นตอน) และถ่านฝักมะค่าโมง (2 ขั้นตอน) ที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก. วิทยาศาสตร์
เกษตร. ปีที่ 45 ฉบับที่ 2 (พิเศษ) พฤษภาคม – สิงหาคม 2557.

สุภาพร รัตนพันธ์ และ พนิดา กังซุ่น. (2561). การดูดซับเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด.
วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2561.

สัมฤทธิ์ โหม่พวง. (2558). คาร์บอนกัมมันต์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.

สรารุช ศรีคุณ. (2550). การศึกษาการดูดซับสี้อมและไอออนโลหะตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์
จากเปลือกทุเรียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี.
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

อาอีเซาะส์ เบ็ญหาวัน, สุนีย์ แวมะ, วรณกัษมา ฮารน และ ฮาซัน ดอปอ. (2561). การเตรียมและ
ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกลูกหอย. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและ
การเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.

อัญชลี คัตรมี. (2559). สภาวะของการใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟชนิดหลอดสำหรับตรวจวัด
สารกลุ่ม BTEX. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชามลพิษสิ่งแวดล้อม
และความปลอดภัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

องอาจ สุยะพันธ์, กมลขวัญ ไชยศรีหา, นิศารัตน์ ทองอินทร์, อัครเดช ศรีชาดา, พิรัชฎา มุสิกพงศ์
และ ชนิษฐา มีวาสนา. (2558). การพัฒนาวัสดุดูดซับไอระเหยสารโกลูอินจากถ่านไม้.
สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อภิชน วัชเรนทร์วงศ์, ชนัตถ์ โชคเจริญรัตน์ และ อศิราภ์ ฤทธิรัตน์. (2561). การศึกษาและใช้
ประโยชน์ผลิตภัณฑ์จากการทำเหมือง (Leonardite) ในการดูดซับยาปราบศัตรูพืชที่ตกค้าง.
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- อรณิชา แก้วเทศ กนกวรรณ สังข์ทอง และ ชลดา ธีรการุณวงศ์. (2015). ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารระเหยเบนซีนโดยเทคนิคการเก็บตัวอย่าง แบบพาสซีฟ. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
- Abbas, A. F., and Ahmed, M. J. (2016). Mesoporous activated carbon from date stones (*Phoenix dactylifera* L.) by one-step microwave assisted K_2CO_3 pyrolysis. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 201-207.
- Agmur, E., Ozmak, M., and Aktas, Z. (2008). A novel method for production of activated carbon from waste tea by chemical activation with microwave energy. *Fuel*, 87(15-16), 3278-3285.
- Alslaibi, T. M., Abustan, I., Ahmad, M. A., and Foul, A. A. (2013). A review: production of activated carbon from agricultural byproducts via conventional and microwave heating. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(7), 1183-1190.
- American Water Works Association. (1974). Standard test for determination of iodine number of granular Activated Carbon AWWA B604-14 674-679.
- Katramee, A. and Chuersuwan, N. (2017). A Low Cost Tube-Type Passive Sampler for Ambient BTEX Monitoring in Urban Settings, Thailand. 5th International Conference on Advances in Chemical, Biological & Environmental Engineering (ACBEE-17), Singapore.
- Angin, D. (2014). Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride. *Fuel*, 115, 804-811.
- Bandura, L., Kołodynska, D., and Franus, W. (2017). Adsorption of BTX from aqueous solutions by Na-P1 zeolite obtained from fly ash. *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 214-223.
- Bansode, R. R., Losso, J. N., Marshall, W. E., Rao, R. M., and Portier, R. J. (2004). Pecan shell-based granular activated carbon for treatment of chemical oxygen demand (COD) in municipal wastewater. *Bioresource Technology*, 94(2), 129-135.

- Biniak, S., Swiatkowski, A., Pakula, M., and Radovic, L. R. (2001). Electrochemical studies of phenomena at active carbon-electrolyte solution interfaces. *Chemistry and physics of carbon*, 125-226.
- Budinova, T., Ekinici, E., Yardim, F., Grimm, A., Björnbom, E., Minkova, V., and Goranova, M. (2006). Characterization and application of activated carbon produced by H_3PO_4 and water vapor activation. *Fuel processing technology*, 87(10), 899-905.
- Budinova, T., Petrov, N., Parra, J., and Baloutzov, V. (2008). Use of an activated carbon from antibiotic waste for the removal of Hg (II) from aqueous solution. *Journal of environmental management*, 88(1), 165-172.
- Carvalho, M. N., Da Motta, M., Benachour, M., Sales, D. C. S., and Abreu, C. A. M. (2012). Evaluation of BTEX and phenol removal from aqueous solution by multi-solute adsorption onto smectite organoclay. *Journal of hazardous materials*, 239, 95-101.
- Ceyhan, A. A., Şahin, O., Saka, C., and Yalçın, A. (2013). A novel thermal process for activated carbon production from the vetch biomass with air at low temperature by two-stage procedure. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 170-175.
- Dejang, N., Somprasit, O., and Chindaruksa, S. (2015). A preparation of activated carbon from Macadamia shell by microwave irradiation activation. *Energy Procedia*, 79, 727-732.
- Dias, J. M., Alvim-Ferraz, M. C., Almeida, M. F., Rivera-Utrilla, J., and Sánchez-Polo, M. (2007). Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: a review. *Journal of environmental management*, 85, 833-846.
- Duan, X., Srinivasakannan, C., Wang, X., Wang, F., and Liu, X. (2017). Synthesis of activated carbon fibers from cotton by microwave induced H_3PO_4 activation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 70, 374-381.

- Dwivedi, C.P., Sahu, J.N., Mohanty, C.R., RajMohan, B. and Meikap, B.C. (2008). Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb (II) removal. *Journal of Hazardous Materials*. 156: 596-603.
- Foo, K.Y., and Hameed, B.H. (2012). A rapid regeneration of methylene blue dye-loaded activated carbons with microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 98, 123-128.
- Goodman, N. B., Steinemann, A., Wheeler, A. J., Paevere, P. J., Cheng, M., and Brown, S. K. (2017). Volatile organic compounds within indoor environments in Australia. *Building and Environment*, 122, 116-125.
- Goodman, N. B., Wheeler, A. J., Paevere, P. J., Selleck, P. W., Cheng, M., and Steinemann, A. (2018). Indoor volatile organic compounds at an Australian university. *Building and Environment*, 135, 344-351.
- Hesas, R. H., Daud, W. M. A. W., Sahu, J. N., and Arami-Niya, A. (2013). The effects of a microwave heating method on the production of activated carbon from agricultural waste: a review. *Journal of Analytical and Applied pyrolysis*, 100. (1-11).
- Hassler, J.W. (1967). Activated carbon. London: Leonard Hill.
- Ilgen, E., Levsen, K., Angerer, J., Schneider, P., Heinrich, J., and Wichmann, H. E. (2001). Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment—Part II: univariate and multivariate analysis and case studies of indoor concentrations. *Atmospheric Environment*, 35(7), 1253-1264.
- Kim, J.A., Kim, S., Kim, H.J., and Kim, Y.S. (2011). Evaluation of formaldehyde and VOCs emission factors from paints in a small chamber: The effects of preconditioning time and coating weight. *Journal of hazardous materials*, 187(1-3), 52-57.
- Kim, S., Kim, H. J., and Moon, S. J. (2006). Evaluation of VOC emissions from building finishing materials using a small chamber and VOC analyser. *Indoor and Built Environment*, 15(6), 511-523.

