

บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ

บทนำ

จากการศึกษาองค์ประกอบในน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 4-5 ส่วนค่าซีโอดี (COD: Chemical Oxygen Demand) มีค่าประมาณ 48.4 กรัมต่อลิตร ค่าบีโอดี (BOD: Biochemical Oxygen Demand) มีค่าประมาณ 25 กรัมต่อลิตร ค่าน้ำมันและไขมันมีค่าประมาณ 45.6 กรัมต่อลิตร ค่าของแข็งทั้งหมดมีค่าประมาณ 60.3 กรัมต่อลิตร และค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าประมาณ 40.8 กรัมต่อลิตร (Sumathi, et al., 2008; เสถียรพงษ์และพูนสุข, 2552) ซึ่งเมื่อผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน พบว่า สามารถลดปริมาณสารแขวนลอย น้ำมันและไขมัน ค่าซีโอดี และค่าบีโอดี ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2540) แต่อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งสุดท้ายของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มยังไม่สามารถปล่อยทิ้งออกสู่น้ำลำคลองใกล้เคียงหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ เนื่องจากน้ำทิ้งที่กล่าวถึงยังคงมีสีที่มีลักษณะเป็นที่พึงรังเกียจ กล่าวคือ น้ำทิ้งจะมีสีน้ำตาลเข้ม-ดำ อันเนื่องมาจากรงควัตถุและสารประกอบจำพวกลิกนิน แทนนิน และพอลิฟีนอล เป็นต้น (Barker and Worgan, 1981) จึงอาจกล่าวได้ว่า ปัญหาการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดน้ำเสียแล้วกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมันนั้นส่วนหนึ่งมาจากการมีสีน้ำตาลเข้ม-ดำของน้ำที่เกิดจากลิกนิน ทำให้ประชาชนที่อยู่ในละแวกใกล้เคียงกับแหล่งน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมักร้องเรียนว่าทางโรงงานปล่อยน้ำทิ้งที่ยังไม่ผ่านการบำบัดลงสู่แหล่งน้ำชุมชน ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่าองค์ประกอบหลักของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยใช้เทคนิคทางห้องปฏิบัติการ พบว่า ในน้ำทิ้งมีลิกนินปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดังกล่าว ซึ่งมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำทิ้ง พบว่า วิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้รับความนิยมนำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างกว้างขวางมาก (ธราพงษ์, 2554) โดยจะใช้ถ่านกัมมันต์กำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายหลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งด้วยการให้น้ำทิ้งไหลผ่านถ่านกัมมันต์ สารอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่ในน้ำทิ้งจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำไปยังผิวหน้าระหว่างของเหลว (น้ำทิ้ง) กับของแข็ง (ถ่านกัมมันต์) จากนั้นสารอินทรีย์จะเกิดการแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์และเกิดกระบวนการดูดซับบนผิวหน้าในรูพรุนของถ่านกัมมันต์นั่นเอง ส่วนน้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์ออกไปจะมีความสะอาดมากขึ้น สังเกตได้จากสีและกลิ่นที่ดีขึ้น ในปัจจุบันถ่านกัมมันต์ที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล เนื่องจากวัตถุดิบมีราคาถูกทำให้ต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ต่ำ ทั้งนี้ ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่เป็นตัวดูดซับอีกชนิดหนึ่งที่มีการนิยมใช้มาก โดยที่ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่จะประกอบด้วยคุณสมบัติที่ (1) มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีปริมาณสูง (2) มีปริมาณสารระเหยได้ต่ำ (3) มีคุณสมบัติคงที่ (4) สามารถหาได้ง่ายและราคาถูก โดยเฉพาะ ไม้ไผ่ตงลิ้มแล้งซึ่งเป็นพืชพลังงานทดแทนที่เติบโตเร็ว มีการส่งเสริมให้ปลูกมากในพื้นที่จังหวัดพัทลุง มีคุณสมบัติพิเศษด้านเนื้อไม้หรือลำไผ่เป็นไม้ไผ่เนื้อแข็ง หากใช้งานเป็นถ่านกัมมันต์จะมีความทนทาน ไม่แตกหักง่าย และมีความเป็นรูพรุนสูง ดังนั้น จึงคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์อันดียิ่งหากมีการศึกษาวิธีการที่สามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตงลิ้มแล้ง ซึ่งจะถือได้ว่าเป็นการใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีอยู่พัฒนาทรัพยากรท้องถิ่นได้อย่างคุ้มค่าสูงสุด นอกจากนี้ สามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ปนเปื้อนลิกนินมาใช้ได้ใหม่โดยการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยผ่านอากาศร้อนแห้งที่แรงดันหนึ่งๆเข้าไปในชั้นถ่านกัมมันต์ที่อยู่กับที่ โดยที่ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูจะมีประสิทธิภาพการนำไปใช้งานที่ดีอยู่และสามารถใช้งานได้อีกหลายครั้ง ส่วนลิกนินที่หลุดออกมาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น นำไปทำเป็นปุ๋ยทางการเกษตร หรือสามารถนำ

ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับลิกนินมาทำปฏิกิริยากับเอนไซม์จากเห็ดราเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารประกอบนั้นจนหมดไปในที่สุด (ชูรภา, 2008)

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์ไม่เผด็จลิมแล้ง
2. เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ไม่เผด็จลิมแล้ง
3. เพื่อออกแบบชุดเครื่องมือสำหรับกระบวนการดูดซับลิกนินในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เผด็จลิมแล้ง
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับลิกนินในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เผด็จลิมแล้ง

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาสถานะและปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์ไม่เผด็จลิมแล้ง โดยพิจารณาองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาถ่าน กำหนดในช่วงอุณหภูมิ 400-600°C โดยนำถ่านที่ผ่านการเผาในช่วงอุณหภูมิดังกำหนดมาทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีนเพื่อหาอุณหภูมิสำหรับการเผาถ่านที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุด

1.2 สารกระตุ้นที่เหมาะสมสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ เปรียบเทียบจากการใช้กรดฟอสฟอริกและสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์กระตุ้นถ่านที่เตรียมได้จากข้อ 1.1 จากนั้น นำถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มาทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีนเพื่อหาชนิดของสารกระตุ้นก่อกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน

1.3 ระยะเวลาในการกระตุ้นทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ กำหนดในช่วง 0-3 ชั่วโมง โดยใช้สารกระตุ้นที่ได้จากข้อ 1.2 เพื่อก่อกัมมันต์ จากนั้น นำถ่านที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีตามระยะเวลาที่กำหนดมาทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีนเพื่อหาระยะเวลาการก่อกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุด

2. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในสถานะที่เหมาะสม โดยพิจารณาจาก

2.1 ค่าการดูดซับไอโอดีน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4607-94

2.2 ปริมาณความชื้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3173-95

2.3 ปริมาณเถ้า ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3174-95

2.4 ปริมาณสารระเหยได้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3175-95

2.5 ปริมาณคาร์บอนคงตัว คำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณเถ้ากับปริมาณสารระเหยได้

2.6 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องมือ FTIR

2.7 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องมือ SEM

3. ออกแบบชุดเครื่องมือสำหรับกระบวนการดูดซับลิกนินในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เผด็จลิมแล้ง โดยกำหนดรูปแบบชุดดูดซับให้มีรูปทรงกระบอกที่มีระบบการไหลผ่านของน้ำทิ้งตามหลักการของแรงโน้มถ่วงของโลก คือมีการไหลของน้ำเป็นแบบไหลลง ผ่านระบบชั้นผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งสารละลายที่ผ่านการดูดซับแล้วจะถูกเก็บไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับต่อไป

4. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับลิแกนด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยพิจารณาองค์ประกอบดังต่อไปนี้
 - 4.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับลิแกนด์
 - 4.2 สภาพความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับลิแกนด์
 - 4.3 ระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับลิแกนด์
 - 4.4 ไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับลิแกนด์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีการเผยแพร่ผลงานวิชาการในงานประชุมวิชาการระดับชาติ และตีพิมพ์บทความในวารสารระดับชาติ
2. ชุมชนสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์และต่อยอดได้
3. สามารถพัฒนาผลงานวิจัยสู่อุตสาหกรรมเกษตรและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการและทฤษฎี

1. **น้ำทิ้ง** คือ น้ำที่ใช้แล้วและถูกปล่อยทิ้งลงในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจได้รับการบำบัดหรืออาจจะต้องอาศัยกรรมวิธีการบำบัดหากน้ำทิ้งนั้นมีคุณภาพตามมาตรฐานน้ำทิ้ง ปัจจุบันหลายหน่วยงานได้ประกาศใช้มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ซึ่งออกตามความในพระราชบัญญัติสำคัญได้แก่ (1) พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 (2) พระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 (3) พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 และ พ.ศ. 2535 และ (4) พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535 ซึ่ง หากพิจารณาถึงน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องปฏิบัติตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ซึ่งออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน โดยต้องมีคุณสมบัติดังนี้ (เกรียงศักดิ์, 2547)

1. ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่เกิน 5.5-9.0
2. ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solids: TDS) ต้องมีค่าดังนี้
 - 2.1 กำหนดค่า TDS ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรหรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทโรงงานอุตสาหกรรมแต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 2.2 หากน้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะกำหนดค่า TDS ที่มีค่ามากกว่าค่า TDS ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปริมาณสารแขวนลอย (Suspended Solids) ต้องไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. กำหนดโลหะหนักมีค่าดังนี้
 - 4.1 ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.2 เซเลเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.5 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.6 โครเมียม (Chromium) แบ่งออกเป็น
 - 4.6.1 Hexavalent Chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.6.2 Trivalent Chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.7 บาเรียม (Barium) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.8 นิกเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.9 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.10 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

5. ซัลไฟด์ (Sulphide) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. ไซยาไนด์ (Cyanide) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. สารประกอบฟีนอล (Phenols Compounds) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
9. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
10. เพสตีไซด์ (Pesticide) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
11. อุณหภูมิต้องไม่เกิน 40°C
12. สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
13. กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
14. น้ำมันและไขมัน (Oils & Greases) ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร
15. ค่าบีโอดี (Biological Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 oC เวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
16. ค่า ทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทโรงงานอุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
17. ค่าซีโอดี (COD หรือ Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงสีของน้ำทิ้งตามธรรมชาติหรือจากการกิจกรรมของมนุษย์ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ที่มี ลิกนินเป็นองค์ประกอบเป็นหลัก โดยในปัจจุบันยังไม่สามารถแยกลิกนินบริสุทธิ์ออกมาได้ การศึกษาโครงสร้างของลิกนินจึงยังไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาสูตรเคมีของลิกนินซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่ามีสูตรเคมีเป็น $C_9H_{8.83}O_{2.37} (OCH_3)_{0.96}$ โดยมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 3,000–30,000 ทั้งนี้พบว่า ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น (1) ใช้เป็นสารยึดติด (2) ใช้เป็นเคมีภัณฑ์เกษตร ได้แก่ ปุ๋ย หรือใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (3) ใช้ผสมในซีเมนต์เพื่อช่วยให้การแข็งตัวของซีเมนต์ดีขึ้น หรือเพิ่มความแข็งแรงคงทน (4) ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ

2. ไม้ไผ่ตงลิ่มแล้ง มีลักษณะดังรูปที่ 1 เป็นไม้พันธุ์หนึ่งซึ่งนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซีย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Dendrocalamus Asper Backer* อยู่ในวงศ์ *Graminea* มีความสูงของลำต้นได้มากกว่า 20 เมตร ลักษณะของลำต้นจะเป็นข้อหรือปล้อง และแต่ละข้อจะมีความยาวประมาณ 30-50 เซนติเมตร โดยที่ลักษณะของข้อของไม้ไผ่ตงลิ่มแล้งจะเห็นได้ชัดเจน ลำไผ่มีสีเขียวเข้มเป็นมันไม่มีขน เนื้อไม้หนาและตันหรือเกือบตัน หรืออาจจะมีรูเล็กๆ ซึ่งไม่กลวงเหมือนลำไผ่ทั่วไป และที่สำคัญที่สุด คือ เนื้อไม้หรือลำไผ่ของไม้ไผ่ตงลิ่มแล้งเป็นไม้ที่มอดไม่กิน สามารถนำไปสร้างบ้านไม้ไผ่ หรือทำเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งจะให้ความทนทานได้นานกว่าไม้

ไผ่ชนิดอื่นๆ ส่วนยอดอ่อนหรือหน่ออ่อนมีเปลือกหุ้มสีเขียว ไม่มีขน เนื้อในรสชาติหวานกรอบอร่อยมาก ขนาดของหน่อโตเต็มที่น้ำหนักเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 5-7 กิโลกรัมต่อหัว มีหน่อตลอดปี อีกทั้ง ไผ่ตงสีมแล้งมีลักษณะทนต่อทุกสภาพอากาศ ทนแล้งได้ดี สามารถให้หน่อที่สมบูรณ์และมีเปลือกห่อสวยเหมือนกับปลูกในฤดูฝน สามารถปลูกได้ในพื้นที่น้ำท่วมขังซ้ำซ้อนและปลูกได้ในดินทั่วไป มีหน่อให้เก็บรับประทานหรือเก็บขายตลอดปี จึงเหมาะที่จะปลูกเป็นพืชครัวและพืชเศรษฐกิจเป็นอย่างยิ่ง (Laemsak and Kungsuan, 2000) ซึ่งปัจจุบันมีการส่งเสริมการปลูกไผ่ตงสีมแล้งมากในพื้นที่จังหวัดพัทลุง จึงเป็นที่น่าสนใจว่า หากมีการนำไผ่ตงสีมแล้ง ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทน ทั้งผลิตเป็นพลังงานเชื้อเพลิง ก๊าซชีววมวล น้ำมันชีววมวล หรือผลิตเป็นถ่านไผ่ ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูง เพื่อใช้เป็นวัสดุฟอกอากาศ หรือดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงใช้ผลพลอยได้จากการเผาไม้ไผ่ไปเป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เหล่านี้ จะสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่ทรัพยากรท้องถิ่นได้อีกทางหนึ่ง (ธัญพิสิษฐ์, 2552)



รูปที่ 1 ไผ่ตงสีมแล้ง

3. ถ่านกัมมันต์ (ธราพงษ์, 2554)

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวภายในสูง จึงสามารถใช้งานในการดูดซับมลสารสถานะก๊าซและของเหลวได้ดีในปริมาณสูง ทั้งนี้ สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ได้ ในหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการแยกสารให้บริสุทธิ์ การดูดซึม การดูดซับ หรือใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ สามารถนำถ่านกัมมันต์ที่ปนเปื้อนมาใช้ได้ใหม่โดยการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ กล่าวคือ การฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ทำได้โดยผ่านอากาศร้อนแห้ง หรือใช้สารละลายชะสารที่ถูกดูดซับหรือทำปฏิกิริยากับสารที่ถูกดูดซับออกมาจนหมด โดยที่ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูจะมีประสิทธิภาพการนำไปใช้งานที่ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์บริสุทธิ์ ทั้งนี้ คุณสมบัติสำคัญของวัสดุดิบที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ คือ (1) มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีปริมาณสูง (2) มีปริมาณสารระเหยได้ต่ำ (3) สามารถหาได้ง่ายและราคาถูก (4) มีคุณสมบัติคงที่ ซึ่งวัสดุดิบที่นิยมใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ ได้แก่ วัสดุชีววมวล ยางล้อรถที่ใช้แล้ว และถ่านหิน เป็นต้น