- Klett, C., Duten, X., Tieng, S., Touchard, S., Jestin, P., Hassouni, K., and Vega-González, A. (2014). Acetaldehyde removal using an atmospheric non-thermal plasma combined with a packed bed: Role of the adsorption process. *Journal of hazardous materials*, 279, 356-364.
- Konggidinata, M. I., Chao, B., Lian, Q., Subramaniam, R., Zappi, M., and Gang, D. D. (2017). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for adsorption of BTEX onto Ordered Mesoporous Carbon(OMC). *Journal of Hazardous Materials*, 336,249-259.
- Kumar, B. P., Shivakamy, K., Miranda, L. R., and Velan, M. (2006). Preparation of steam activated carbon from rubberwood sawdust (*Hevea brasiliensis*) and its adsorption kinetics. *Journal of hazardous materials*, 136(3), 922-929.
- Liang, W., Wang, C., Yang, C., and Yang, X. (2014). Volatile organic compounds in different interior construction stages of an apartment. *Building and environment*, 81, 380-387.
- Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., and Guo, L. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 233-238.
- Mazlan, M.A.F., Uemura, Y., Yusup, S., Elhassan, F., Uddin, A., Hiwada, A., and Demiya, M. (2016). Activated carbon from rubber wood sawdust by carbon dioxide activation. *Procedia Engineering*, 148, 530-537.
- Mimmo, T., Panzacchi, P., Baratieri, M., Davies, C. A., and Tonon, G. (2014). Effect of pyrolysis temperature on miscanthus (*Miscanthus^x giganteus*) biochar physical, chemical and functional properties. *Biomass and Bioenergy*, 62, 149-157.
- Molhave, L., Clausen, G., Berglund, B., De Ceaurriz, J., Kettrup, A., Lindvall, T., and Seifert, B. (1997). Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations. *Indoor Air*, 7(4), 225-240.
- Mopoung, S. and Nogklai, W. (2008). Chemical and surface properties of longan seed activated charcoal, *International Journal of Physical Sciences*, 3, 234-239

- Namazi, A. B., Allen, G. D., and Jira, C. Q. (2015). Microwave-assisted pyrolysis and activation of pulp mill sludge. *Biomass and bioenergy*, 73, 217-224.
- Negara, D. N. K. P., Nindhia, T. G. T., Surata, I. W., Hidajat, F., and Sucipta, M. (2020). Textural characteristics of activated carbons derived from tabah bamboo manufactured by using H_3PO_4 chemical activation. *Materials Today: Proceedings*, 22, 148-155.
- Omri, A., and Benzina, M. (2012). Removal of manganese (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon derived a new precursor: Ziziphus spina-christi seeds. *Alexandria Engineering Journal*, 51(4), 343-350.
- Ozacar, M. (2006). Contact time optimization of two-stage batch adsorber design using second-order kinetic model for the adsorption of phosphate onto alunite. *Journal of hazardous materials*, 137(1), 218-225.
- Pak, S. H., Jeon, M. J., and Jeon, Y. W. (2016). Study of sulfuric acid treatment of activated carbon used to enhance mixed VOC removal. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 195-200.
- Puziy, A. M., Poddubnaya, O. I., Martinez-Alonso, A., Suárez-Garcia, F., and Tascón, J. M. D. (2002). Synthetic carbons activated with phosphoric acid: I. Surface chemistry and ion binding properties. *Carbon*, 40(9), 1493-1505.
- Radovic, L. R., and Rodriguez-Reinoso, F. (1997). Carbon materials in catalysis. *Chemistry and physics of carbon*, 25, 243.
- Siripanee, S., Kasemsiri, P., Kamwilaisak, K., and Saengprachatanarug, K. (2019). Hight Performance Activated Carbon Produced from Black Liquor. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 19(3), 48-60.
- Srinivasakannan, C. and Bakar, M.Z.A. (2004). Production of activated carbon from rubber wood sawdust. *Biomass and Bioenergy*, 27(1), 89-96.
- Srivastava, P. K., Pandit, G. G., Sharma, S., and Rao, A. M. (2000). Volatile organic compounds in indoor environments in Mumbai, India. *Science of the Total Environment*, 255(1-3), 161-168.

- Sun, K., and chun Jiang, J. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from rubber-seed shell by physical activation with steam. *Biomass and bioenergy*, 34(4), 539-544.
- Sun, Y., and Webley, P. A. (2010). Preparation of activated carbons from corncob with large specific surface area by a variety of chemical activators and their application in gas storage. *Chemical Engineering Journal*, 162(3), 883-892.
- Tehrani, N. H. M. H., Alivand, M. S., Rashidi, A., Shamskar, K. R., Samipoorgiri, M., Esrafil, M. D., and Shafiei-Alavijeh, M. (2020). Preparation and characterization of a new waste-derived mesoporous carbon structure for ultrahigh adsorption of benzene and toluene at ambient conditions. *Journal of hazardous materials*, 384, 121317.
- Wu, Y., Jin, X. J., and Zhang, J. (2013). Characteristics of nitrogen-enriched activated carbon prepared from waste medium density fiberboard by potassium hydroxide. *Journal of wood science*, 59(2), 133-140.
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., and Ngah, C. 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.
- Yao, Y., Xu, F., Chen, M., Xu, Z., and Zhu, Z. (2010). Adsorption behavior of methylene blue on carbon nanotubes. *Bioresource technology*, 101(9), 3040-3046.
- Zhang, L., Steinmaus, C., Eastmond, D. A., Xin, X. K., and Smith, M. T. (2009). Formaldehyde exposure and leukemia: a new meta-analysis and potential mechanisms. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 681(2-3), 150-168.
- Zhang, X., Gao, B., Creamer, A. E., Cao, C., and Li, Y. (2017). Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review. *Journal of hazardous materials*, 338, 102-123
- Zhang, Z., Lei, Y., Li, D., Zhao, J., Wang, Y., Zhou, G., and He, Q. (2020). Sudden heating of H₃PO₄-loaded coconut shell in CO₂ flow to produce super activated carbon and its application for benzene adsorption. *Renewable Energy*, 153, 1091-1099.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือ

1. อุปกรณ์

- 1.1 เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (tube furnace)
- 1.2 ตู้อบ ยีห้อ binder รุ่น FD115
- 1.3 เครื่องไมโครเวฟ
- 1.4 เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 1.5 เครื่องบดละเอียด
- 1.6 เครื่องเขย่าตะแกรง
- 1.7 ตะแกรงร่อนมาตรฐาน
- 1.8 ครกบดละเอียด
- 1.9 ชุดกรองสุญญากาศ
- 1.10 กระดาษกรอง Whatman No.1 และ No.42
- 1.11 กระดาษวัดค่าพีเอช (pH)
- 1.12 ขวดไวอัลขนาด 2 และขนาด 40 มิลลิลิตร
- 1.13 อะลูมิเนียมฟอยล์
- 1.14 พาราฟิล์ม
- 1.15 โถดูดความชื้น
- 1.16 ก่องทดลองขนาด 20 ลิตร
- 1.17 เครื่องเขย่าสาร
- 1.18 ไชริงค์กรองสาร Nylon 0.45 มิลลิเมตร
- 1.19 เครื่องแก้วต่าง ๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

2. สารเคมี

- 2.1 กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)
- 2.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 2.3 โซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot H_2O$)
- 2.4 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
- 2.5 โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
- 2.6 ไอโอดีน (I_2)
- 2.7 โพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3)
- 2.8 สารละลายน้ำแป้ง (Starch)
- 2.9 ก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- 2.10 เบนซีน (C_6H_6)

2.11 โทลูอิน (C_7H_8)

2.12 อะซีโตน (C_3H_6O)

3. เครื่องมือ

3.1 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA8000 เป็นการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เพื่อวิเคราะห์หาค่าประกอบโดยประมาณของปริมาณสารระเหย (Volatile matter) เถ้า (Ash) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของตัวอย่างซีล้อยไม้ยางพาราที่ทำการคาร์บอนเซชัน เพื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนคงตัวที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 เครื่อง Thermogravimetric Analysis

ที่มา : ศูนย์วิทยาศาสตร์, 2564

3.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT - IR) รุ่น Bruker/Tensor 27 เป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ (Functional group) โดยใช้เทคนิคการบดผสมผงถ่านกัมมันต์จากซีล้อยไม้ยางพารากับโพรแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) โดยวัดดูประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer

ที่มา : สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ, 2564

3.3 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) การวิเคราะห์พื้นผิว และความเป็นรูพรุน โดยใช้หลักการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างในลักษณะภาพ 3 มิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว และความเป็นรูพรุนภายนอกของถ่านกัมมันต์ รวมถึงรูปร่างลักษณะหรือสัณฐานวิทยาทั่วไปถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 เครื่อง Scanning Electron Microscope

ที่มา : สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ, 2564

3.4 เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer รุ่น ASAP2460 เป็นเครื่องที่ใช้วิเคราะห์พื้นที่ผิว (Surface area) และการกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution) ของอนุภาค โดยอัตโนมัติ ใช้หลักการวัดปริมาณก๊าซที่ถูกดูดซับบนผิวของอนุภาค โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer

ที่มา : สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ, 2564

3.5 เครื่อง Gas Chromatography รุ่น 7890A โดยใช้ Flame Ionization (FID) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย และกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่กึ่งระเหย งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Gas Chromatography สำหรับการวิเคราะห์ความหาเข้มข้นเชิงปริมาณของเบนซีน และโทลูอีน แสดงดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 เครื่อง Gas Chromatography

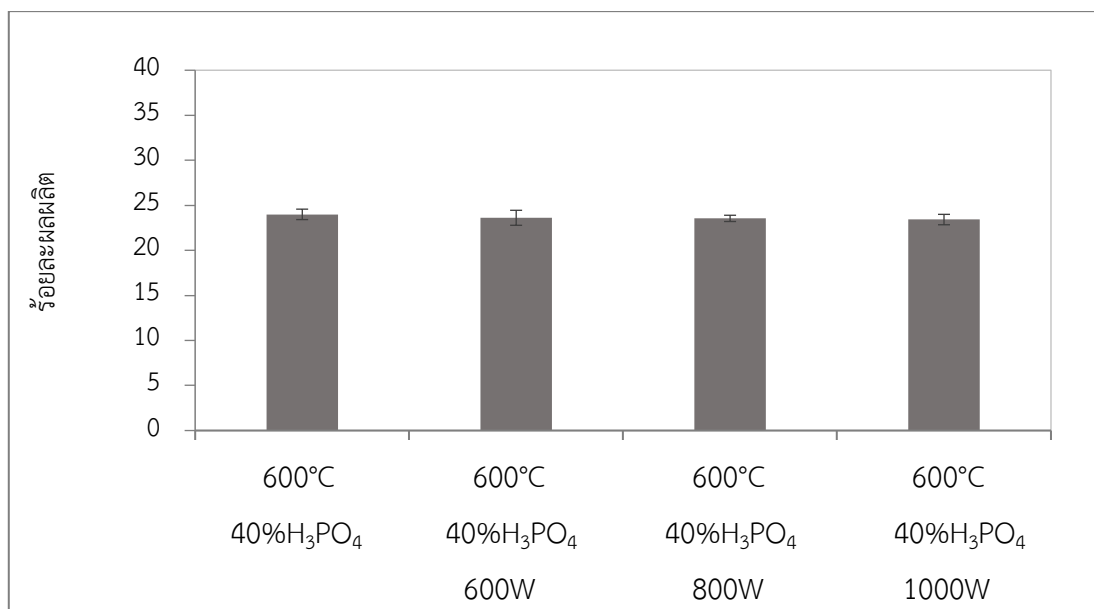
ที่มา : สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ, 2564

ภาคผนวก ข
การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟ

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟ

1. ผลของการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่มีผลต่อผลผลิต

การศึกษาผลการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ร่วมกับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ และไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 800 และ 1000 วัตต์ มีค่าร้อยละผลผลิตที่ใกล้เคียงกัน โดยถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ 600 วัตต์ (600°C _40% H_3PO_4 _600W) มีค่าร้อยละผลผลิตสูงสุดคือ มีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 23.62 ในทางกลับกัน เมื่อการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตถ่านกัมมันต์ลดลง และถ่านกัมมันต์ที่ทำการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ 1000 วัตต์ (600°C _40% H_3PO_4 _1000W) ค่าร้อยละผลผลิตต่ำที่สุดคือ 23.42 ± 0.05 ซึ่งผลการศึกษากการกระตุ้นไมโครเวฟส่งผลต่อร้อยละผลผลิตเพียงเล็กน้อย ผลการศึกษาแสดงรายละเอียดดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงผลของอุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชันที่มีผลต่อร้อยละผลผลิต

2. หมูฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา

การศึกษาหมูฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 800 และ 1000 วัตต์ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer ผลการศึกษาแสดงรายละเอียด ดังนี้

โดยผลการศึกษาหมูฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพาราพบว่า มีความหลากหลายของหมูฟังก์ชันปรากฏอยู่บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ โดยตำแหน่งเลขคลื่นที่มีผลต่อกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกบนถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา ได้แก่

- ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $1780 - 1520 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากพันธะ C=O ของหมูคาร์บอนิล และคาร์บอกซิล แสดงว่ามีกรดคาร์บอกซิลิก เมื่อกระตุ้นด้วยไมโครเวฟส่งผลให้คลื่นลดลงเล็กน้อย และคลื่นเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น

- ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $1520 - 1300 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากพันธะ C=C เกิดจากพันธะในวงอะโรมาติกที่เพิ่มขึ้นโดยหมูฟังก์ชันที่มีขั้ว มีความยาวคลื่นสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากมีระบบอะโรมาติกเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟ)

- ตำแหน่งเลขคลื่นที่ $1200 - 1130 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากพันธะ C-O เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทเอสเทอร์ โดยมีความสัมพันธ์กันกับปริมาณของฟอสฟอรัส และออกซิเจนในถ่านกัมมันต์ (สัมฤทธิ์, 2558) โดยความเข้มจะหายไปเมื่อกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟเพิ่มขึ้น โดยฟอสฟอรัสมีส่วนช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น (สุชาติ และภควดี, 2557)

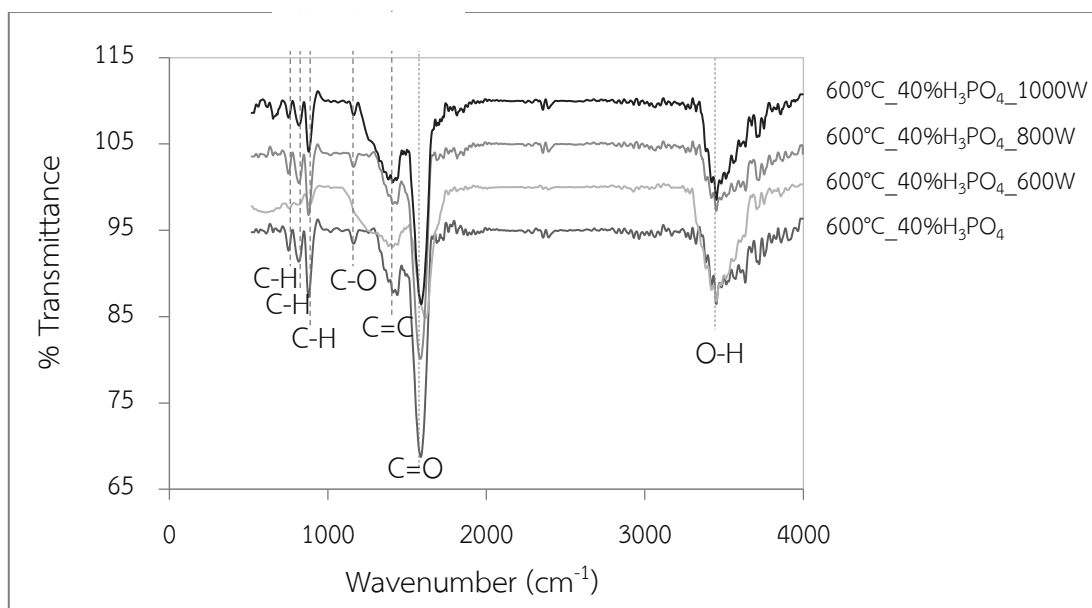
- ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 875, 817, 754 และ 657 cm^{-1} เกิดจากพันธะ C-H ในวงเบนซิน ที่มีหมูแทนที่ต่าง ๆ ซึ่งความเข้มของคลื่นที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มในการลดปริมาณสารระเหยให้เหลือน้อยลงจากกระบวนการใช้ไมโครเวฟ

การศึกษาหมูฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์จากซีเลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งพบว่าการกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าต่างกันมีตำแหน่งเลขคลื่นที่ได้บนผิวถ่านกัมมันต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ ข.1 และรูปที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 สรุปช่วงเลขคลื่นที่เกิดหมู่ฟังก์ชัน และพันธะของตำแหน่งช่วงเลขคลื่นของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม้ยางพาราที่ทำกระตุ้นด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน

ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})	พันธะ	ตำแหน่งเลขคลื่น			
		600°C 40% H_3PO_4	600°C 40% H_3PO_4 600W	600°C 40% H_3PO_4 800W	600°C 40% H_3PO_4 1000W
3650 - 3000	O-H	3450 *	3450 **	3450 *	3450 **
1780 - 1520	C=O	1589 ***	1622 *	1591 **	1587 ***
1520 - 1300	C=C	1438 *	1415 *	1413 *	1409 *
1200 - 1130	C-O	1164 *	-	1161 *	1168 *
910 - 650	C-H	889 *	875 *	875 *	881 **
		810 *	821 *	817 **	817 *
		765 *	654 *	754 **	754 *
		654 *		654 *	654 **