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ มีหลายวิธีการขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไป กระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันและ กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ โดยที่ กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เป็นการให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นและ สารระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำเรียกว่าถ่านชาร์ (char) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีร้อยละของคาร์บอนสูงขึ้นกว่าเดิม นอกจากนี้ยังมีก๊าซและน้ำมันดิน (tar) เกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้ สามารถสรุป ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการสูญเสียน้ำออกจากวัตถุดิบในช่วงอุณหภูมิ 27-197°C
2. ขั้นตอนการเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสซึ่งจะทำให้เกิดก๊าซและน้ำมันดิน (tar) ในช่วง อุณหภูมิ 197-497°C
3. ขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นถ่านชาร์ (char) ในช่วงอุณหภูมิ 497-847°C

การเตรียมกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สามารถทำได้โดย การปรับสภาวะให้เหมาะสม โดยการควบคุมตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ (1) อุณหภูมิและเวลา (2) อัตราการให้ความร้อน (3) ตัวกลางของปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน (4) ธรรมชาติของวัตถุดิบ

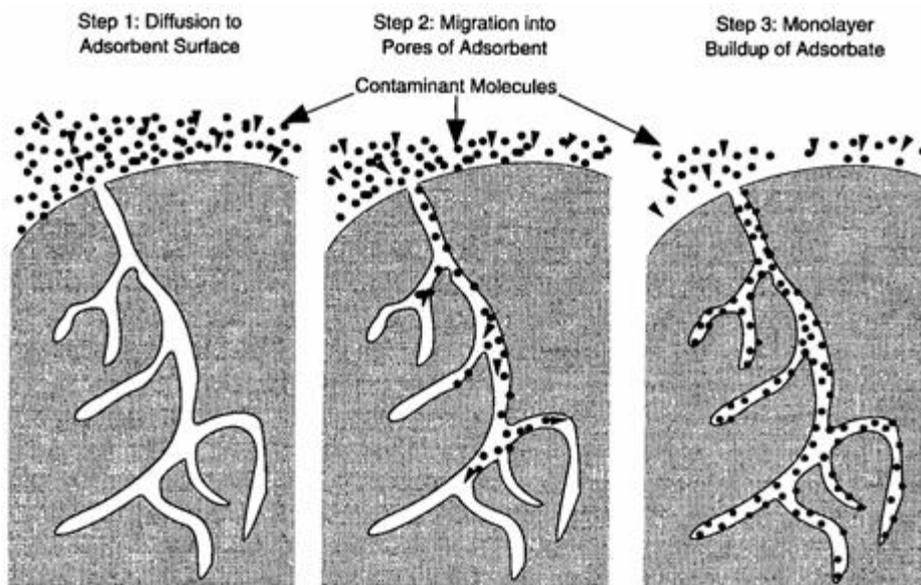
การก่อกัมมันต์ เป็นการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างคาร์บอนในถ่าน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้เกิดรูพรุนในถ่านมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ ก่อกัมมันต์หรือการกระตุ้นมีหลายวิธี โดยที่ประสิทธิภาพของการกระตุ้นจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะและชนิดของวัตถุดิบ รวมถึงวิธีการเตรียมถ่านก่อนการกระตุ้นด้วย โดยทั่วไป วิธีการกระตุ้นที่นิยม มี 2 วิธี ได้แก่ (1) การกระตุ้นทางเคมี คือเป็นการนำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันมาแล้วหรือวัตถุดิบที่ยังไม่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันมากระตุ้นด้วยสารเคมี เช่น กรดฟอสฟอริกหรือสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ก่อให้เกิดรูพรุนที่อุณหภูมิที่กำหนดและ (2) การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการนำวัตถุดิบที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันแล้วมาทำปฏิกิริยากับก๊าซสำหรับการออกซิไดซ์ เช่น ไออน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซออกซิเจน เป็นต้น แต่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมาก ประมาณ 1200°C

4. การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของสารหนึ่งๆ ที่บริเวณ พื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (interface) ของวัตถุดิบดูดซับ ดังรูปที่ 2 ซึ่งกระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณ ผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลว กับของแข็ง โดยที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนวัตถุที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ทั้งนี้กลไกของกระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการกักกันโมเลกุลขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในของเหลวให้อยู่บนผิวของวัตถุอีกชนิดหนึ่ง โดยที่การดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวหน้าโมเลกุลของสารตัวดูดซับซึ่ง เกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โดยที่ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะติดอยู่ที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ และมีเพียงส่วนน้อยที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอกของตัวดูดซับ การบวนการดูดซับนี้เกิดขึ้นจนถึงสมดุล ซึ่งสามารถแบ่ง ออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ออกเป็น 4 ประเภท คือ

(1) การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงแกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) เข้าไว้ด้วยกัน การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับ ประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับ ของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย นอกจากนี้ สารที่ถูกดูด

ซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลจะมีสารถูกดูดซับติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้าได้ ซึ่งมีจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกดูดซับ

(2) การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น



รูปที่ 2 การดูดซับ

ที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/design_absorbtion.htm (Accessed: Jan 24, 2013)

(3) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิวเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุ และแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม

(4) การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไปพฤติกรรมดูดซับชนิดนี้จะมีพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายและการดูดซับทางเคมีในการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบการดูดติดผิวทางกายภาพ การดูดติดผิวทางเคมี การดูดติดผิวแบบแลกเปลี่ยนประจุ และการดูดติดผิวแบบเจาะจง ขึ้นอยู่กับสารที่จะมาเป็นตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

5. ไอโซเทอมการดูดซับ (Donohue and Aranovich, 1998)

โดยทั่วไปการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อุณหภูมิ ชนิดของสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ เป็นต้น ดังนั้น ในการดูดซับใดๆ ควรคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย โดยทั่วไป อุณหภูมิของการดูดซับจะถูกควบคุมให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ไอโซเทอม (isotherm)” ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับก๊าซตามระบบ IUPAC โดยไอโซเทอม 5 ชนิดแรก (Type I ถึง Type V) ได้ถูกจำแนกไว้ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน คือ Brunauer, S., Deming, L.S., Diming, W.S., and Teller, E. หรืออาจเรียกได้ว่า ไอโซเทอม 5 ชนิดแรกเป็นการจำแนกตามแบบของ BDDT ซึ่งไอโซเทอมทั้ง 6 ประเภทในรูปที่ 3 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ ส่วนที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

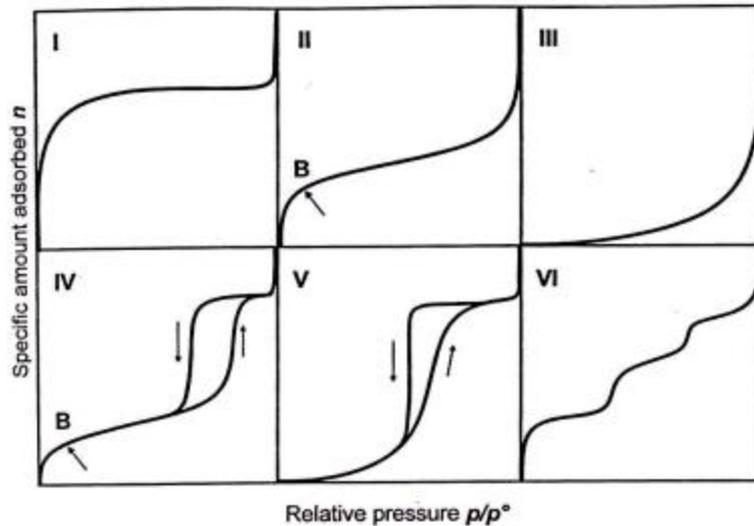
Type II เป็นไอโซเทอมรูปตัวเอส (s-shaped isotherm) มักจะเกิดกับตัวดูดซับที่มีความพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) ซึ่ง ณ ตำแหน่งจุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกปกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากขึ้นกว่าหนึ่งชั้น ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ไอโซเทอมประเภทนี้แสดงถึงการดูดซับที่เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทอมที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างคล้ายกระจกเงา ซึ่งไอโซเทอมประเภทนี้ไม่ค่อยจะพบเจอบ่อยนัก ทั้งนี้จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง หรือเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นกับตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นพวกที่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับอย่างอ่อนๆ ไม่แข็งแรง ทำให้ดูดซับได้น้อย หรือเป็นการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองทำให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงขึ้น

Type IV เป็นไอโซเทอมที่พบบ่อยในตัวดูดซับที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) โดยในช่วงแรกของการดูดซับ จะมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ เส้นไอโซเทอมจะเหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้น การดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแบบคาปิลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุน ซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วงการคายซับ (desorption) ซึ่งข้อมูลของการเกิดการควบแน่นแบบคาปิลารีนี้สามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ โดยการควบแน่นแบบคาปิลารีจะทำให้ช่วงการคายซับมีปริมาณการดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

Type V เหมือนไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันที่ไอโซเทอมประเภทนี้จะเกิดกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง แต่จะเกิดการควบแน่นในรูพรุน คือมี hysteresis loop เหมือนกัน อีกทั้ง ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI เป็นไอโซเทอมแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอมแบบนี้จะพบไม่บ่อยนัก โดยส่วนใหญ่จะพบเจอในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่มีรูปแบบเดียวกันหรือคล้ายกัน (uniform) ทั้งนี้ รูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิในการดูดซับ



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับ

6. การทำนายไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Song, et al., 2013)

เป็นไอโซเทอมที่เสนอโดย เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมุติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่ง (adsorption site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ซึ่งสมการของ Langmuir จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างการควบแน่นและการระเหยของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ทั้งนี้ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ เป็นไอโซเทอมที่ง่ายที่สุด ที่ใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางกายภาพ โดยมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

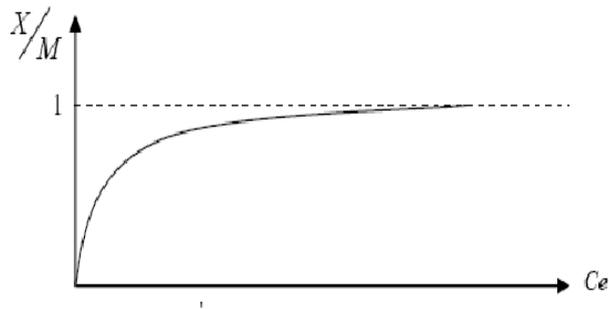
- โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่ที่จำกัดบนผิวตัวดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับเหมาะกับโมเลกุลที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer)
- พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันหรือเท่ากันสำหรับทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

ดังนั้น เมื่อนำข้อมูลการดูดซับของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลมาทำนายความสัมพันธ์ตามสมการของแลงเมียร์ จะได้สมการที่ (1)

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

เมื่อ q_e = ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
 X = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ
 m = เป็นปริมาณของตัวดูดซับ
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
 q_m = ปริมาณของตัวถูกดูดซับสูงสุดสำหรับการดูดซับชั้นเดียว (mg/g carbon)
 b = ค่าคงที่ของการดูดซับ (affinity coefficient)

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{X}{M}$ และ C_e จะได้ดังรูปที่ 4



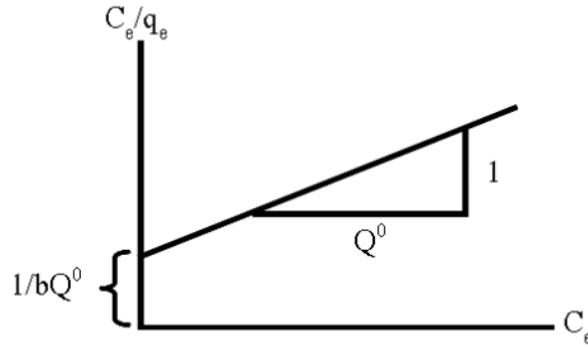
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{X}{M}$ และ C_e โดยอาศัยสมการของแลงเมียร์

หรือสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้อีกรูปแบบหนึ่ง โดยจัดรูปสมการที่ (1) ใหม่ ได้ดังสมการที่ (2)

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

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ และ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนเป็น $\frac{1}{b q_m}$ และมีความชัน

เท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e ตามสมการแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

7. การทำนายไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Song, et al., 2013)

เป็นไอโซเทอมที่เสนอโดย ฟินเลย์ ฟรุนดลิช (Findlay Freundlich) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (rough surface) โดยแต่ละพื้นที่ที่เกิดการดูดซับจะมีค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่ แต่จะมีการรวมพื้นที่ผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกัน ดังนั้น ข้อด้อยของสมการฟรุนดลิช คือ จะใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดีนัก

เมื่อนำข้อมูลการดูดซับของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลมาทำนายความสัมพันธ์ตามสมการของ ฟรุนดลิช จะได้ตั้งสมการที่ (3)

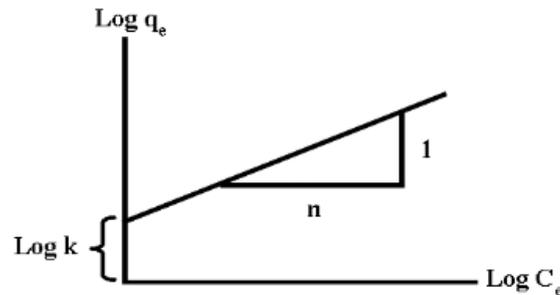
$$q_e = \frac{X}{m} = kC_e^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
 X = ปริมาณของตัวถูกดูดซับ
 m = ปริมาณของตัวดูดซับ
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)
 b = ค่าคงที่การดูดซับ (affinity coefficient)
 k = ค่าคงที่ของฟรุนดลิช

จากสมการที่ (3) เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังสมการที่ (4)

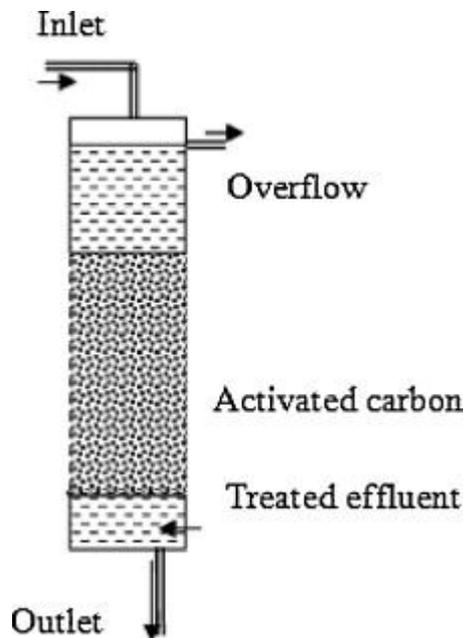
$$\log q_e = \log \frac{X}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log \frac{X}{m}$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนตั้ง (แกน y) ที่สามารถนำมาหาค่าค่าคงที่ของฟรุนดลิช (k) ได้ และมีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{n}$ ซึ่งสามารถหาค่า n ได้ จากความชันเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \frac{X}{m}$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของฟรุนดลิช

8. การออกแบบถังกรองสำหรับระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไป นิยมออกแบบระบบให้มีลักษณะเป็นระบบที่มีการไหลผ่านของน้ำที่ตามหลักการของแรงโน้มถ่วงของโลก เพื่อลดการใช้พลังงานที่มากเกินไป คือให้มีการไหลของน้ำเป็นแบบไหลลงผ่านระบบชั้นผงถ่านกัมมันต์ที่ถูกยึดติดอยู่กับที่ น้ำสะอาดที่ผ่านการดูดซับแล้วจะถูกเก็บไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับต่อไป (เกรียงศักดิ์, 2547) ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ถังกรองสำหรับระบบดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Foo and Hameed, 2009)

การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้องของ

Ramos และคณะ (1999) นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ปริมาณของลิกนิน โดยพิจารณาจากปริมาณของ หมู่เมทอซัลที่เหลือในสารละลายภายหลังจากการทำปฏิกิริยากับกรด iodidric ด้วยเครื่องมือ GC ซึ่งวิธีการนี้สามารถประมาณปริมาณของลิกนินที่ถูกแยกออกมาได้ ส่วนสมบัติด้านความร้อนของลิกนินจะทดสอบด้วยเครื่องมือ Thermogravimetric analyzer (TGA) ซึ่งเตรียมลิกนิน ประมาณ 3 มิลลิกรัม ในถ้วยอลูมิเนียม ออกไซด์ แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 20°C ไปจนถึง 950°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 5°C/นาที นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความเป็นลิกนินโดยการพิจารณาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องมือ FTIR

Andersson และคณะ (2011: a) รายงานผลวิธีการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้ถ่านกัมมันต์และถ่านลอยเป็นตัวดูดซับ ทั้งนี้ ได้ทำการทดลองแบบกะ (batch adsorption) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าความสามารถในการดูดซับเป็นหลัก และวัดความเข้มข้นของลิกนินด้วยเครื่องมือ UV absorption ซึ่งมีสถานะที่ทำการทดสอบ ได้แก่ (1) ปริมาณตัวดูดซับ (2) ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเริ่มต้น (3) อุณหภูมิของกระบวนการดูดซับ และ (4) ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 2-12 เมื่อปรับสถานะด้วยกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการดูดซับนี้ คือ (1) ปริมาณตัวดูดซับถ่านกัมมันต์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตร และถ่านลอยเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร (2) ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเริ่มต้นที่ 0.2 กรัมต่อลิตร จะมีค่าความสามารถในการดูดซับได้มากกว่า 90% สำหรับตัวดูดซับทั้งสอง (3) อุณหภูมิของกระบวนการดูดซับอยู่ที่ 60°C และ (4) ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.8-7.2 นอกจากนี้ ยังพบว่าไอโซเทอมการดูดซับของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์และถ่านลอย สามารถนำสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิชมาใช้อธิบายได้ทั้งสองสมการ แต่ที่สถานะการดูดซับที่อุณหภูมิ 60°C ของถ่านลอยจะสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์มากกว่า

ในปีเดียวกัน Andersson และคณะ (2011: b) ได้ศึกษากลไกการกำจัดลิกนินในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีอนุภาคขนาด 57 ไมโครเมตร และถ่านลอยที่มีอนุภาคขนาด 23 ไมโครเมตร เป็นตัวดูดซับ ที่ปริมาณตัวดูดซับถ่านกัมมันต์เท่ากับ 4 กรัมต่อลิตร และถ่านลอยเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร ผลจากการทดลองพบว่า กลไกการดูดซับลิกนินบนตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นแบบ pseudo-second order reaction เหมือนกัน ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวดูดซับถ่านลอยมากกว่าเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่า

ต่อมา Andersson และคณะ (2012) ได้นำเสนอการดูดซับลิกนินในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยถ่านลอยที่มีอนุภาคขนาด 23 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวรูพรุนเท่ากับ $28.6 \text{ m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ โดยทำการทดลองแบบกะ (batch adsorption) เปรียบเทียบกับการทดลองแบบต่อเนื่อง (fixed bed continuous column) ผลจากการทดลองพบว่า ถ่านลอยมีความสามารถในการดูดซับลิกนินได้สูงสุด $28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ นอกจากนี้ สามารถนำสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิชมาใช้อธิบายไอโซเทอมการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ทั้งสองสมการ

Gütsch and Sixta (2012) รายงานการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์หลังจากการดูดซับลิกนิน โดยนำถ่านกัมมันต์มาแช่ในตัวทำละลาย 5 ชนิด คือ (1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มอล (2) อะซิโตน/น้ำที่อัตราส่วน 5:1 (v/v) (3) เอทานอล (4) กรดอะซิติก และ (5) DMSO โดยแช่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นกรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนในอัตรา 3°C/min ที่อุณหภูมิทดสอบ 850-950°C เป็นเวลาทดสอบ 30-45 นาที ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า การใช้ตัวทำละลายอะซิโตนจะไม่ส่งผลต่อการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ ในขณะที่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิทดสอบ 900°C เป็นเวลา 30 นาที จะให้ผลการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์ได้ดีที่สุด

นอกจากนี้ เมื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ในกระบวนการดูดซับเพิ่มเติม พบว่าสามารถบำบัดสีและลดค่าซีไอดีของน้ำทิ้งได้เป็นอย่างดี ดังรายงานของ Ahmad and Hameed (2009) ที่ศึกษาการบำบัดสีและลดค่าซีไอดีของน้ำทิ้งโรงงานสีย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ไผ่และใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้นการก่อกัมมันต์ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิว $988 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $0.69 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย 2.82 nm ทั้งนี้ ผลการทดลอง พบว่า กระบวนการนี้สามารถบำบัดสีและลดค่าซีไอดีของน้ำทิ้งได้สูงสุดเท่ากับ 91.84% และ 75.21% ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อใช้การทำนายกระบวนการดูดซับตามสมการของ Freundlich จะพบว่า สามารถอธิบายแบบจำลองการดูดซับได้สอดคล้องกับผลการทดลองดีที่สุดที่อุณหภูมิ 30°C

อีกทั้งงานวิจัยของ Wang and Yan (2011) รายงานว่าไม้ไผ่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในกระบวนการดูดซับ เนื่องจาก ไม้ไผ่มีปริมาณคาร์บอนสูงถึง 48.64% มีปริมาณไนโตรเจน กำมะถัน และไฮโดรเจน ต่ำเพียง 0.14% , 0.11% และ 6.75% ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังสามารถเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ให้มีความเป็นรูพรุนสูงถึง $4-10$ เท่าได้ด้วย ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานได้เป็นอย่างดี โดยที่ Wang and Yan ทำการทดลองดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 24.62 mg/L มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 1.0 และใช้เวลาการกักเก็บแบบกะ 21 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งผลจากการทดลอง พบว่า มีปริมาณการดูดซับสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 2.401 mg/g และ 1.705 mg/g ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมถ่านไม้ไฟตงลิมแล้ง โดยหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาถ่าน

1.1 นำไม้ไฟมาล้างให้สะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวไม้ไฟ และตากให้แห้ง

1.2 นำไม้ไฟที่ผ่านการลดความชื้น เข้าสู่กระบวนการคาร์บอไนเซชัน ด้วยการเผาในช่วงอุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C (อ้างอิงตามวิธีการทดลองของ Gonzalez and Pliego-Cuervo, 2013 ที่อธิบายว่าช่วงอุณหภูมิที่เผาไหม้ไม้ไฟที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 400-600°C) ในเตาเผาถ่านน้ำมัน 200 ลิตร แบบแนวนอน ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 เตาเผาถ่านน้ำมัน 200 ลิตร แบบแนวนอนสำหรับเผาไม้ไฟตงลิมแล้ง

1.3 นำถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ มาบดให้ละเอียดจนสามารถผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมโครเมตร แล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.4 วิเคราะห์ค่าดูดซับไอโอดีนสำหรับถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาถ่าน โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุดด้วยวิธีการตามข้อ 2

2. การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94

2.1 ชั่งน้ำหนักถ่านตัวอย่างในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร บันทึกค่าที่แน่นอน ปิดฝาขวดรูปชมพู่ให้สนิท

2.2 เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แกว่งให้ถ่านชุ่มด้วยกรด

2.3 ต้มสารในขวดรูปชมพู่ให้เดือดเพื่อไล่ไอน้ำและก๊าซฟอสฟอไรด์ออกจากผิวของถ่าน แล้วตั้งขวดรูปชมพู่ทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

2.4 เติมสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดรูปชมพู่ให้สนิท เขย่าแรงๆ 30 วินาที

2.5 กรองแยกถ่านด้วยกระดาษกรอง ทิ้งสารละลายในช่วงแรกออกไปจนกระทั่งกระดาษกรองอึมตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสิ่งที่กรองได้ด้วยขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร

2.6 ปิเปตสารละลายที่กรองได้ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนได้สารละลายสีเหลือง

2.7 เติมน้ำแบ่ง 2-3 หยด สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน

2.8 ไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนได้สารละลายใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ทั้งหมด

2.9 คำนวณความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือจากสมการที่ (5)

$$C_i = \frac{C_T}{(50 \times V_T)} \quad (5)$$

เมื่อ C_i = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือ

C_T = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

V_T = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.10 คำนวณค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมของถ่านจากสมการที่ (6)

$$q_i \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{A - (D_f \times B \times V_T)}{G_A} \quad (6)$$

เมื่อ q_i = ค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมของถ่าน (mg.g^{-1})

$A = 12693 \times C_T$

$B = 126.93 \times C_T$

D_f = แฟคเตอร์การเจือจาง (dilution factor)

$$D_f = \frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนเริ่มต้น} + \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรไอโอดีนที่ปิเปต}}$$

G_A = น้ำหนักถ่าน

C_T = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

V_T = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.11 สร้างกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับไอโอดีนต่อกรัมของถ่านกับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังการดูดซับ

2.12 คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับถ่าน ณ ตำแหน่งความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนเท่ากับ 0.02 นอร์มอล

3. การเตรียมถ่านกัมมันต์ไม่ฝังกลิมแล้ง โดยหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับสารกระตุ้นแต่ละชนิดในการก่อกัมมันต์

3.1 นำถ่านที่ผ่านการคัดขนาดแล้วมากระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นและสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 โดยกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุติดต่อบริเวณกระตุ้น เท่ากับ 1:4

3.2 ให้ความร้อนโดยการกลั่นไพลกลับในช่วงเวลา 0-24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 9

3.3 ล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้โดยวิธีการกรองแบบลดความดันด้วยน้ำสะอาดจนมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7

3.4 อบถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.5 วิเคราะห์ค่าดูดซับไอโอดีนสำหรับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารเคมีทั้งสองชนิดที่เวลาต่างๆ เพื่อหาระยะเวลาการกระตุ้นที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุดด้วยวิธีการตามข้อ 2



รูปที่ 9 การกระตุ้นถ่านด้วย กรด/ด่าง ร่วมกับการให้ความร้อนแบบการกลั่นไพลกลับ (รีฟลักซ์)

4. วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของถ่านกัมมันต์ ตามมาตรฐาน ASTM D3173-95

4.1 อุ่นเตาให้มีอุณหภูมิ 150°C

4.2 อบถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

4.3 เติมถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 1 กรัม ในถ้วยกระเบื้องที่เตรียมไว้ นำไปอบที่อุณหภูมิ 150°C จนถ่านมีน้ำหนักคงที่

4.4 คำนวณปริมาณความชื้นจากสมการที่ (7)

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักสารตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักสารตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่างก่อนอบ}} \quad (7)$$

5. วิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D3174-95

5.1 เผาถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

5.2 เติมถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 1 กรัม ในถ้วยกระเบื้องที่เตรียมไว้ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 650°C โดยเปิดฝาขณะเผา จนถ่านมีน้ำหนักคงที่ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การวางถ่านในเตาเผาที่อุณหภูมิ 650°C เพื่อหาปริมาณเถ้า

5.3 คำนวณปริมาณเถ้าจากสมการที่ (8)

$$\text{ร้อยละของเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักสารตัวอย่างหลังเผา} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad (8)$$

6. วิเคราะห์ปริมาณสารระเหยได้ ตามมาตรฐาน ASTM D3175-95

6.1 เผาด้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิดที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

6.2 เติมถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 1 กรัม ในถ้วยกระเบื้องที่เตรียมไว้ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 950°C โดยปิดฝาขณะเผา เป็นเวลา 7 นาที

6.3 นำถ้วยกระเบื้องพร้อมสารในฝาปิดออกจากเตาเผาทันที ตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาที ตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง บันทึกน้ำหนักสารหลังเผา

6.4 เผาซ้ำจนกระทั่งสารมีน้ำหนักคงที่

6.5 คำนวณปริมาณสารระเหยได้จากสมการที่ (9)

$$\text{ร้อยละของสารระเหยได้} = \frac{(\text{น้ำหนักสารตัวอย่างก่อนเผา} - \text{น้ำหนักสารตัวอย่างหลังเผา}) \times 100}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่างก่อนเผา}} \quad (9)$$

7. คำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว จากผลต่างระหว่างปริมาณเถ้ากับปริมาณสารระเหยได้ ดังสมการที่ (10)

$$\text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละของเถ้า} - \text{ร้อยละของสารระเหยได้} \quad (10)$$

8. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องมือ FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy: Agilent Cary 630) โดยนำผงถ่านกัมมันต์ประมาณ 1 มิลลิกรัม ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วางลงบนเซลล์คริสตัลและทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีของอินฟราเรด ในช่วงพลังงาน Mid - Infrared หรือในช่วงเลขคลื่น 600-4000 cm⁻¹

9. วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องมือ SEM โดยการส่งทดสอบ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

10. การเตรียมสารละลายลิกนินสังเคราะห์และกราฟมาตรฐาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

10.1 นำผงลิกนิน (Lignin, alkali) จากบริษัท Sigma-Aldrich (Singapore) ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.3 g/ml ที่ 25°C มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้น นำมาชั่งปริมาณ 1 กรัม แล้วละลายด้วยสารละลายบอริก 0.1 โมล ที่เตรียมได้จากการนำกรดบอริก (Assay 99.5%, MW=61.83 g/mol, d = 1.44 g/ml จากบริษัท Guangdong Guanghua Chemical Factory Co., Ltd.) ปริมาณ 6.183 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร จากนั้น ปรับ pH สารละลายให้มีค่าเท่ากับ 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

10.2 เตรียมสารละลายลิกนินมาตรฐาน 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ppm ด้วยการปิเปตสารละลายลิกนิน 1000 ppm ปริมาตร 1, 2, 4, 6, 8, และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายบอริก 0.1 โมล

10.3 นำสารละลายลิกนินมาตรฐานที่ 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ppm ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer (UV-1700 PharmaSpec: Shimadzu) ที่ $\lambda_{\max} = 284.5 \text{ nm}$ ทั้งนี้ ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer รายงานในภาคผนวก ก ส่วนตัวอย่างสารละลายลิกนินสังเคราะห์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 สารละลายลิกนินและเครื่อง UV-visible spectrophotometer ที่ใช้ทดสอบ

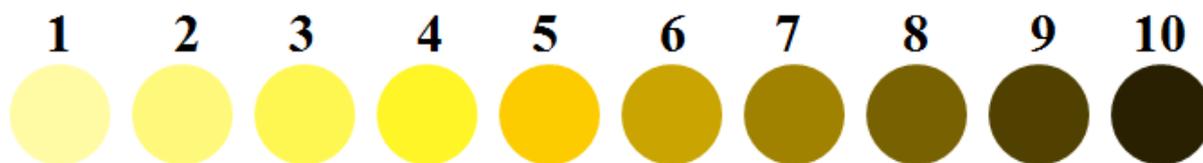
11. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายลิกนินด้วยถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาองค์ประกอบดังต่อไปนี้