หมายเหตุ ***, **, * หมายถึง % Transmittance (***) มากที่สุด, ** ปานกลาง, * น้อย)



รูปที่ ข.2 หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ไม้ยางพาราที่ทำการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน

การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM

รายละเอียดการวิเคราะห์ การดูดซับไอโอดีนมีดังนี้

1) การเตรียมสารละลาย

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (5% โดยน้ำหนัก)

เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

- สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (0.1 N)

ละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 24.82 กรัม ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.1 กรัม ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรทั้งหมดเป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา และทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการเทียบมาตรฐานสารละลาย

- สารละลายมาตรฐานไอโอดีน (0.1 ± 0.001 N)

ชั่งไอโอดีน 12.7 กรัม และสารโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.10 กรัม ผสมให้เข้ากันในปิอกเกอร์เติมน้ำ 2 – 5 มิลลิลิตร คนให้เข้ากันแล้วค่อยๆ เติมน้ำทีละน้อย (ครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร) จนปริมาตรทั้งหมดเป็น 40 มิลลิลิตร ทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะเพื่อให้ละลายหมด แล้วถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรทั้งหมดเป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา ตรวจสอบความเข้มข้นกับสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 N

- สารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (0.1 N)

อบโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์จากนั้นละลายโพแทสเซียมไอโอเดต 3.5667 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรทั้งหมดเป็น 1000 มิลลิลิตร

- สารละลายแป้ง

ผสมแป้ง 1 ± 0.5 กรัม ในน้ำเย็น 5 – 10 มิลลิลิตร คนสารละลายให้เข้ากัน แล้วเติมน้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 มิลลิลิตร แล้วเทสารละลายลงในน้ำเดือด 1 ลิตร แล้วต้มต่อจนเดือด 4 – 5 นาที น้ำแป้งควรเตรียมวันต่อวันเท่านั้น

2) การเทียบมาตรฐานสารละลาย

- การเทียบมาตรฐานสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 N

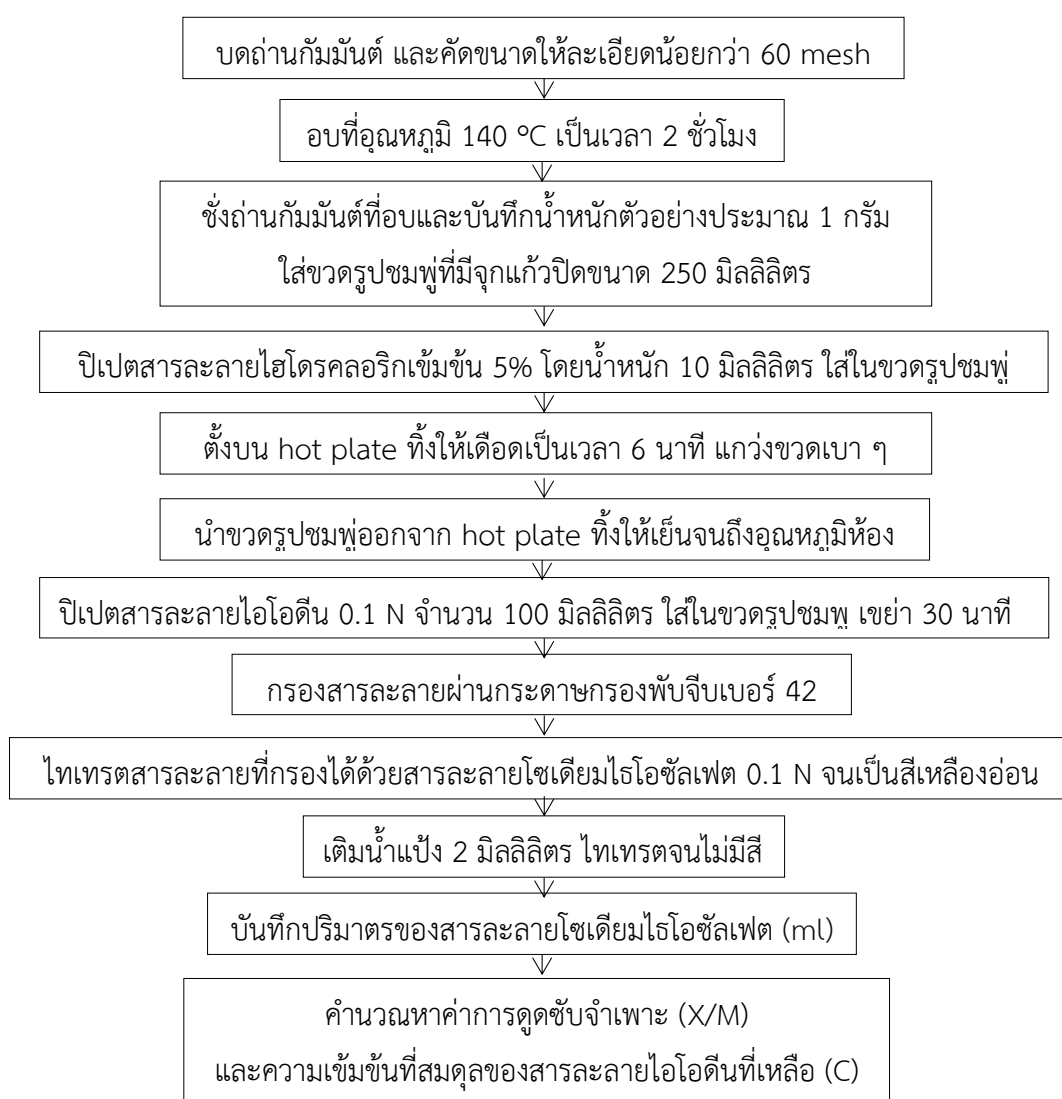
ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) 2.00 กรัม เขย่าจนละลายจากนั้นปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตรลงในขวดรูปชมพู่แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 N

จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2 – 3 หยด แล้วไทเทรตต่อจนสารละลายจากสีน้ำเงินจนไม่มีสี ทำการไทเทรตอย่างน้อย 3 ครั้งคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- การเทียบมาตรฐานสารละลายไอโอดีน 0.1 ± 0.001 N

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกระทั่งสารละลายไอโอดีนเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2 – 3 หยด แล้วไทเทรตต่อจนสารละลายไม่มีสี คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

3) วิธีการวิเคราะห์



ค่าการดูดซับจำเพาะหรือค่าเลขไอโอดีน (X / M) คำนวณได้จากสมการที่ ค.1

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ X / M คือ มิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับ

A คือ $(N_1) \times 12693.0$

เมื่อ N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)

B คือ $(N_2) \times 126.93$

เมื่อ N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (N)

M คือ ปริมาณถ่านที่ใช้ (g)

ค่าคงที่ของการเจือจาง (DF) คำนวณได้จากสมการที่ ค.2

$$DF = \frac{(I + H)}{F} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ I คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีน (cm^3)

H คือ ปริมาตรของสารละลายไฮโดรคลอริกร้อยละ 5 (cm^3)

F คือ ปริมาตรของสารละลายไอโอดีนที่ใช้ในการไทเทรต (cm^3)

ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ (C) คำนวณได้จากสมการที่ ค.3

$$C = \frac{(N_2 + S)}{F} \quad (\text{ค.3})$$

เมื่อ S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (cm^3)

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าอย่างพารา

การทดลอง	Sample M (g)	Vol. of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)	C	$\frac{X}{M}$ (mg/g)	log C	$\log \frac{X}{M}$	I_2 No. (mg/g)
ครั้งที่ 1	1.7601	6.6	0.01	618.26	-1.88	2.79	654.03
	1.5109	10.2	0.02	654.23	-1.69	2.82	
	1.3502	12.9	0.03	676.69	-1.59	2.83	
ครั้งที่ 2	1.7593	6.1	0.01	626.41	-1.94	2.80	696.28
	1.5011	9.0	0.02	680.64	-1.74	2.83	
	1.3571	11.1	0.02	709.99	-1.65	2.85	
ครั้งที่ 3	1.7529	6.3	0.01	625.54	-1.90	2.79	683.35
	1.5076	9.2	0.02	674.03	-1.73	2.83	
	1.3505	11.7	0.02	701.16	-1.63	2.84	

ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาณ

การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์

วิธีการวิเคราะห์ความหนาแน่นเชิงปริมาตรของถ่านกัมมันต์ (Bulk density) แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

- 1) อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 10 – 120 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
- 2) ชั่งกระบอกตวงที่มีปริมาตร 10 มิลลิลิตร ให้มีความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 (คือ มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.01 กรัม และบันทึกผล (X_0))
- 3) ใส่ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ลงไปในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม จากนั้นกระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับของถ่านกัมมันต์ในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับที่คงที่นั้นไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตัดถ่านกัมมันต์เข้าหรือออกจากกระบอกตวง แล้วกระแทกกันกระบอกตวงใหม่จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่เป็น 10 มิลลิลิตร
- 4) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างพร้อมกระบอกตวงบันทึกผล (X_1)
- 5) คำนวณค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรได้จากสมการที่ ง.1

$$\text{ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (กรัมต่อมิลลิลิตร)} = \frac{(X_1 - X_0)}{10} \quad (\text{ง.1})$$

ภาคผนวก จ

การศึกษาปริมาณตัวทำละลาย และระยะเวลาในการสกัด

ตารางที่ จ.1 ความเข้มข้นของเบนซีนต่อปริมาณตัวทำละลาย

ปริมาณตัวทำละลาย (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น (mg/m ³)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	2.00	2.01	2.05	2.02 ± 0.03
6	2.31	2.35	2.56	2.41 ± 0.14
10	1.71	1.83	1.73	1.75 ± 0.06

ตารางที่ จ.2 ความเข้มข้นของโทลูอีนต่อปริมาณตัวทำละลาย

ปริมาณตัวทำละลาย (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้น (mg/m ³)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	6.86	6.93	6.68	6.82 ± 0.13
6	7.57	7.87	7.92	7.78 ± 0.19
10	6.99	7.12	6.83	6.98 ± 0.15

ตารางที่ จ.3 ความเข้มข้นของเบนซีนต่อระยะเวลาในการสกัด

ระยะเวลาในการสกัด (นาที)	ความเข้มข้น (mg/m ³)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
5	2.31	2.35	2.56	2.41 ± 0.14
10	2.63	2.54	2.70	2.62 ± 0.08
15	1.98	2.17	2.20	2.12 ± 0.12

ตารางที่ จ.4 ความเข้มข้นของเบนซีนต่อระยะเวลาในการสกัด

ระยะเวลาในการสกัด (นาที)	ความเข้มข้น (mg/m ³)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
5	7.57	7.88	7.92	7.79 ± 0.19
10	9.90	9.84	9.66	9.79 ± 0.12
15	8.80	8.68	8.66	8.71 ± 0.08

ภาคผนวก ฉ

การศึกษาระยะเวลาสมดุลงการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

ตารางที่ ฉ.1 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าแอมเวย์พารา

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (mg/m ³)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	11.01	10.58	10.91	10.83 ± 0.23
8	12.30	12.69	12.81	12.60 ± 0.27
12	13.35	13.41	13.70	13.49 ± 0.19
16	13.80	14.16	14.29	14.08 ± 0.25
20	14.29	14.20	14.68	14.39 ± 0.25
24	14.43	14.26	14.74	14.48 ± 0.24
28	14.49	14.42	14.73	14.55 ± 0.16
48	14.48	14.51	14.78	14.59 ± 0.16

ตารางที่ ฉ.2 ระยะเวลาสมดุลของการดูดซับโทลูอีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าแอมเวย์พารา

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (mg/m ³)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	15.86	16.05	17.09	16.34 ± 0.66
8	18.53	19.04	19.20	18.92 ± 0.35
12	19.91	20.00	20.38	20.09 ± 0.25
16	20.35	20.98	21.15	20.83 ± 0.42
20	21.08	21.09	21.66	21.27 ± 0.34
24	21.41	21.11	21.74	21.42 ± 0.32
28	21.42	21.33	21.73	21.49 ± 0.21
48	21.47	21.83	21.69	21.66 ± 0.18

ภาคผนวก ข

ความสามารถในการดูดซับเบนซีน และโทลูอินด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

ตารางที่ ข.1 ความสามารถในการดูดซับเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าแอมโมเนีย

เวลา (ชั่วโมง)	q_t (mg/g)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	0.22	0.21	0.22	0.22 ± 0.006
8	0.25	0.25	0.26	0.25 ± 0.006
12	0.27	0.27	0.27	0.27 ± 0.000
16	0.28	0.28	0.29	0.28 ± 0.006
20	0.29	0.28	0.29	0.29 ± 0.006
24	0.29	0.29	0.29	0.29 ± 0.000

ตารางที่ ข.2 ความสามารถในการดูดซับโทลูอีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าแอมโมเนีย

เวลา (ชั่วโมง)	q_t (mg/g)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	0.32	0.32	0.34	0.33 ± 0.012
8	0.37	0.38	0.38	0.38 ± 0.006
12	0.40	0.40	0.41	0.40 ± 0.006
16	0.41	0.42	0.42	0.42 ± 0.006
20	0.42	0.42	0.43	0.43 ± 0.006
24	0.43	0.42	0.43	0.43 ± 0.006

ภาคผนวก ซ
การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

ตารางที่ ข.1 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

เวลา (ชั่วโมง)	$\ln q_e - q_t$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	-2.67	-2.55	-2.64	-2.29 ± 0.14
8	-3.14	-3.33	-3.40	-3.00 ± 0.14
12	-3.79	-3.85	-4.17	-3.63 ± 0.20
16	-4.30	-5.07	-5.59	-4.43 ± 0.46
20	-6.09	-6.31	-6.72	-5.77 ± 0.27

ตารางที่ ข.2 จลนศาสตร์การดูดซับโทลูอินแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

เวลา (ชั่วโมง)	$\ln q_e - q_t$			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	-2.20	-2.23	-2.45	-2.62 ± 0.06
8	-2.85	-3.05	-3.12	-3.28 ± 0.13
12	-3.51	-3.56	-3.88	-3.93 ± 0.20
16	-3.85	-4.76	-4.47	-4.85 ± 0.65
20	-5.45	-5.96	-5.88	-6.37 ± 0.83

ตารางที่ ข.3 จลนศาสตร์การดูดซับเบนซีนแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

เวลา (ชั่วโมง)	t/q _t			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	18.16	18.91	18.33	18.33 ± 0.39
8	33.52	31.51	31.23	31.23 ± 1.25
12	44.94	44.73	43.79	43.79 ± 0.61
16	57.98	56.49	55.99	55.99 ± 1.04
20	69.98	70.41	68.14	68.14 ± 1.20

ตารางที่ ข.4 จลนศาสตร์การดูดซับโทลูอีนแบบอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

เวลา (ชั่วโมง)	t/q _t			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
4	12.61	12.46	11.70	12.24 ± 0.49
8	21.59	21.00	20.84	21.14 ± 0.40
12	30.13	30.01	29.45	29.86 ± 0.36
16	39.31	38.13	37.82	38.41 ± 0.79
20	47.45	47.41	46.16	47.02 ± 0.73

ภาคผนวก ฉ
การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอิน

ตารางที่ ฅ.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เสื่อยไม้ยางพารา

	ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้น (mg/m ³)	
		เบนซีน	โทลูอีน
ครั้งที่ 1	4.0096	95.70	84.81
ครั้งที่ 2	4.0042	95.00	73.85
ครั้งที่ 3	4.0035	97.17	78.48
เฉลี่ย	4.0057 ± 0.0033	95.95 ± 1.11	79.05 ± 5.50
ครั้งที่ 1	3.0055	83.67	69.60
ครั้งที่ 2	3.0051	76.04	70.37
ครั้งที่ 3	3.0019	83.69	71.14
เฉลี่ย	3.0041 ± 0.0019	81.13 ± 4.41	70.37 ± 0.77
ครั้งที่ 1	2.0058	66.54	60.46
ครั้งที่ 2	2.0046	67.26	59.12
ครั้งที่ 3	2.0008	67.29	56.60
เฉลี่ย	2.0037 ± 0.0026	67.03 ± 0.43	58.73 ± 1.96
ครั้งที่ 1	1.0007	40.24	43.68
ครั้งที่ 2	1.0046	40.68	40.61
ครั้งที่ 3	1.0051	39.98	42.06
เฉลี่ย	1.0035 ± 0.0024	40.30 ± 0.35	42.12 ± 1.59
ครั้งที่ 1	0.5088	20.51	30.02
ครั้งที่ 2	0.5087	20.09	30.75
ครั้งที่ 3	0.5032	19.30	29.16
เฉลี่ย	0.5069 ± 0.0032	19.96 ± 0.61	29.98 ± 0.80