11.1 เตรียมชุดเครื่องมือสำหรับการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (แสดงขั้นตอนการทดลองการดูดซับสารละลายลิกนินด้วยถ่านกัมมันต์ดังภาคผนวก ข) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ดองต้มแล้ว โดยกำหนดมิติของชุดดูดซับเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งสามารถบรรจุถ่านกัมมันต์และป้อนน้ำทิ้งเข้าไปในคอลัมน์ด้วยอัตราการไหลของน้ำทิ้งที่ 6 mL/min ทั้งนี้ กำหนดระบบการไหลผ่านของน้ำทิ้งให้เป็นไปตามหลักการของแรงโน้มถ่วงของโลก คือ มีการไหลของน้ำทิ้งเป็นแบบไหลลงผ่านระบบชั้นผงถ่านกัมมันต์ จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นและความเข้มข้นของสารละลายลิกนินในน้ำทิ้งก่อนและหลังการผ่านการดูดซับ โดยคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายลิกนินที่เหลืออยู่จากสมการ ที่ (11) และ (12) ตามลำดับ (Torrades,

et al., 2008) ทั้งนี้ใช้แถบสีตามรูปที่ 12 เพื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการดูดซับ ณ เวลาใดๆ

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสี} = \frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \quad (11)$$

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนิน} = \frac{(\text{ปริมาณลิกนินเริ่มต้น} - \text{ปริมาณลิกนิน ณ เวลาใดๆ}) \times 100}{\text{ปริมาณลิกนินเริ่มต้น}} \quad (12)$$



รูปที่ 12 แถบสีเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน ณ สภาวะการดูดซับใดๆ

11.2 หาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนิน โดยจะแปรปริมาณถ่านกัมมันต์ ในช่วง 0 - 1.0 กรัม บรรจุในชุดเครื่องมือสำหรับการทดลอง โดยกำหนดการทดลองที่อุณหภูมิห้อง อัตราการป้อนน้ำทิ้ง (6 mL/min) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH =7) และระยะเวลาการทดสอบ (0-60 mins) แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น (รูปที่ 12) ส่วนความเข้มข้นของสารละลายลิกนินก่อนและหลังการดูดซับ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer (Torrades, et al., 2008) จากนั้น คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีและการกำจัดสารละลายลิกนิน ตามสมการ ที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

11.3 หาสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนิน โดยแปรสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 4, 7 และ 9 ด้วยการเติมกรดหากน้ำทิ้งเริ่มต้นมีค่าพีเอชสูง และปรับน้ำทิ้งเริ่มต้นที่มีค่าพีเอชต่ำด้วยด่าง โดยกำหนดอุณหภูมิ อัตราการป้อนน้ำทิ้ง ปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลาการทดสอบ ให้คงที่ แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น ส่วนความเข้มข้นของลิกนินก่อนและหลังการดูดซับ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer (Torrades, et al., 2008) จากนั้น คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีและการกำจัดสารละลายลิกนิน ตามสมการ ที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

11.4 หาระยะเวลาในการดูดซับ (retention time) ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนิน โดยจะแปรค่า retention time ของการดูดซับ ซึ่งกำหนดอุณหภูมิ ปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้คงที่ แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น ส่วนความเข้มข้นของสารละลายลิกนินก่อนและหลังการดูดซับ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer (Torrades, et al., 2008) จากนั้น คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีและการกำจัดสารละลายลิกนิน ตามสมการ ที่ (11) และ (12) ตามลำดับ

11.5 ทำนายผลการทดลองด้วยไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนิน ซึ่งจะเก็บข้อมูล ปริมาณของตัวดูดซับและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล เพื่อหาความสามารถในการดูดซับสีและลิกนินบนถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตามสมการที่ (2) และ (4) โดยจะเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลจากการทำนายด้วยสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิชว่าสมการใดจะมีความสอดคล้องและความน่าเชื่อถือมากกว่ากัน

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

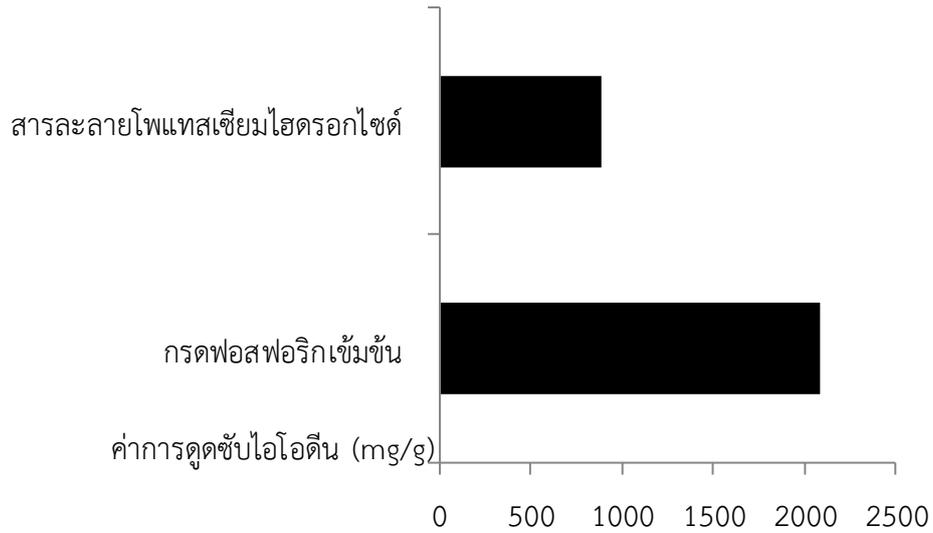
1. การศึกษาสภาวะและปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ตงลิ้มแล้ง โดยพิจารณาองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาถ่านไม้ไผ่ตงลิ้มแล้ง ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 400-600°C โดยนำถ่านที่ผ่านการเผาด้วยเตาเผาถ่านน้ำมัน 200 ลิตร แบบแนวนอน ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C มาทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีนเพื่อหาอุณหภูมิสำหรับการเผาถ่านที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุด แสดงผลดังตารางที่ 1 พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาถ่าน คือ อุณหภูมิ 600°C โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุดที่ 595 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน

ตารางที่ 1 ค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อุณหภูมิการเผาถ่านต่างๆ

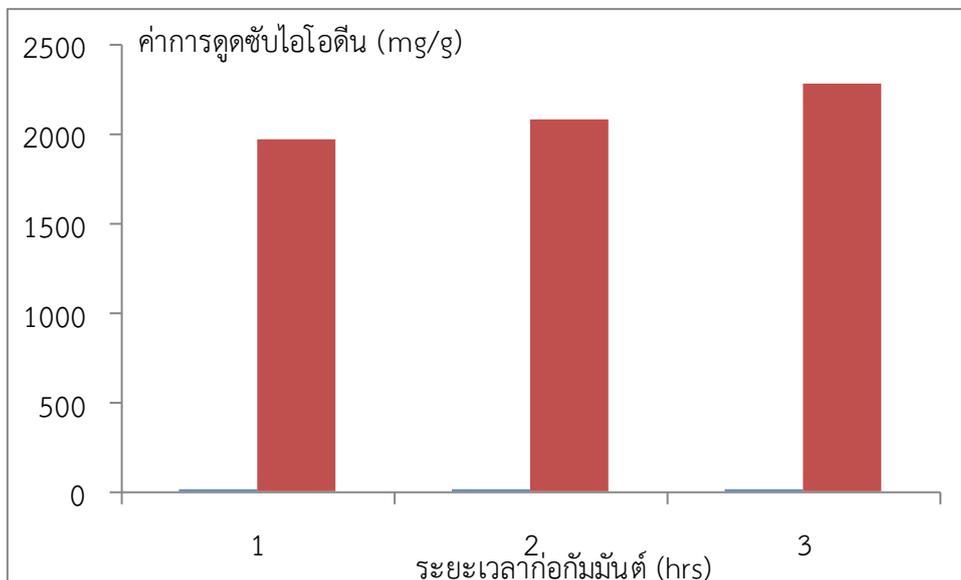
อุณหภูมิการเผาถ่าน (°C)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม/กรัมถ่าน)
400	434
500	462
600	595

1.2 สารกระตุ้นที่เหมาะสมสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ร่วมกับการให้ความร้อนแบบการกลั่นไพลกลับ (รีฟลักซ์) โดยเปรียบเทียบการใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นและสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนกรดต่อถ่านที่ 4:1 เป็นสารกระตุ้นถ่านที่เตรียมได้จากข้อ 1.1 จากนั้น นำถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกและสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มาทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีน โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุด ดังรูปที่ 13 พบว่า ชนิดของสารกระตุ้นที่เหมาะสมสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ กรดฟอสฟอริก เนื่องจาก ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกร่วมกับการรีฟลักซ์ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุดที่ 2082 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ส่วนถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการรีฟลักซ์ ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนเพียง 882 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ทั้งนี้ การกระตุ้นถ่านด้วยกรดหรือด่าง ร่วมกับการให้ความร้อนแบบการกลั่นไพลกลับ (รีฟลักซ์) เป็นการทำให้ถ่านชุ่มตัวด้วยสารเคมีที่เติมลงไป โดยสารเคมีสามารถแทรกซึมและทำลายโครงสร้างของถ่าน ทำให้โครงสร้างของถ่านเกิดรูพรุนขึ้น นอกจากนี้ สารเคมีที่ใช้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ ถ่าน หรือแทรกตัวอยู่ภายในถ่านทำให้เกิดการหดตัวน้อย แต่เมื่อได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิสลายตัวของสารเคมีแล้ว สารเคมีจะเปลี่ยนเป็นก๊าซระเหยออกไปทำให้เกิดรูพรุนขึ้นเป็นจำนวนมาก และเมื่อนำถ่านที่ผ่านกระตุ้นมาล้างสารเคมีออกด้วยน้ำกลั่น ถ่านจะเกิดช่องว่างภายในหรือรูพรุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่มากกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 เนื่องจาก ไอออนบวกของโปแตสเซียมจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของผลึกของถ่านกัมมันต์ได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C (ณัฐยา, 2545) ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิทดสอบ



รูปที่ 13 ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก/โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์รวมกับการรีฟลักซ์

1.3 ระยะเวลาในการกระตุ้นทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ ที่กำหนดในช่วง 1-3 ชั่วโมง โดยใช้สารกระตุ้นที่ได้จากข้อ 1.2 เพื่อถ่านกัมมันต์ จากนั้น นำถ่านที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีตามระยะเวลาที่กำหนดมาทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีนเพื่อหาระยะเวลาการถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน



รูปที่ 14 ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพร้อมกับการรีฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ

จากผลการทดลอง ดังรูปที่ 14 พบว่า ระยะเวลาในการกระตุ้นทางเคมีที่ดีที่สุด คือ 3 ชั่วโมง โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุดที่ 2285 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ส่วนถ่านที่ผ่านการกระตุ้นที่ 2 ชั่วโมง และ 1 ชั่วโมง จะให้ค่าการดูดซับไอโอดีนลดลงที่ 2082 และ 1971 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ตามลำดับ เนื่องจาก ระยะเวลาการกระตุ้นถ่านด้วยกรดพร้อมกับการให้ความร้อนแบบการกลั่นไพลกซ์ (รีฟลักซ์) ที่นานขึ้นจะทำให้สารเคมีสามารถแทรก

ซึมและทำลายโครงสร้างของถ่าน ทำให้โครงสร้างของถ่านเกิดรูพรุนขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านที่ก่อกัมมันต์ด้วยที่ระยะเวลา 3 และ 2 ชั่วโมง ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่ 2285 และ 2082 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมงแล้วมีค่าลดลงเพียง 314 และ 111 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน ตามลำดับ แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนแบบการกลั่นไหลกลับ (รีฟลักซ์) ที่นานขึ้นถึง 3 และ 2 เท่า ตามลำดับ ดังนั้น จึงเลือก ระยะเวลา 1 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่าน เพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเตรียมถ่านกัมมันต์

1.4 ความเข้มข้นของสารกระตุ้นที่เหมาะสมสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยแปรปริมาณสารกระตุ้นที่ได้จากข้อ 1.2 ในอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านที่ 4:1 และ 8:1 เพื่อก่อกัมมันต์ จากนั้น นำถ่านที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีตามความเข้มข้นที่กำหนดมาทดสอบค่าการดูดซับไอโอดีนเพื่อหาความเข้มข้นของสารก่อกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีน

ตารางที่ 2 ค่าการดูดซับไอโอดีน ณ อัตราส่วนของกรดต่อถ่านต่างๆ

อัตราส่วนของกรดต่อถ่าน	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัม/กรัมถ่าน)
4:1	1971
8:1	2012

จากผลการทดลอง ดังตารางที่ 2 พบว่า ความเข้มข้นของสารกระตุ้นที่ดี คือ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านที่ 8:1 โดยให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงที่สุดที่ 2012 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านที่ก่อกัมมันต์ด้วยอัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านที่ 4:1 ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่ 1971 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน ซึ่งมีค่าลดลงเพียง 41 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน แต่ต้องใช้กรดมากขึ้นถึง 4 เท่า ดังนั้น จึงเลือก อัตราส่วนของกรดต่อถ่านที่ 4:1 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่าน เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมถ่านกัมมันต์

2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมในสภาวะ (ก่อกัมมันต์ถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C ด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนกรดต่อถ่าน 4:1 เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง) โดยพิจารณาจาก

2.1 ค่าการดูดซับไอโอดีน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4607-94

2.2 ปริมาณความชื้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3173-95

2.3 ปริมาณเถ้า ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3174-95

2.4 ปริมาณสารระเหยได้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3175-95

2.5 ปริมาณคาร์บอนคงตัว คำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณเถ้ากับปริมาณสารระเหยได้

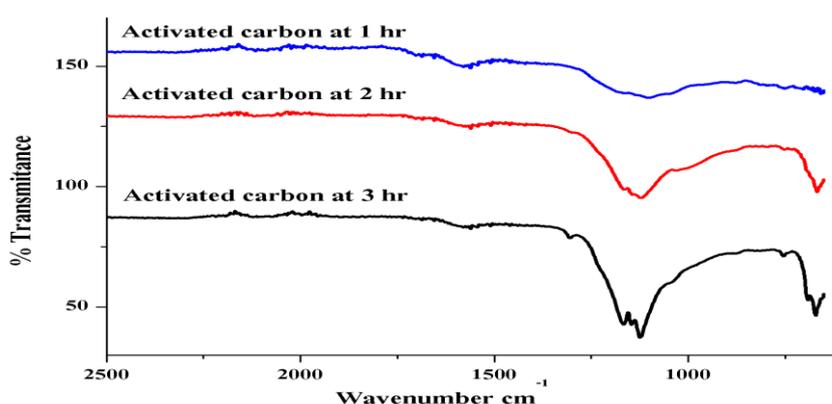
2.6 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องมือ FTIR โดยตรวจวัดในช่วงเลขคลื่น 600-4000 cm^{-1}

ซึ่งผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ สรุปดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมในสภาวะก่อกัมมันต์ถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนกรดต่อถ่าน 4:1 เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