ตารางที่ ฅ.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าไต้ย่างพารา

ปริมาณถ่าน (g)	$1/q_e$	$1/c_e$
4.0057 ± 0.0033	0.002	0.09
3.0041 ± 0.0019	0.002	0.04
2.0037 ± 0.0026	0.001	0.03
1.0035 ± 0.0024	0.001	0.02
0.5069 ± 0.0032	0.001	0.01

ตารางที่ ฅ.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของโทลูอิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าไต้ย่างพารา

ปริมาณถ่าน (g)	$1/q_e$	$1/c_e$
4.0057 ± 0.0033	0.003	0.07
3.0041 ± 0.0019	0.002	0.04
2.0037 ± 0.0026	0.002	0.03
1.0035 ± 0.0024	0.001	0.02
0.5069 ± 0.0032	0.001	0.02

ตารางที่ ๓.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของเบนซีน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าแอมเวย์พารา

ปริมาณถ่าน (g)	log qe	log Ce
4.0057 ± 0.0033	2.68	1.04
3.0041 ± 0.0019	2.73	1.41
2.0037 ± 0.0026	2.83	1.60
1.0035 ± 0.0024	2.90	1.82
0.5069 ± 0.0032	2.90	1.94

ตารางที่ ๓.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของโทลูอิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าแอมเวย์พารา

ปริมาณถ่าน (g)	log qe	log Ce
4.0057 ± 0.0033	2.60	1.16
3.0041 ± 0.0019	2.67	1.37
2.0037 ± 0.0026	2.77	1.54
1.0035 ± 0.0024	2.92	1.71
0.5069 ± 0.0032	3.07	1.80

ภาคผนวก ญ
การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา
ในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีน

1. การหาปริมาณถ่านกัมมันต์โดยใช้แบบจำลองของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนโดยความสัมพันธ์ที่ได้จากกราฟ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิช การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) แสดงให้เห็นว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนมีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับ ฟรุนดลิชได้ดีกว่าแลงเมียร์ ซึ่งมีค่า R^2 ของเบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 0.9511 และ 0.9247 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังสมการที่ ญ.1

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

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_F คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

ตัวอย่างการคำนวณค่าที่ใช้หาแบบจำลองการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังสมการที่ ญ.2

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{ญ.2})$$

เบนซีน ค่าตัวแปรที่ได้จากสมการ $y = 0.2689X + 1.088$

การหาค่า K_F : โดยใช้สมการที่ ญ.2

$$\log q_e = \log K$$

$$1.088 = \log K$$

$$K = 10^{1.088}$$

$$= 12.25 \text{ mg/g}$$

การหาค่า $1/n$: ความชัน = $1/n$

$$\text{ความชัน} = 0.2689$$

$$= 0.27$$

โทลูอีน ค่าตัวแปรที่ได้จากสมการ $y = 0.6424X + 0.5552$

การหาค่า K_F : โดยใช้สมการที่ ญ.2

$$\log q_e = \log K$$

$$0.5552 = \log K$$

$$K = 10^{0.5552}$$

$$= 3.59 \text{ mg/g}$$

$$\begin{aligned}\text{การหาค่า } 1/n : \text{ ความชื้น} &= 1/n \\ \text{ความชื้น} &= 0.6424 \\ &= 0.64\end{aligned}$$

และเมื่อนำผลการศึกษาที่ได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับเบนซีน และโทลูอินแทนค่าในแบบจำลองฟรุนดลิช ดังสมการที่ ญ.2 ได้ ดังสมการที่ ญ.3 และ ญ.4

$$\text{เบนซีน} : q_e = 12.25C_e^{0.27} \quad (\text{ญ.3})$$

$$\text{โทลูอิน} : q_e = 3.59C_e^{0.64} \quad (\text{ญ.4})$$

2. ประสิทธิภาพการดูดซับของเบนซีน และโทลูอินที่เกิดจากสีทาบ้าน

งานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งสมมุติฐานในการนำค่าที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแบบจำลองฟรุนดลิชมาคำนวณหาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องการใช้ต่อวัน และศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้ยางพารา ซึ่งดูดซับสารเบนซีน และโทลูอินที่เกิดจากสีทาภายในชนิดน้ำที่ความเข้มข้น 1.57 และ 7.10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (ศศิกร, 2554) ปริมาตร 20 ลิตรต่อวัน โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอินที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อยไม้ยางพารา น้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงผลการคำนวณ ดังนี้

การคำนวณการดูดซับเบนซีน

$$\begin{aligned}\text{แทนค่า} \quad C_e &= 0.1 \text{ mg/m}^3 \\ x/m = q_e &= 12.25C_e^{0.27} \\ &= (12.25)(0.1^{0.27}) \\ &= 6.58 \text{ mg/g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{หาค่า} \quad x &= (1.57 - 0.1 \text{ mg/m}^3)(0.02 \text{ m}^3) \\ &= 0.03 \text{ mg}\end{aligned}$$

ต้องใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเบนซีน

$$\begin{aligned}&= (0.03 \text{ mg}) / (6.58 \text{ mg/g}) \\ &= 4.56 \times 10^{-3} \text{ g}\end{aligned}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 93.63 เปอร์เซ็นต์

การคำนวณการดูดซับโทลูอิน

$$\begin{aligned}\text{แทนค่า} \quad C_e &= 0.1 \text{ mg/m}^3 \\ x/m = q_e &= 3.59C_e^{0.64} \\ &= (3.59)(0.1^{0.64}) \\ &= 0.82 \text{ mg/g}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หาค่า } x &= (7.10 - 0.1 \text{ mg/m}^3)(0.02 \text{ m}^3) \\ &= 0.14 \text{ mg/day} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโทลูอีน} \\ &= (0.14 \text{ mg})/(0.82 \text{ mg/g}) \\ &= 0.11 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 98.59 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนที่เกิดจากสีทาบ้านในปริมาตร 20 ลิตร พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 93.62 และ 98.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3. ประสิทธิภาพการดูดซับของเบนซีน และโทลูอีนภายในอาคารของคอนโดมิเนียมที่เกิดจากสีทาบ้าน

การดูดซับของเบนซีน และโทลูอีนภายในอาคารของคอนโดมิเนียมที่เกิดจากสีทาบ้าน โดยใช้ความเข้มข้นของเบนซีน และโทลูอีนจากผลการศึกษาของ Liang *et al.*, (2014) ซึ่งศึกษาการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการก่อสร้างของอพาร์ทเมนต์พบว่า ขั้นตอนการทาสีภายในอาคาร ที่มีพื้นที่ 170 ตารางเมตร ปล่อยเบนซีนและโทลูอีนเท่ากับ 68.8 และ 136 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับขนาดของคอนโดมิเนียมโดยทั่วไปที่มีความสูง 2.5 เมตร และมีพื้นที่ประมาณ 75 ตารางเมตร พบว่ามีความเข้มข้นของเบนซีนและโทลูอีนเท่ากับ 30.35 และ 60.00 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยให้อากาศที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากซีลี้อยู่ใน ยางพาราเหลือความเข้มข้นของเบนซีนและโทลูอีนผ่านมาตรฐาน (กำหนดค่า VOC ในบรรยากาศ โดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง เบนซีนต้องไม่เกิน 7.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าโทลูอีนใน สถานประกอบการโดยความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานปกติไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนภายในอาคารของคอนโดมิเนียมที่เกิดจากสีทาบ้านพบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดซับเบนซีน และโทลูอีนเท่ากับ 99.97 และ 99.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Development of Activated Carbons from Rubber Wood Using Microwave Induced Phosphoric Acid Activation

Panatda Klingklay¹, Kittipong Kunchariyakun², Weerawut Chaiwat³, Suthatip Sinyoung^{1*}

¹ Graduate student ; ^{1*} Assistant professor, Environmental Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

² School of Engineering and Resources, Walailuk University, Nakhornsithammarat, Thailand

³ Division of Engineering, Mahidol University Kanchanaburi Campus, Kanchanaburi, Thailand
Phone : 080-0658953, E-mail : p.natda1357@gmail.com

ABSTRACT

This research was to synthesize activated carbon from rubber wood using microwave induced phosphoric acid (H_3PO_4) activation. To determine the optimum carbonized temperature, varying 400, 600 and 800 °C for 1 hour in N_2 atmosphere, the TGA technique was applied. Results indicated that the carbonized temperature of 600 °C exhibited the highest fixed carbon of 76.43%, which was applied to utilize in the activation process. In the activation process, the carbonized samples were activated using 40% phosphoric acid with microwave at 600, 800 and 1000 watts for 90 seconds. The obtained activated carbons were characterized by BET, Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) and Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) techniques. Results found that the increase in microwave power has directly effect on surface area, total pore volume and average pore size. The surface areas exhibited as 406.18, 725.94 and 981.25 m^2/g , for 600 800 and 1000 watts, respectively. Therefore, this finding will be a fundamental knowledge for development of rubber wood as industrial activation carbon using microwave induced phosphoric acid (H_3PO_4) in the future.

Keywords : Activated carbon, Activation, Phosphoric acid, Microwave

INTRODUCTION

Activated carbon (AC) is a carbon-rich material with a large surface area and pore volume. The main its ability is that able to absorb various substances and allow to store their molecules in the internal surface. The applications of AC are used as an adsorbent for colors, odors, various contaminants and organic compounds in both liquid and gas forms [1]. The performance of AC is typically dependent on its surface areas and total pore volumes, which are vary on raw materials and methods to synthesize. There are basically two processes to produce activated carbons: chemical activation process and physical activation process [2], including both processes together. Regarding activated by chemical process, KOH, H_3PO_4 [3] and $ZnCl_2$ [4], have been mostly the chemical reagents for this purpose, due to help bite and remove dirt from the pores of activated carbon. Among these chemical reagents, H_3PO_4 pronounced as an excellent activated precursor, which is able to give greater porosity, and H_3PO_4 can be reused. and use low energy [5].

Recently, new approach for activation process was generated from microwave power, which could reduce time and energy requirement, compared to the conventional process [6], and the traditional thermal heating method [7]. The microwave method led to the development of relatively higher surface areas than impregnation via conventional heating [6].

Agricultural by-products, such as rice husk [8], bamboo [9] and rubber wood [10], are widely utilized as activated carbon, due to easily to find and their value added. In Southern of Thailand, rubber wood is one fifth economic plant. After cutting and sawing processes, the sawdust is a by-products from these processes, which is utilized as fuel or dumped in landfill. Therefore, this research aims to develop rubber wood sawdust as activated carbon (AC) for its value added. The chemical reagent, phosphoric acid (H_3PO_4), coupled with the microwave energy were also applied to activated source in this study.

METHODOLOGY

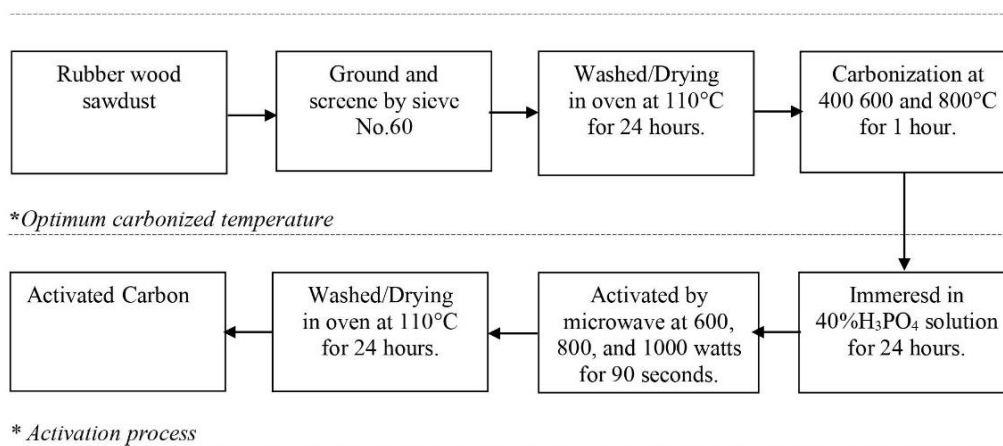


Fig. 1. Flow diagram for conversion of activated carbons from rubber wood

Conversion of activated carbons from rubber wood is shown as flow diagram in Figure 1.

1. Preparation of rubber wood sawdust

The preparation of activated carbon from rubber wood sawdust involved three stages. First, the rubber wood sawdust was ground and screened through sieve No.60. Then, powdered samples were washed with distilled water to remove undesirable contaminations, such as soil and clay, and dried in electric oven at 110 °C for 24 hours.

2. Carbonization of rubber wood sawdust

The powdered samples were carbonized under N₂ gas to achieve the desired temperature at 400 600 and 800 °C for 1 hour, with the heating rate of 10 °C/min. The amounts of volatile, ash and fixed carbon in their carbonized samples were then determined using thermogravimetric analysis (TGA) Model TGA8000. Charcoal with high fixed carbon will be used for further activation.

3. Microwave of activation

Activation process, the optimum carbonized sample was immersed in 40% H₃PO₄ solution for 24 hours. After that, it was activated by microwave radiation at 600, 800, and 1000 watts for 90 seconds. The activated samples were washed with DI water until a constant pH obtained, and then dried at 110 °C for 24 hours. The properties of AC were examined by measuring their porosities and pore size distributions by Surface Area and Porosity Analyzer Model ASAP2460 using the Brunner–Emmet–Teller (BET) technique. The functional structure of activated carbons were determined by Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) Model Bruker/Tensor27 method. While, the morphology of samples were examined using Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) Model Apreo.

RESULTS AND DISCUSSIONS

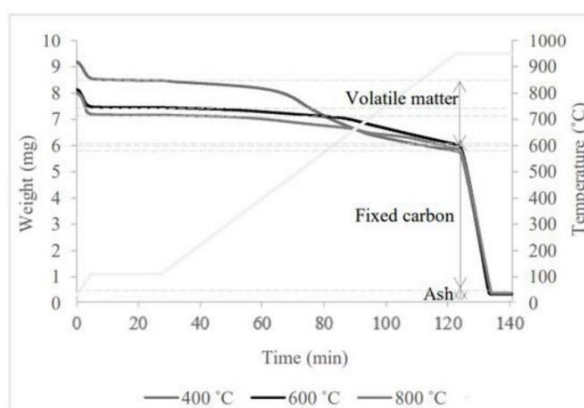
Carbonization process

To determine the optimum carbonized temperature, thermogravimetric analysis (TGA) was applied in terms of ash, volatile and fixed carbon, as given in Table 1. Results exhibited that the percentage of volatiles decreased with increasing temperature, whereas increased in ash. This was due to the increasing temperature give more the energy to break the bonds within the structure of the raw material. While, the fixed carbon of sample at 600 °C revealed the highest value. Although, the fixed carbon at 800 °C has value nearly at 600 °C, but it used relative high energy. Thus, this indicated that the optimum carbonized condition in this research is 600 °C for 1 hour, and then was used in the activation process (Figure 2) in the next step.

-279-

Table 1. Proximate analysis (%wt. dry basis)

Temperature (°C)	%		
	Ash	Volatile	Fixed Carbon
400	4.32	31.65	64.03
600	4.67	18.91	76.43
800	6.96	17.98	75.07

**Fig. 2. Analysis results of activated carbon at temperature at 400, 600 and 800 °C using Thermogravimetric Analysis (TGA) technique.***Activation process*

After carbonized at 600 °C, the samples were activated using 40% H₃PO₄ solution with microwave radiation at 600, 800, and 1000 watts for 90 sec. Results found that the activated carbon without activation the surface area, total pore volume and average pore size are 1.41 m²/g, 0.01 cm³/g and 35.69 nm, respectively, as given in Table 2. The activation was able to improve the surface area and total pore volume, especially microwave with H₃PO₄. The increase in microwave powers had positively effect on surface area and total pore volume. This is because microwave energy can directly eliminate the undesirable matters that attached internal and external surface of AC [11]. In this research, the activation by microwave at 1000 watts with H₃PO₄ represented the highest surface area and total pore volume as 981.25 m²/g, 0.37 cm³/g, respectively.

Table 2. Summary of BET surface area, total pore volume, pore volume of prepared activated carbon at the differents condition.