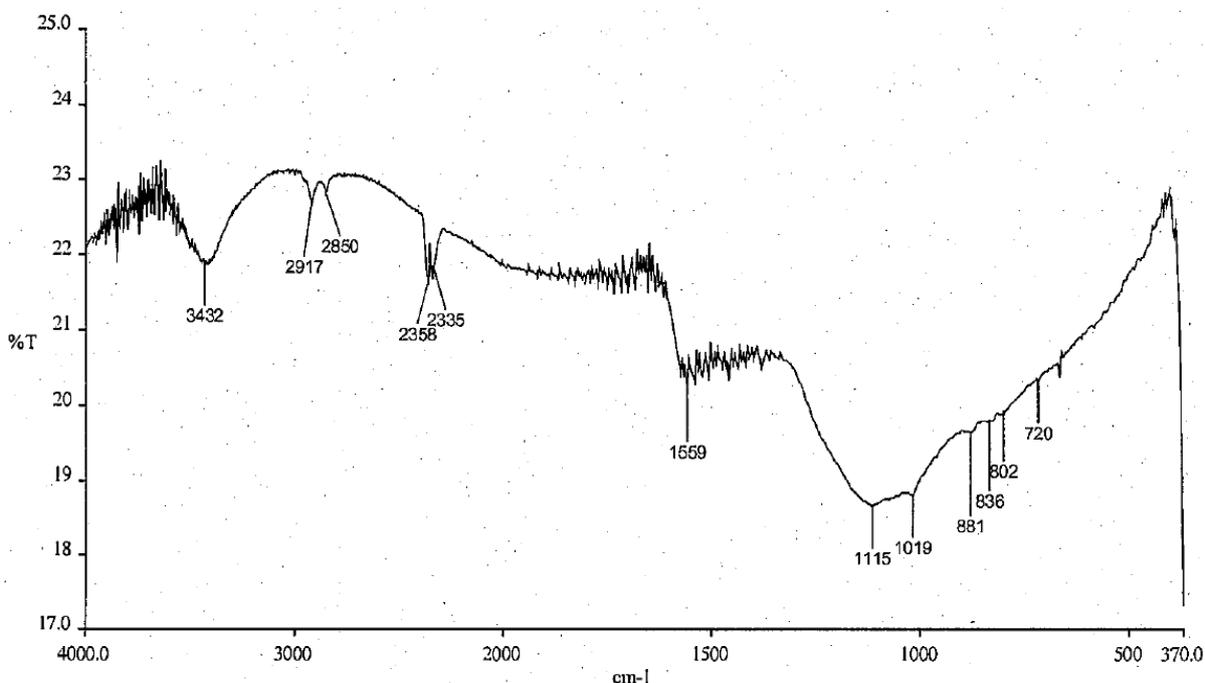
คุณสมบัติ	ค่าที่ได้จากการทดลอง
ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)	1971
ความชื้น (%)	3.9
ปริมาณเถ้า (%)	3.1
ปริมาณสารระเหยได้ (%)	9.4
ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)	92.7

จากผลการทดลอง ดังตารางที่ 3 พบว่า ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ (แสดงรูปของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในภาคผนวก ค) โดยพิจารณาจาก ค่าการดูดซับไอโอดีน (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4607-94) ปริมาณความชื้น (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3173-95) ปริมาณเถ้า (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3174-95) ปริมาณสารระเหยได้ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3175-95) ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่คำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณเถ้ากับปริมาณสารระเหยได้ และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องมือ FTIR ดังรูปที่ 15 พบว่า ปรากฏแถบการยืดของหมู่ฟังก์ชันของ Overtones weak bands of ring carbon, C=C, C-O ที่เลขคลื่น 2121 cm^{-1} , 1560 cm^{-1} (Aromatic C=C), 1107 cm^{-1} (Strong secondary C-O) ทั้งนี้ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Andersson, 2011: a; Andersson, 2011: b; Andersson, 2012)



รูปที่ 15 สเปกตรัม FTIR ของถ่านกัมมันต์ไม่ดองลิ้มแล้งที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกพร้อมกับการรีฟลักซ์ที่เวลาต่างๆ

จากรูปที่ 15 กราฟปรากฏแถบการยืดของหมู่ฟังก์ชันของ Overtones weak bands of ring carbon, C=C, C-O ที่เลขคลื่น 2121 cm^{-1} , 1560 cm^{-1} (Aromatic C=C), 1107 cm^{-1} (Strong secondary C-O) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของถ่านกัมมันต์ทั้งสิ้น ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า สภาวะก่อกัมมันต์ถ่านที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C ด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนกรดต่อถ่าน 4:1 เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ได้เป็นอย่างดี

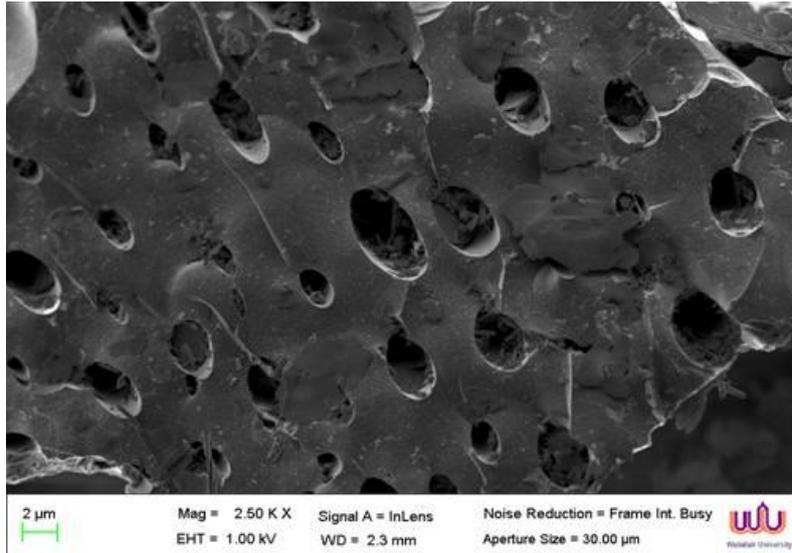


รูปที่ 16 สเปกตรัม FTIR ของถ่านกัมมันต์มาตรฐาน Fluka (ปรีนทร, 2551)

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 15 กับ รูปที่ 16 ที่แสดงสเปกตรัม FTIR ของถ่านกัมมันต์มาตรฐาน (ปรีนทร, 2551) พบว่า ถ่านกัมมันต์มาตรฐานแสดงเส้นสเปกตรัมที่ board และ strong ที่เลขคลื่น $1115, 1019\text{ cm}^{-1}$ ที่สอดคล้องกับรูปที่ 15 อย่างแท้จริง

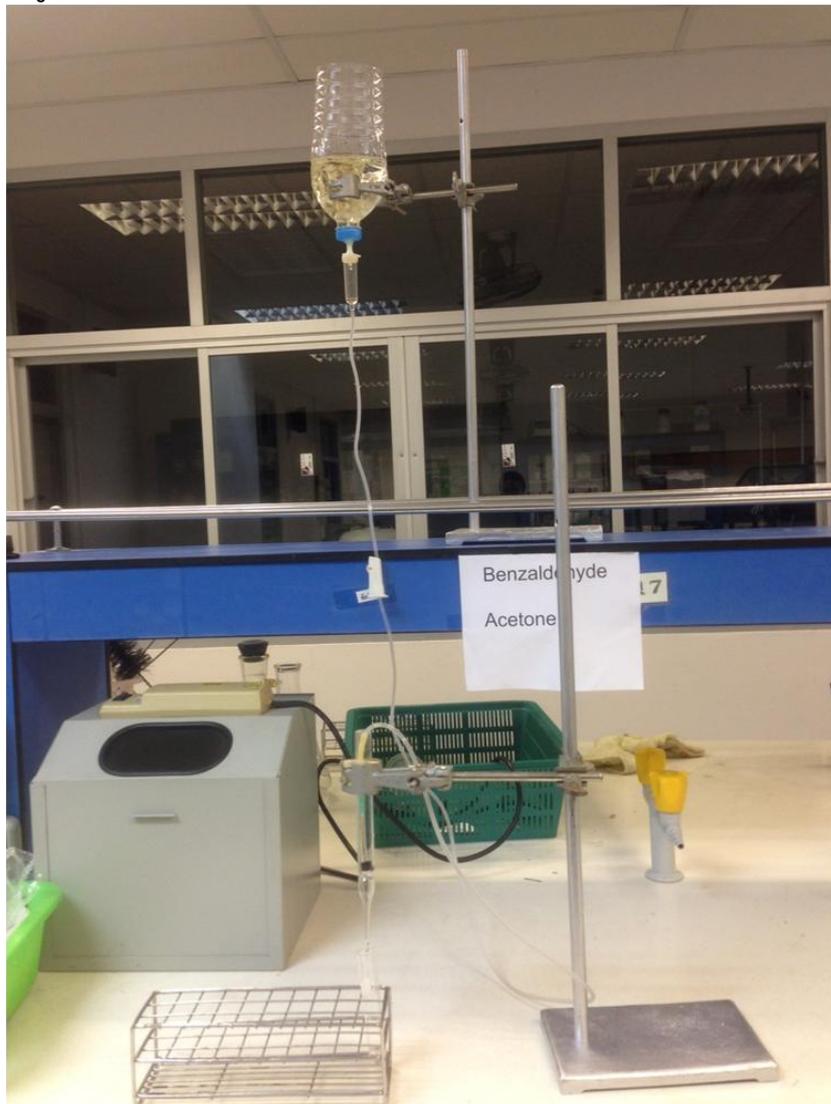
2.7 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องมือ SEM

ผลจากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2,500 เท่า ของถ่านกัมมันต์แผ่นงลิ้มแล้งที่รีฟลักซ์ 1 ชั่วโมง อัตราส่วนกรดฟอสฟอริกต่อถ่าน 4:1 แสดงดังรูปที่ 17 พบว่า ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์แผ่นงลิ้มแล้งมีความเป็นรูพรุนตลอดผิวหน้าและมีการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของถ่านคละกัน ซึ่งเมื่อทำการซูมวัดการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่ผิวหน้าของถ่าน พบว่า มีค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ที่ $4.2\text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งประมวลผลได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เป็นถ่านกัมมันต์รูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 nm



รูปที่ 17 สัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ไฟตงลิมแล้งที่รีฟลักซ์ 1 ชั่วโมง อัตราส่วนถ่านต่อกรดฟอสฟอริก 1:4

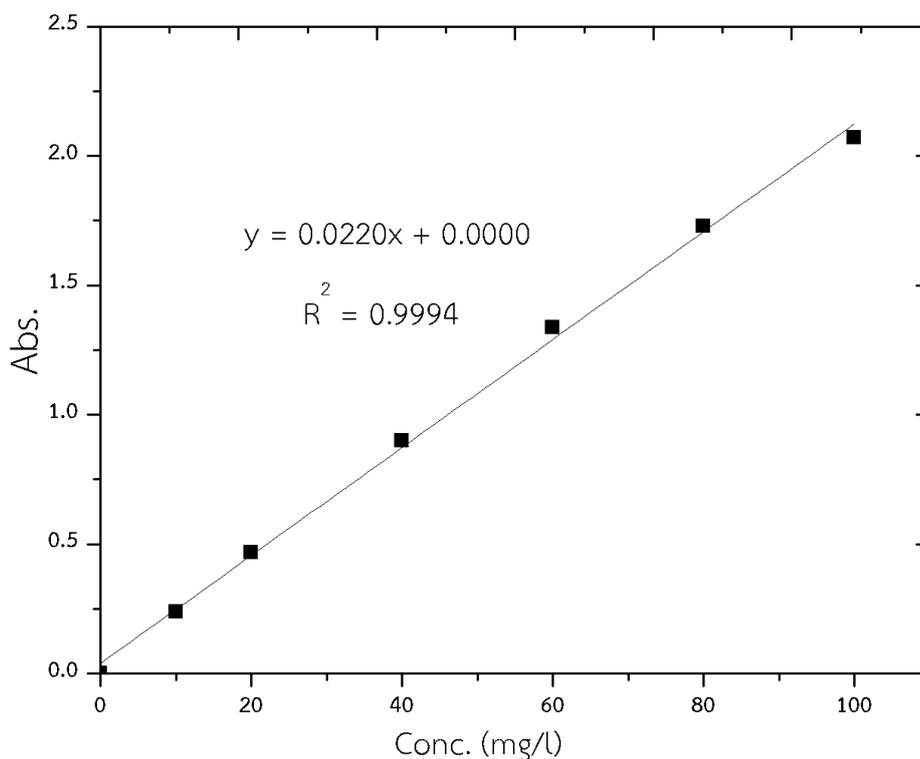
3. ประสิทธิภาพการดูดซับลิกลินด้วยถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาองค์ประกอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 18 ชุดเครื่องมือสำหรับการทดลองการดูดซับลิกลินด้วยถ่านกัมมันต์ไฟตงลิมแล้งระดับห้องปฏิบัติการ

3.1 เตรียมชุดเครื่องมือสำหรับการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เผดงลิ้มแล้ง โดยกำหนดมิติของชุดดูดซับเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งสามารถบรรจุถ่านกัมมันต์และป้อนน้ำทิ้งเข้าไปในคอลัมน์ด้วยอัตราการไหลของน้ำทิ้งไม่ต่ำกว่า 6 mL/min แสดงดังรูปที่ 18 จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นและความเข้มข้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อนและหลังการผ่านการดูดซับที่สภาวะต่างๆ โดยคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีและความเข้มข้นของสารละลายลิกนินที่เหลืออยู่จากสมการ ที่ (11) และ (12) ตามลำดับ (Torrades, et al., 2008)

ทั้งนี้ ในการหาความเข้มข้นของสารละลายลิกนินหลังจากการดูดซับ จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ซึ่งมีกราฟมาตรฐานของความเข้มข้นของสารละลายลิกนินดังรูปที่ 19



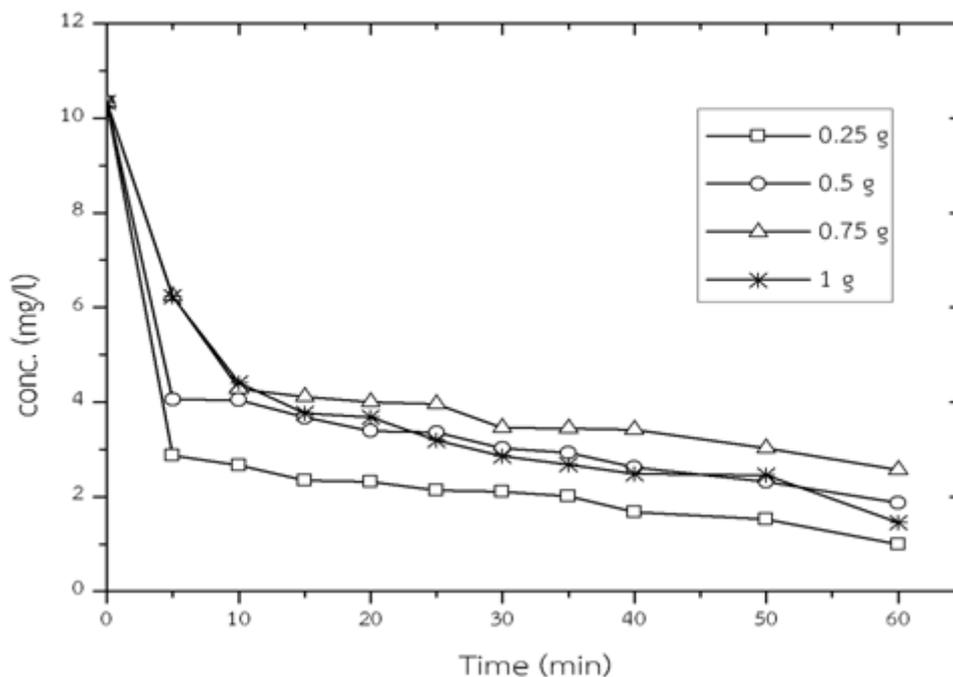
รูปที่ 19 กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน

3.2 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยจะแปรปริมาณถ่านกัมมันต์ ในช่วง 0 – 1.0 กรัม ทดสอบการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นสีจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น พบว่า สารละลายลิกนินสังเคราะห์มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10.330 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่าหมายเลข 1 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 12) ส่วนสารละลายลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีความเข้มข้นเริ่มต้น 11.627 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่าหมายเลข 10 แต่เมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เผดงลิ้มแล้ง สารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสีทั้งสิ้น จึงเทียบเท่าหมายเลข 0 ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสี จึงเท่ากับ 100 ส่วนการกำจัดสารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม พบว่า ความเข้มข้นของลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มภายหลังการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ จะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น

แสดงดังตารางที่ 4 (ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ) ตารางที่ 5 (ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ) รูปที่ 20 (ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ) และ 21 (ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์จากรูปที่ 20 และ 21 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของลิกนินสังเคราะห์ในทุกๆ ปริมาณถ่านดูดซับ จะลดลงไปในทำนองเดียวกัน อย่างเป็นระเบียบ มากกว่ารูปแบบการลดลงของความเข้มข้นของลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ภายหลังจากการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีสารองค์ประกอบมากกว่าหนึ่งชนิด

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ

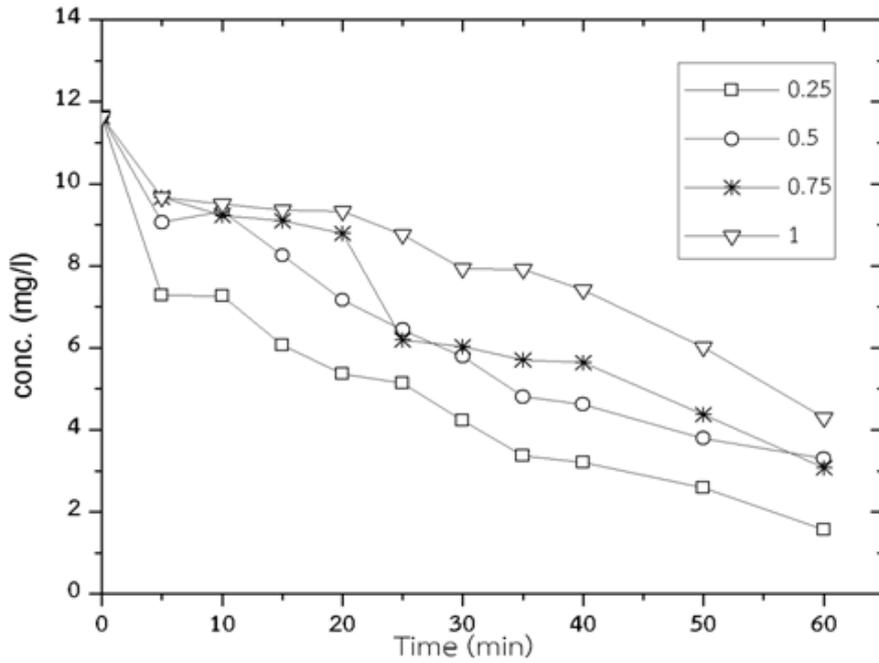
เวลาดูดซับ (นาท) / ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์ (mg/L) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ			
	0.25	0.5	0.75	1
0	10.330	10.330	10.330	10.330
5	2.869	4.052	6.241	6.224
10	2.666	4.047	4.275	4.408
15	2.347	3.675	4.114	3.769
20	2.314	3.391	4.002	3.680
25	2.136	3.352	3.964	3.197
30	2.108	3.019	3.458	2.858
35	2.014	2.925	3.440	2.675
40	1.675	2.614	3.419	2.475
50	1.530	2.314	3.019	2.458
60	0.991	1.869	2.564	1.447



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้ม
แล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ

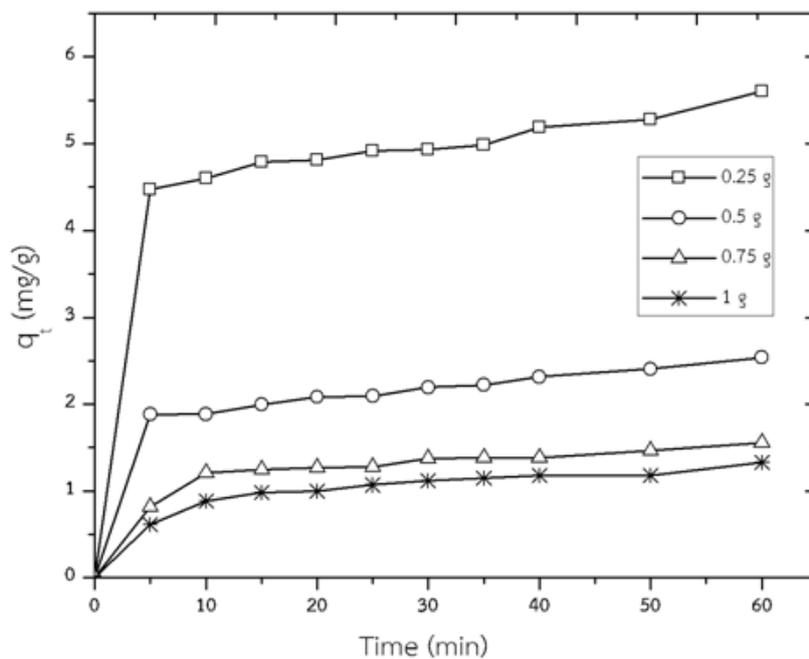
ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วย
ถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ

เวลาดูดซับ (นาท) / ปริมาณถ่าน (g)	ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงาน สกัดน้ำมันปาล์ม (mg/L) หลังผ่านการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ			
	0.25	0.5	0.75	1
0	11.627	11.627	11.627	11.627
5	7.277	9.060	9.666	9.666
10	7.261	9.327	9.233	9.499
15	6.066	8.255	9.105	9.366
20	5.371	7.166	8.794	9.333
25	5.144	6.444	6.189	8.749
30	4.228	5.794	6.039	7.922
35	3.361	4.805	5.710	7.916
40	3.200	4.622	5.633	7.411
50	2.594	3.794	4.370	6.016
60	1.561	3.300	3.078	4.294

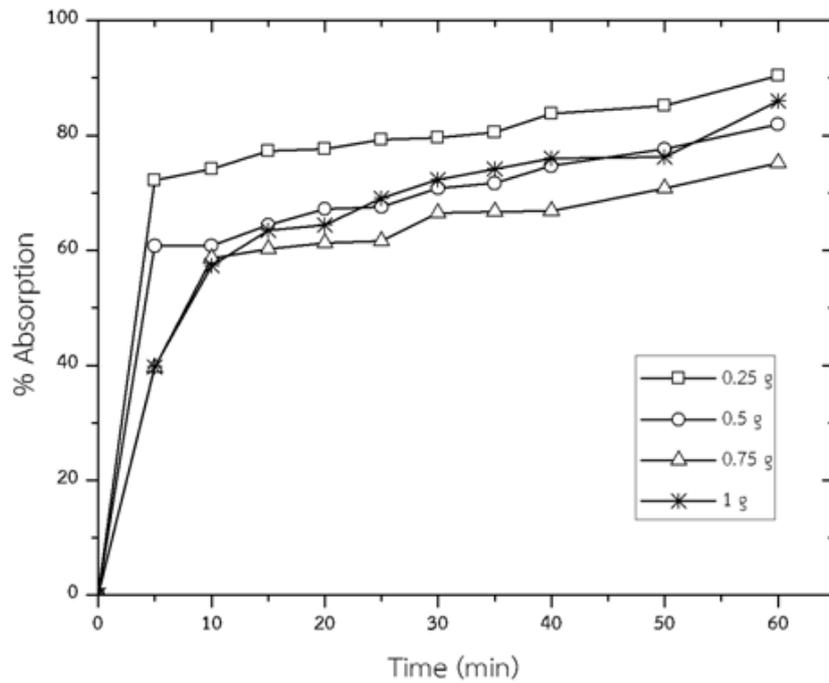


รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของลิกนินในน้ำที่ทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม้ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ

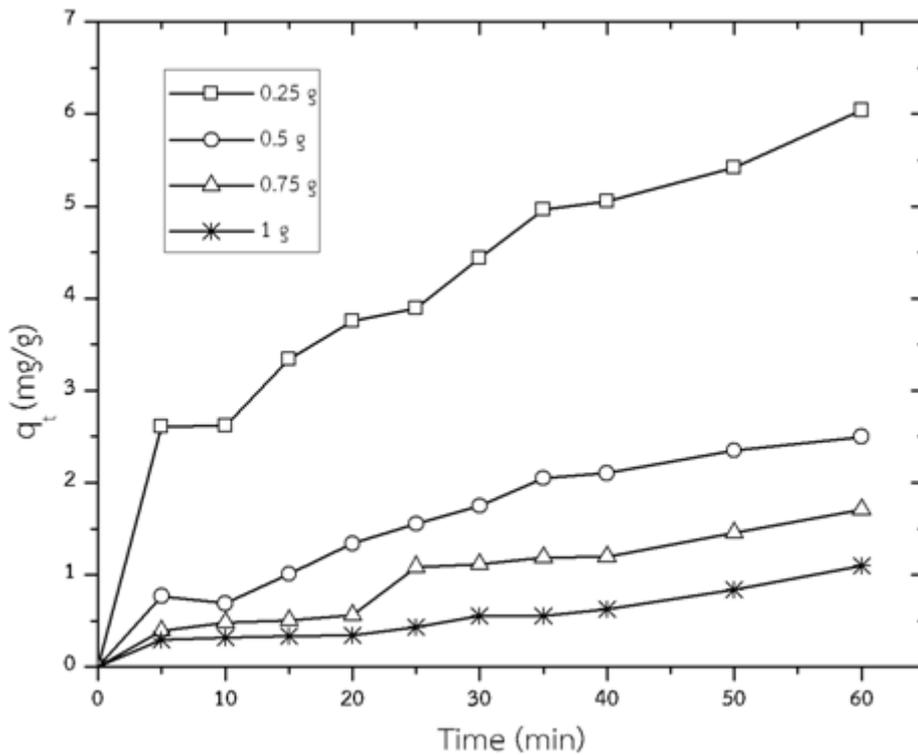
และเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับของสารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำที่ทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม้ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ ดังรูปที่ 22-25 พบว่า ที่ปริมาณถ่าน 0.25 กรัม มีความเหมาะสมกับสภาวะการทดลองการดูดซับทั้งสารละลายลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำที่ทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ที่อุณหภูมิห้อง ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 7 เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด



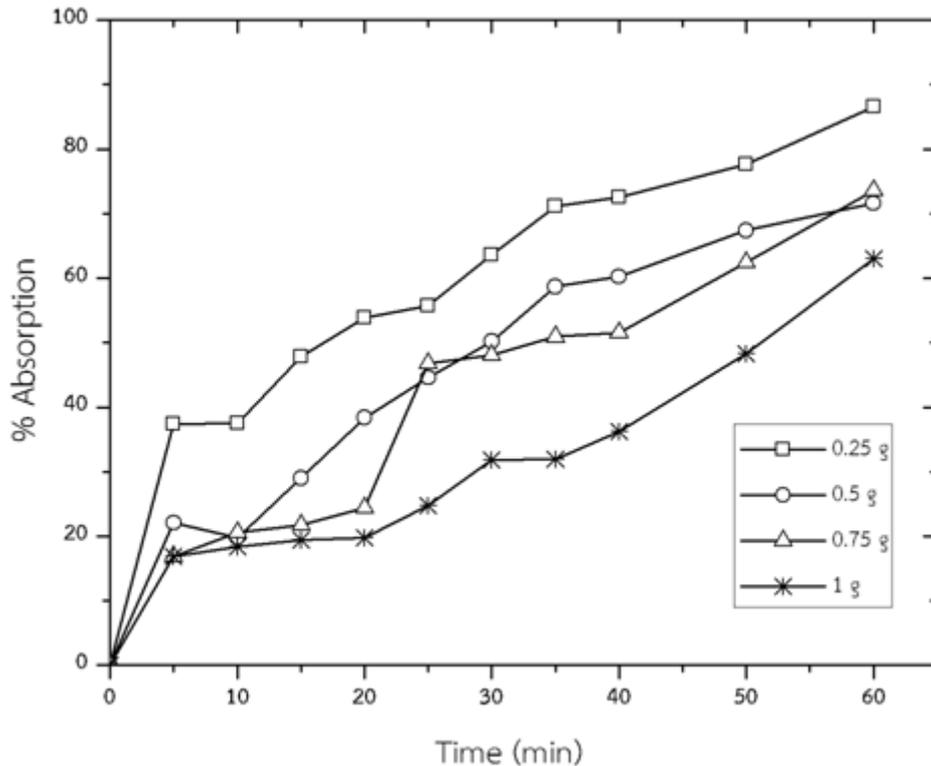
รูปที่ 22 Adsorption capacity ของลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม้ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ



รูปที่ 23 Percent adsorption ของลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไฟตงสั้มแล้งที่ ปริมาณถ่านต่างๆ



รูปที่ 24 Adsorption capacity ของลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์ไฟตงสั้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ



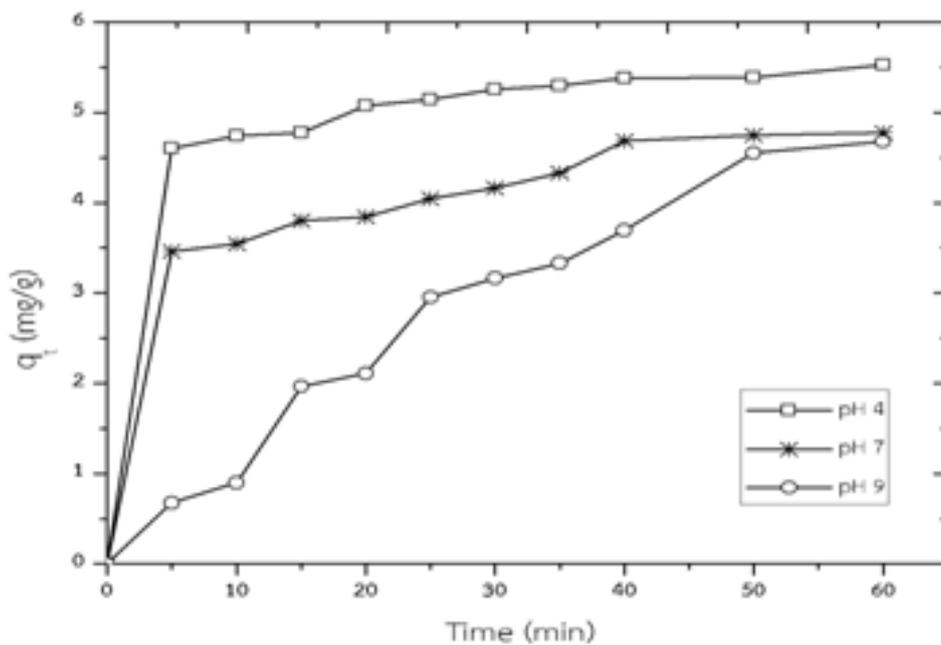
รูปที่ 25 Percent adsorption ของลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม้ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์จากรูปที่ 22-25 จะเห็นได้ว่า ค่าประสิทธิภาพการดูดซับลิกนินสังเคราะห์ในทุกๆ ปริมาณถ่านดูดซับ จะเข้าสู่สมดุลเป็นไปในทำนองเดียวกันอย่างเป็นระเบียบมากกว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มภายหลังจากการดูดซับที่ปริมาณถ่านต่างๆ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า น้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีปัจจัยอื่นๆที่สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับได้

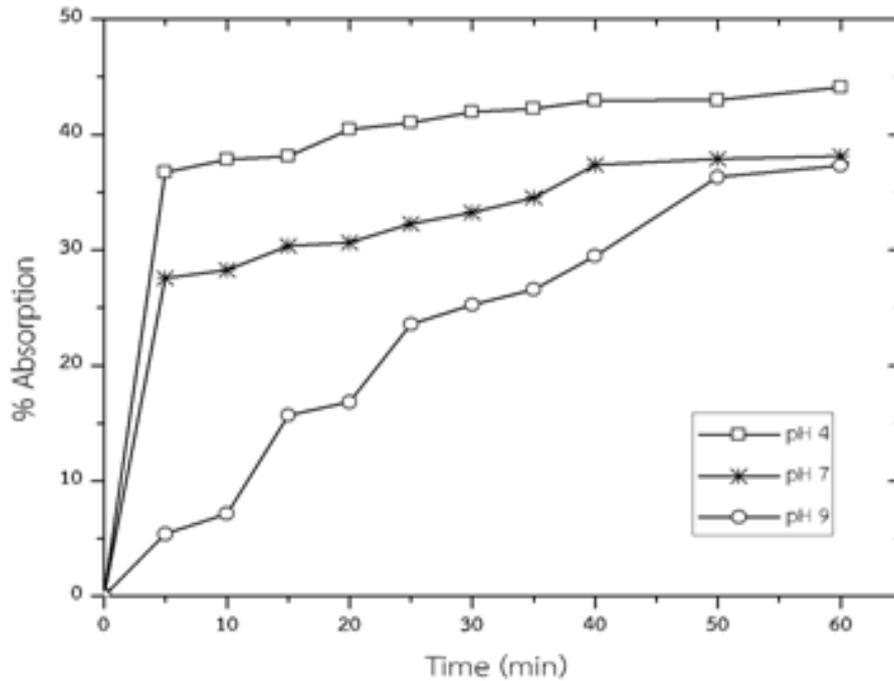
3.3 ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนิน โดยแปรสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 4, 7 และ 9 ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.25 กรัม ระยะเวลาการทดสอบ 0-60 นาที ที่ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินเริ่มต้น 20.893 mg/L (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมที่เก็บมาจากโรงงานเมื่อเวลาผ่านไป) แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น ส่วนความเข้มข้นของสารละลายลิกนินก่อนและหลังการดูดซับ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer จากนั้น คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีและสารละลายลิกนิน ตามสมการ ที่ (11) และ (12) ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น พบว่า สารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20.893 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่ากับหมายเลข 2 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 12) และเมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม้ตงลิ้มแล้ง สารละลายลิกนินเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี จึงเทียบเท่ากับหมายเลข 0 ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสี จึงเท่ากับ 100 ส่วนการกำจัดสารละลายลิกนิน พบว่า ความเข้มข้นของลิกนินสังเคราะห์และลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มภายหลังจากการดูดซับที่ pH ต่างๆ จะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงสีมแล้งที่ pH ต่างๆ

เวลาดูดซับ (นาที)	ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์ หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงสีม แล้งที่ปริมาณถ่านต่างๆ (กรัม)		
	4	7	9
0	20.893	20.893	20.893
5	13.216	15.129	19.766
10	12.994	14.985	19.395
15	12.927	14.557	17.617
20	12.438	14.486	17.379
25	12.316	14.154	15.969
30	12.133	13.948	15.619
35	12.066	13.676	15.341
40	11.927	13.082	14.736
50	11.916	12.981	13.307
60	11.683	12.926	13.097



รูปที่ 26 Adsorption capacity ของลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงสีมแล้งที่ pH ต่างๆ



รูปที่ 27 Percent adsorption ของลิกนินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ pH ต่างๆ

และเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับของสารละลายลิกนินหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ pH ต่างๆ ดังรูปที่ 26-27 พบว่า ที่ปริมาณถ่าน 0.25 กรัม pH 4 มีความเหมาะสมกับสภาวะการทดลองการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด

3.4 ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ปริมาณถ่าน 0.25 กรัม ระยะเวลาการทดสอบ 0-180 นาที pH 4 ณ อุณหภูมิห้อง แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น ส่วนความเข้มข้นของสารละลายลิกนินก่อนและหลังการดูดซับ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer จากนั้น คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีและสารละลายลิกนิน ตามสมการ ที่ (11) และ (12) ตามลำดับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นจากการเทียบด้วยแถบสีตั้งต้น พบว่า

(1) สารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20.938 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่ากับหมายเลข 2 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 12) และเมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง สารละลายลิกนินเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี จึงเทียบเท่ากับหมายเลข 0 ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสี จึงเท่ากับ 100

(2) สารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 43.219 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่ากับหมายเลข 4 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 12) และเมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง สารละลายลิกนินเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี จึงเทียบเท่ากับหมายเลข 0 ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสี จึงเท่ากับ 100

(3) สารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 69.762 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่ากับหมายเลข 6 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 12) และเมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง สารละลายลิกนินเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี จึงเทียบเท่ากับหมายเลข 0 ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสี จึงเท่ากับ 100

(4) สารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 85.61 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่ากับหมายเลข 8 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 12) และเมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง สารละลายลิกนินเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี จึงเทียบเท่ากับหมายเลข 0 ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสี จึงเท่ากับ 100

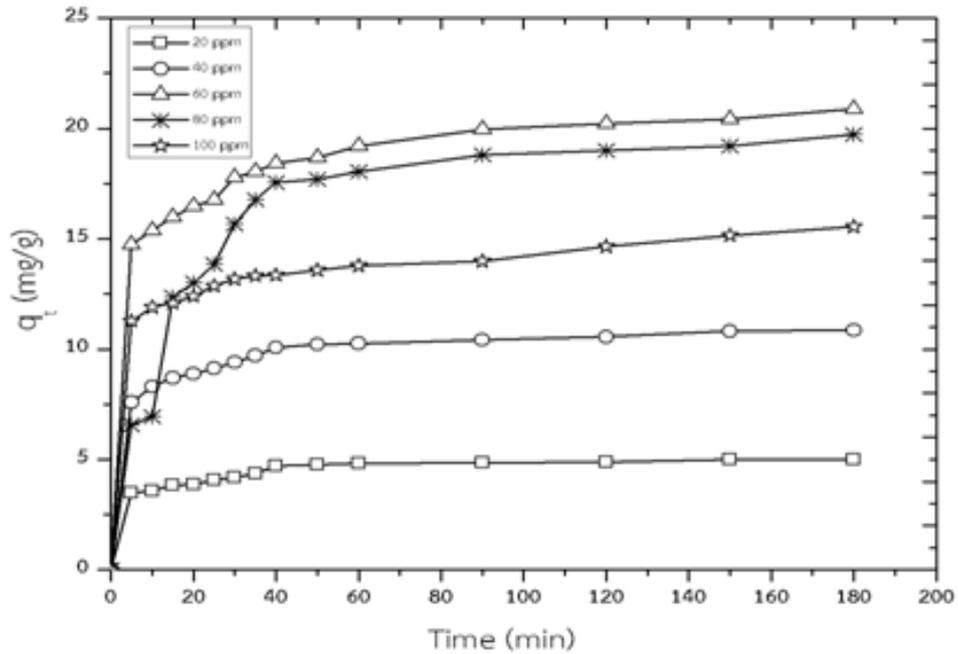
(5) สารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 106.6 mg/L มีสีปรากฏเทียบเท่าหมายเลข 10 (เปรียบเทียบกับรูปที่ 12) และเมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไฟตงลิมแล้ง สารละลายลิกนินเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี จึงเทียบเท่าหมายเลข 0 ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสี จึงเท่ากับ 100

ส่วนการกำจัดสารละลายลิกนิน พบว่า ความเข้มข้นของลิกนินสังเคราะห์ภายหลังการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ จะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 7

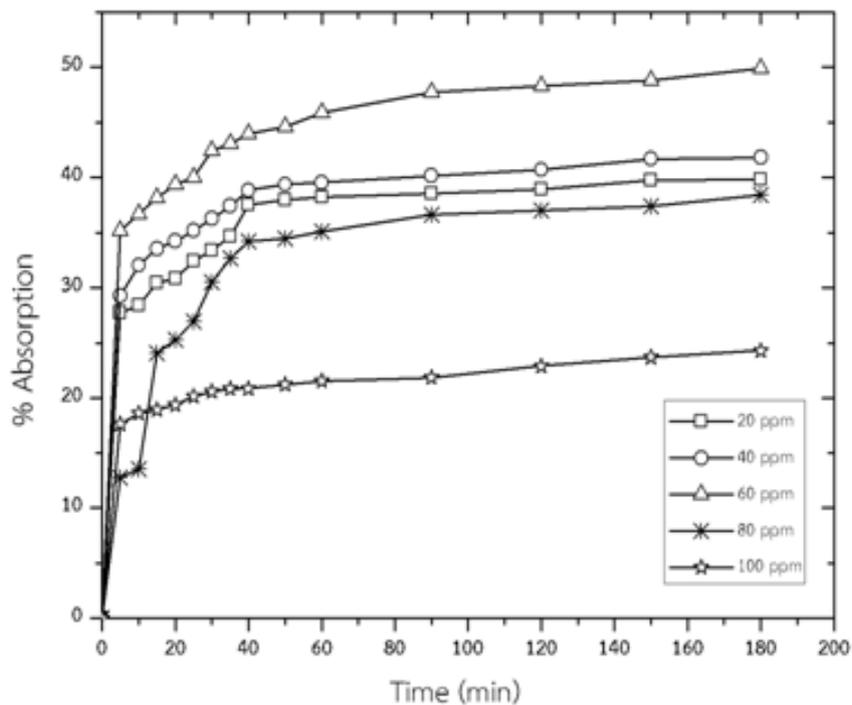
ตารางที่ 7 ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไฟตงลิมแล้งที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์ต่างๆ

เวลาดูดซับ (นาท) / ความเข้มข้นเริ่มต้นของลิกนิน สังเคราะห์ต่างๆ (mg/L)	ความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน (mg/L) หลังผ่านการดูดซับเมื่อแปร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์ต่างๆ				
	20	40	60	80	100
0	20.938	43.219	69.762	85.61	106.6
5	15.129	30.576	45.209	74.696	87.817
10	14.985	29.377	44.152	74.030	86.771
15	14.557	28.721	43.127	65.009	86.447
20	14.486	28.422	42.282	63.937	85.920
25	14.154	28.007	41.826	62.557	85.145
30	13.948	27.540	40.132	59.475	84.649
35	13.676	27.045	39.704	57.646	84.394
40	13.082	26.429	39.065	56.336	84.356
50	12.981	26.200	38.620	56.108	83.980
60	12.926	26.123	37.743	55.534	83.642
90	12.870	25.856	36.482	54.265	83.296
120	12.787	25.624	36.071	53.934	82.185
150	12.609	25.195	35.721	53.591	81.343
180	12.604	25.136	34.961	52.719	80.686

และเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับของสารละลายลิกนินหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไฟตงลิมแล้งที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์ต่างๆ ดังรูปที่ 28-29 พบว่า ที่ปริมาณถ่าน 0.25 กรัม pH 4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินสังเคราะห์ 60.762 mg/L มีความเหมาะสมกับสภาวะการทดลองการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด



รูปที่ 28 Adsorption capacity ของลิกนินหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ต่างลิ้มแล้งที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินต่างๆ

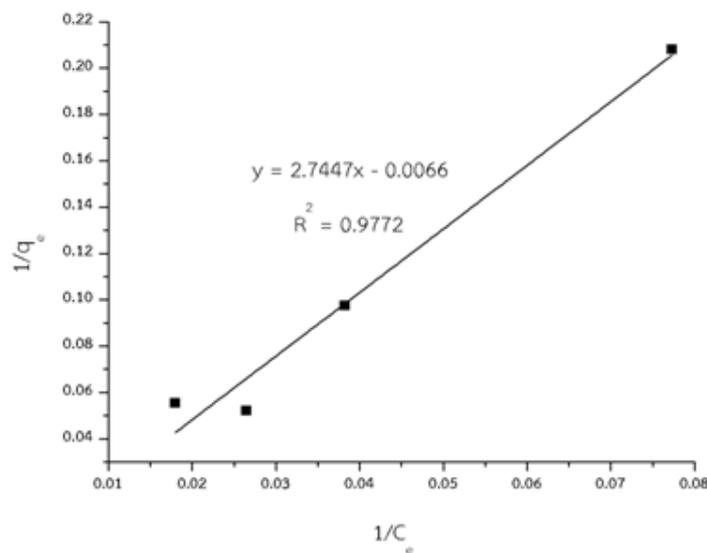


รูปที่ 29 Percent adsorption ของลิกนินหลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ต่างลิ้มแล้งที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินต่างๆ

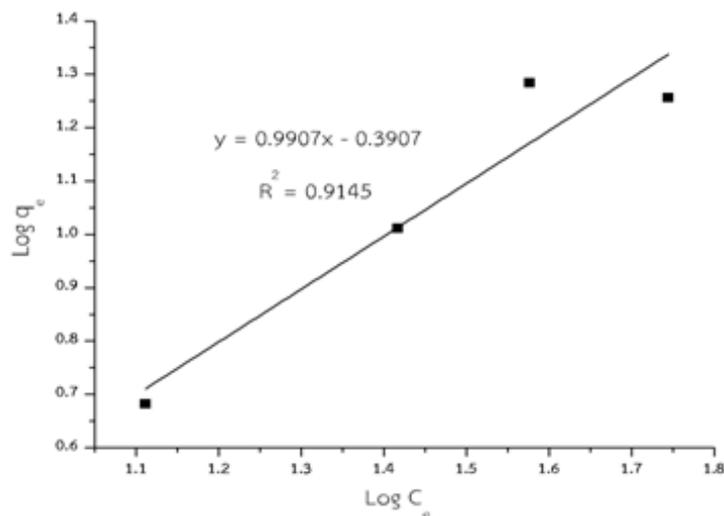
3.5 ระยะเวลาในการดูดซับ (retention time) ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนิน โดยพิจารณาจากข้อมูลในตารางที่ 4-7 และ รูปที่ 20-29 พบว่า เวลาการดูดซับที่เหมาะสมที่เข้าสู่สมดุล คือที่ 60 นาที

3.6 ทำนายผลการทดลองด้วยไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายลิกนิน ซึ่งจะเก็บข้อมูลในด้านปริมาณของตัวถูกดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล เพื่อหาความสามารถในการดูดซับสีและลิกนินบนถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ตามสมการที่ (2) และ (4) โดยจะเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลจากการทำนายด้วยสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิชว่าสมการใดจะมีความสอดคล้องและความน่าเชื่อถือมากกว่ากัน