Samples	Surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Pore size (nm)
600 °C	1.41	0.01	35.69
600 °C+40%H ₃ PO ₄	212.16	0.12	12.41
600°C+40%H ₃ PO ₄ +600 watt	406.18	0.19	3.14
600°C+40%H ₃ PO ₄ +800 watt	725.94	0.28	2.82
600 °C+40%H ₃ PO ₄ +1000 watt	981.25	0.37	2.32

280-

Regarding FTIR results (Fig. 3 and Table 3), the carbonized sample at 600°C shows that broad band at 3650-3200 cm^{-1} , which is assigned to O-H stretching of hydroxyl groups from carboxyls, phenols or alcohols and adsorbed water. Subsequent, the wave number positions in the range 1780-1520, 1520-1300, and 1200-1130 cm^{-1} were caused by bondings C=O, C=C and C-O, respectively. The activation by microwave with H_3PO_4 resulted to the intensity loss at 1520-1300 cm^{-1} . This indicated that the microwave energy not only eliminates undesirable matters, but also destroys carbon structures in the samples.

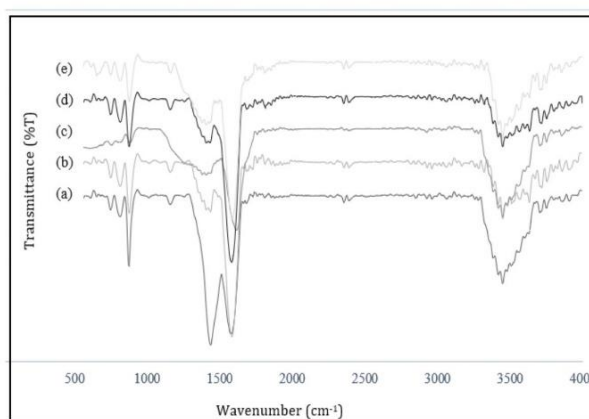


Fig. 3. FT-IR spectra of activated carbon (a) without activation, (b) activation with 40% H_3PO_4 , (c) activation with 40% H_3PO_4 and microwave at 600 watts, (d) activation with 40% H_3PO_4 and microwave at 800 watts and (e) activation with 40% H_3PO_4 and microwave at 1000 watts

Table 3. Summary of waveform numbers that occur among function groups And the bond of position, wave number range of activated carbon from rubber wood which is carbonized at temperatures of 400, 600 and 800 °C.

Wave number range (cm^{-1})	Functional group	Wave number positions (carbonization)		
		400 °C	600 °C	800 °C
3650 - 3000	O-H	3452 ***	3452 **	3452 *
2950 - 2970	C-H	2922 **	-	2922 *
1780 - 1520	C=O	1593 **	1585 ***	1630 *
1520 - 1300	C=C	1440 **	1440 ***	1440 *
1350 - 1330	C-H	1317 ***	-	-
1200 - 1130	C-O	-	1166 ***	-

*** high ** medium * low

Fig. 4 shows the morphology of sample with/without activation, which were carried out by FE-SEM technique. Results shows that the sample without activation and activation with 40% H_3PO_4 have a relatively smooth surface appear quite porous with pore size approximately 1.5 to 4 μm , as illustrated in Fig. 4a and 4b. The activation by microwaves with H_3PO_4 lead to become more rough surface with distribution of macropore and mesopore, as given in Fig. 4c-e. In addition, it also found that the pore size seem to reduce from 2 to 4 μm to 0.5 to 2 μm , when microwave energy increased from 800 watts to 1000 watts. This finding agreed with BET results.

-281-

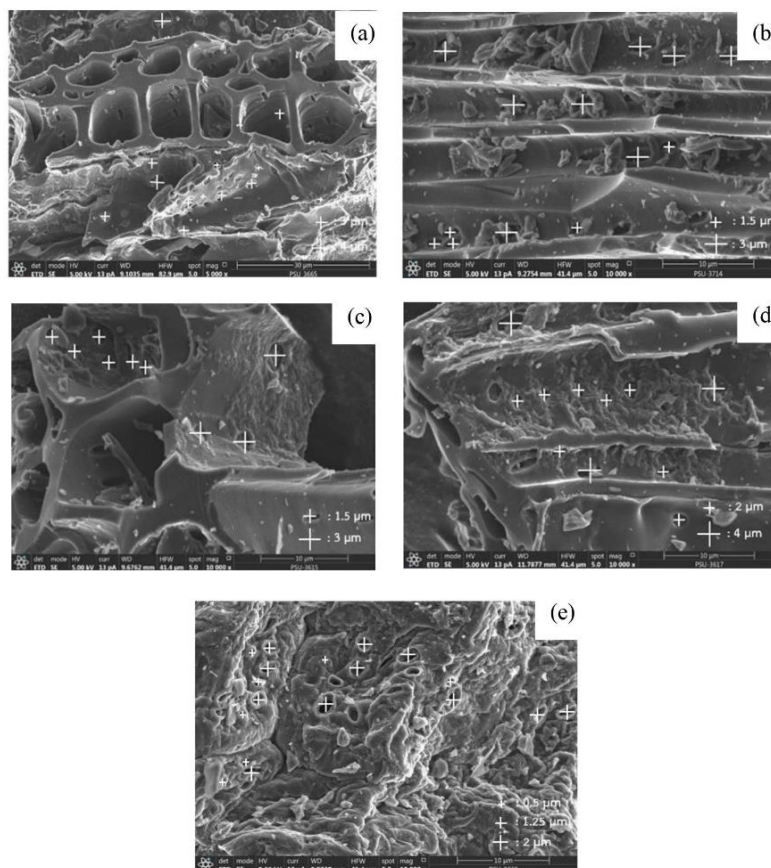


Fig. 4. FE-SEM images of activated carbon (a) without activation, (b) activation with 40% H_3PO_4 , (c) activation with 40% H_3PO_4 and microwave at 600 watts, (d) activation with 40% H_3PO_4 and microwave at 800 watts and (e) activation with 40% H_3PO_4 and microwave at 1000 watts

CONCLUSION

The conclusion could be drawn as follows.

- The optimum carbonized temperature for sawdust rubber wood was 600 °C for 1 hour.
- The activation with phosphoric acid and microwave energy could be attributed to surface area and total pore volume improvement.
- The increase in microwave energy had directly effect on surface area, total pore volume and average pore size.

REFERENCE

- [1] Liou, T. H., & Wu, S. J. (2009). Characteristics of microporous/mesoporous carbons prepared from rice husk under base-and acid-treated conditions. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 693-703.
- [2] Bansode, R.R., Losso, J.N., Marshall, W.E., Rao, R.M. and Portier, R.J. (2004). Pecan shell-based granular activated carbon for treatment of chemical oxygen demand (COD) in municipal wastewater. *Bioresource Technology*, 94, 129-135
- [3] Wu, Y., Jin, X. J., & Zhang, J. (2013). Characteristics of nitrogen-enriched activated carbon prepared from waste medium density fiberboard by potassium hydroxide. *Journal of wood science*, 59(2), 133-140.

282-

- [4] Wang, T., Tan, S., & Liang, C. (2009). Preparation and characterization of activated carbon from wood via microwave-induced $ZnCl_2$ activation. *Carbon*, 47(7), 1880-1883.
- [5] Yakout, S. M., and Sharaf, G. (2012). Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones. *Arabian Journal of Chemistry* 9(2): S1155–S1162.
- [6] Alslaiibi, T. M., Abustan, I., Ahmad, M. A., & Foul, A. A. (2013). A review: production of activated carbon from agricultural byproducts via conventional and microwave heating. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(7), 1183-1190.
- [7] Hesas, R. H., Daud, W. M. A. W., Sahu, J. N., & Arami-Niya, A. (2013). The effects of a microwave heating method on the production of activated carbon from agricultural waste: A review. *Journal of Analytical and Applied pyrolysis*, 100, 1-11.
- [8] Zakari, Z., Buniran, S., & Ishak, M. I. (2010, December). Nanopores activated carbon rice husk. In *2010 International Conference on Enabling Science and Nanotechnology (ESciNano)* (pp. 1-2). IEEE.
- [9] Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., & Guo, L. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 233-238.
- [10] Mazlan, M.A.F., Uemura, Y., Yusup, S., Elhassan, F., Uddin, A., Hiwada, A., and Demiya, M. (2016). Activated carbon from rubber wood sawdust by carbon dioxide activation. *Procedia engineering*, 148, 530-537.
- [11] Yuen, F. K., & Hameed, B. H. (2009). Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves. *Advances in colloid and interface science*, 149(1-2), 19-27.