ซึ่งจากผลการคำนวณ สามารถแสดงไอโซเทอมการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์ ดังรูปที่ 30 และสามารถแสดงไอโซเทอมการดูดซับตามสมการของฟรุนดลิช ดังรูปที่ 31 โดยจะเห็นได้ว่าการดูดซับสารละลายลิกนินด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลี้มแล้งที่สภาวะปริมาณถ่าน 0.25 กรัม pH 4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนิน 60 ppm ณ อุณหภูมิห้อง สอดคล้องตามสมการของแลงเมียร์ เนื่องจาก มีค่าความเป็นเชิงเส้นมากกว่า (R^2 สูงกว่า) หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)



รูปที่ 30 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายลิกนินด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลี้มแล้งที่สภาวะปริมาณถ่าน 0.25 กรัม pH 4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนิน 60 ppm ณ อุณหภูมิห้อง ตามสมการของแลงเมียร์



รูปที่ 31 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายลิกนินด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลี้มแล้งที่สภาวะปริมาณถ่าน 0.25 กรัม pH 4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนิน 60 ppm ณ อุณหภูมิห้อง ตามสมการของฟรุนดลิช

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ไผ่ตงลิ้มแล้งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่มีราคาถูกและมีจำนวนมากในพื้นที่จังหวัดพัทลุง สามารถนำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์พร้อมกับวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งเป็นตัวดูดซับลิกลินินในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มได้ โดยลำดับ ดังนี้

1. ศึกษาสภาวะและปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเตรียมถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง โดยเริ่มต้นจากการนำไม้ไผ่ตงลิ้มแล้งมาเผาที่อุณหภูมิ 400-600°C ในเตาเผาถ่านน้ำมัน 200 ลิตรแบบแนวนอน ตรวจสอบอุณหภูมิการเผาถ่านที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านที่สูงที่สุด พบว่า ไผ่ตงลิ้มแล้งที่เผาที่อุณหภูมิ 600°C ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านที่สูงที่สุด จากนั้น นำถ่านที่ได้มากระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อถ่านเท่ากับ 4:1 และ 8:1 แล้วก่อกัมมันต์ผ่านการให้ความร้อนแบบการกลั่นไพลกลับในช่วงเวลา 0-3 ชั่วโมง เมื่อตรวจสอบผลต่อการก่อกัมมันต์ พบว่า การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นที่อัตราส่วนกรดต่อถ่าน 4:1 ร่วมกับการกลั่นแบบไพลกลับเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งถ่านที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่ 1971 mg/g จึงเลือกสภาวะนี้เป็นสภาวะการเตรียมที่ดีที่สุด เนื่องจาก ให้ค่าการดูดซับไอโอดีนที่สูงและใช้เวลาการกระตุ้นไม่นาน จึงเป็นการประหยัดพลังงาน

2. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง ด้วยการหาค่าการดูดซับไอโอดีน ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง พบว่า ที่สภาวะการเตรียมถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่เหมาะสม จะได้ถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงที่ 1971 mg/g มีความชื้น ปริมาณเถ้า และปริมาณสารระเหยได้ ไม่สูงมากนัก ที่ 3.9%, 3.1% และ 9.4% ตามลำดับ ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงถึง 92.7% ซึ่งถือได้ว่า ถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่เตรียมได้มีความเป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง นอกจากนี้ ยังมีหมู่ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกับถ่านการค้าและมีสัณฐานวิทยาที่มีความเป็นรูพรุนสูงอีกด้วย

3. ออกแบบชุดเครื่องมือสำหรับกระบวนการดูดซับสารละลายลิกลินินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้ง โดยกำหนดรูปแบบถังดูดซับให้มีรูปทรงกระบอกจากสมการ อัตราการไหลเท่ากับปริมาตรต่อพื้นที่ ($Q = V/A$) มีระบบการไหลผ่านของน้ำทิ้งตามหลักการของแรงโน้มถ่วงของโลก คือมีการไหลของน้ำเป็นแบบไหลลง ผ่านระบบชั้นผงถ่านกัมมันต์ที่ถูกยึดติดอยู่กับที่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm ผลิตจากแก้ว ซึ่งสามารถบรรจุถ่านกัมมันต์แบบแพ็คคอลัมน์ (packed column) ในปริมาณไม่น้อยกว่า 12 กรัม และป้อนน้ำทิ้งเข้าไปในคอลัมน์ได้ปริมาตรไม่น้อยกว่า 18 mL โดยมีอัตราการไหลของน้ำทิ้งไม่ต่ำกว่า 6 mL/min

4. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายลิกลินินในน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยถ่านกัมมันต์ไผ่ตงลิ้มแล้งที่ผลิตได้ โดยแปรปริมาณถ่านกัมมันต์ 0-1.0 กรัม แปรความเข้มข้นสารละลายลิกลินินเริ่มต้น 0-100 mg/L แปรค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายลิกลินิน (pH) ที่ 4-7 และแปรระยะเวลาในการดูดซับในช่วง 0-180 นาที ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า การใช้ปริมาณถ่าน 0.25 กรัม มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกลินิน 60 ppm ดูดซับสารละลายลิกลินินที่ pH 4 ที่ระยะเวลา 60 นาที มีการดูดซับสารละลายลิกลินินได้ 23 มิลลิกรัมของลิกลินินต่อกรัมถ่าน คิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับลิกลินิน 50% อีกทั้ง เมื่อวัดแถบสีของสารละลายลิกลินินก่อนและหลังการดูดซับ พบว่า การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงลิ้มแล้งสามารถลดค่าสีน้ำทิ้งได้ 100% นอกจากนี้ ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายลิกลินิน ด้วยถ่านกัมมันต์จากไผ่ตงลิ้มแล้ง

สอดคล้องตามสมการของแลงเมียร์ เนื่องจาก มีค่าความเป็นเชิงเส้นมากกว่า (R^2 สูงกว่า) สมการของฟรุนดลิชด์ หรืออาจกล่าวได้ว่า เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

ข้อเสนอแนะ

1. ควรเปรียบเทียบวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ เช่น conventional thermal method, microwave radiation, ultrasonic ร่วมกับการกระตุ้นถ่านด้วยกรด
2. ควรศึกษาปัจจัย เช่น ค่า COD, BOD ของน้ำทิ้งจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมด้วย

บรรณานุกรม

- เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์. (2547). วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 5. เอส.อาร์.พรินติ้ง แมสโปรดักส์ จำกัด: มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ชุรภา ชีรภัทรสกุล. (2008). ความสำเร็จในการใช้เอนไซม์ย่อยลิกนินชนิดใหม่จากเห็ดราในประเทศไทยในการกำจัดสีย้อมเป็นพิษในน้ำ. *For Quality*, 15 (132): 118-119.
- ณัฐยา พุนสุวรรณ. (2545). การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา.
- ธราพงษ์ วิทิตสานต์. (2554). ถ่านกัมมันต์: การผลิตและการนำไปใช้. พิมพ์ครั้งที่ 2. หจก. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก. (2552). มหัทศจรยพันธุ์ไผ่ 61 สายพันธุ์. เรียบเรียงโดย เกรียงไกร ไทยอ่อน. หจก. ธรรมชาติการพิมพ์: สำนักพิมพ์ ศูนย์เผยแพร่ความรู้ทางการเกษตร.
- ปรินทร เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตงและไผ่หมาจู. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2540. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 80 หน้า.
- เสถียรพงษ์ อุดมศิลป์ และ พูนสุข ประเสริฐสรรพ. (2552). การแยกน้ำมันและของแข็งออกจากน้ำทิ้งของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์และเอนไซม์. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 หน้า 125-134.
- Ahmad, A.A., and Hameed, B.H. (2009). Reduction of COD and color of dyeing effluent from a cotton textile mill by adsorption onto bamboo-based activated carbon, *Journal of Hazardous Materials*, 172: 1538–1543.
- Andersson, K.I., Eriksson, M., and Norgren, M. (2011: a). Removal of lignin from wastewater generated by mechanical pulping using activated charcoal and fly ash: adsorption isotherms and thermodynamics. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50: 7722–7732.
- Andersson, K.I., Eriksson, M., and Norgren, M. (2011: b). Removal of lignin from wastewater generated by mechanical pulping using activated charcoal and fly ash: adsorption kinetics. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50: 7733–7739.
- Andersson, K.I., Eriksson, M., and Norgren, M. (2012). Lignin removal by adsorption to fly ash in wastewater generated by mechanical pulping. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51: 3444–3451.
- Barker, T.W., and Worgan, J.T. (1981). The utilization of palm oil processing effluent as substrate of microbial protein by the fungus *Aspergillus oryzae*. *Eur. J. Appl. Microbiol.*, 11: 234-240.
- Donohue, M.D., and Aranovich, G.L. (1998). Classification of Gibbs adsorption isotherms. *Advances in Colloid and Interface Science*, 76-77: 137-152.
- Foo, K.Y., and Hameed, B.H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of Hazardous Materials*, 171 (1–3): 54–60.

Gonzalez, P.G., and Pliego-Cuervo, Y.B. (2013). Physicochemical and microtextural characterization of activated carbons produced from water steam activation of three bamboo species, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 99: 32–39.

Gütsch, J.S., and Sixta, H. (2012). Regeneration of spent activated charcoals used for lignin removal from Prehydrolysis-Kraft Prehydrolyzates. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51: 8624–8630.

Laemsak, N., and Kungsuwan, K. (2000). Manufacture and properties of binderless board from *Dendrocalamus Asper Backer*. In: *Bamboo 2000 International Symposium*.

Montané, D., Nabarlitz, D., Martorell, A., Torne-Fernández, V., and Fierro, V. (2006). Removal of lignin and associated impurities from Xylo-oligosaccharides by activated carbon adsorption, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45: 2294-2302.

Ramos, L.P., Mathias, A.L., Silva, F.T., Cotrim, A.R., Ferraz, A.L., and Chen, C.L. (1999). Characterization of residual lignin after SO₂-catalyzed steam explosion and enzymatic hydrolysis of *Eucalyptus viminalis* wood chips. *J. Agric. Food Chem.*, 47: 2295-2302.

Song, X., Zhang, Y., Yan, C., Jiang, W., and Chang, C. (2013). The Langmuir monolayer adsorption model of organic matter into effective pores in activated carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, 389: 213–219.

Sumathi, S., Chai, S.P., and Mohamed, A.R. (2008). Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 2404-2421.

Torrades, F., Saiz, S., Garcia-Hortal, J.A., and Garcia-Montano. (2008). Degradation of wheat straw black liquor by Fenton and Photo-Fenton processes. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*, 25: 92-98.

Wang, L-G., and Yan, G-B. (2011). Adsorptive removal of direct yellow 161 dye from aqueous solution using bamboo charcoals activated with different chemicals, *Desalination*, 274: 81–90.

ภาคผนวก

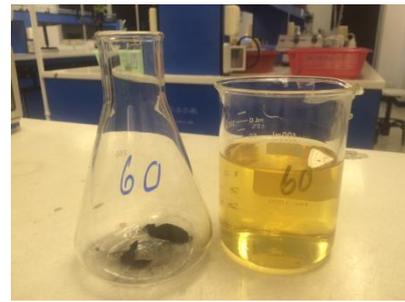
ก. วิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer มีลำดับขั้นตอน ดังนี้

1. เอาผ้าคลุมเครื่อง UV-visible และถอดดูความชื้นออกจากเครื่อง
2. เปิดคอมพิวเตอร์และเปิดสวิทช์เครื่อง UV-visible
3. เข้าโปรแกรม (UV Probe-[Spectrum]) และเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เลือก PC Ctrl กดที่เครื่อง UV-visible (F1-F4) กด Connect ที่คอมพิวเตอร์
4. หา λ_{max} โดยเลือก window → Spectrum
 - 4.1 กำหนด Condition ในการวิเคราะห์ เลือก Edit → Method ขึ้นหน้า Measurement → เลือกความยาวคลื่น → Repeat (Repetition: 2 และ Time Interval: 5 sec)
 - 4.2 เลือก Sample Preparation
 - 4.3 เลือก Instrument parameters → measured mode: Absorbance
 - 4.4 Attachments: 6-Call
 - 4.5 ใส่ Blank ในช่องสารช่องในสุดและใส่ตัวอย่างช่องแรกสุดที่แสงผ่าน → Baseline → ใส่ตัวอย่างตัวต่อไป → Start → ปรับแกน X,Y → Peak pick
5. หาความเข้มข้นของสาร เลือก window → Photometric
 - 5.1 กำหนด Condition ในการวิเคราะห์ เลือก Edit → Method → Wavelength Type : Point → Wavelength (nm) : 285.4 → Type multi point : Calibration → Fixed wavelength (mg/L) → WL1 : 284.5 → เลือก Parameter : Ab, $f(\text{cons}) \cdot \text{conc} = f(\text{Abs})$ → กด Next เพื่อดำเนินการต่อ
 - 5.2 ใส่ตัวอย่างตัวที่ 1 → กด Auto Zero → Read Std. → Yes → ใส่ตัวอย่างตัวที่ 2 → Read
 - 5.3 ค่า R_2 → กด Graph → Standard curve statistics (คลิกในช่อง Equation และ Correlation coefficient)
6. ขั้นตอนการปิดเครื่อง UV-visible spectrophotometer กระทำโดย กด Disconnect (ตัดระบบ) → นำตัวอย่างออกจากเครื่อง UV-visible → Mode → ใส่ดูความชื้น → พับหน้าจอของเครื่อง UV-visible ทั้งสองอัน → ถอดปลั๊ก → คลุมผ้า

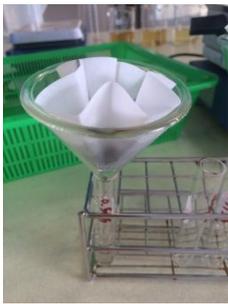
ข. วิธีการดูดซับสารละลายลิกนินด้วยถ่านกัมมันต์ไฟตงลิ้มแล้ง มีลำดับขั้นตอน ดังนี้



เตรียมสารละลายลิกนินที่ความเข้มข้น 10-100 ppm



ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ 0.25-1.0 g



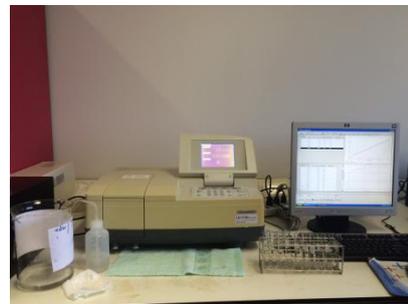
กรองสารละลายหลังจากการดูดซับสิ้นสุด



ดูดซับสารละลายลิกนินที่ระยะเวลา 0-180 min



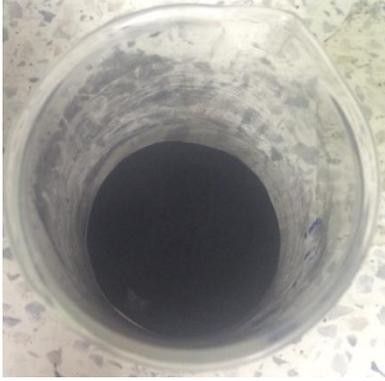
ลำดับสารละลายที่ผ่านการกรองที่สภาวะต่างๆ



วิเคราะห์ความเข้มข้นที่เหลือด้วย UV-visible spectrophotometer

รูปที่ 32 ขั้นตอนการดูดซับสารละลายลิกนินด้วยถ่านกัมมันต์ไฟตงลิ้มแล้ง

ค. ลักษณะของถ่านกัมมันต์ไฟตงสีมแล้งที่เตรียมได้



(a)



(b)

รูปที่ 33 ลักษณะของถ่านกัมมันต์ไฟตงสีมแล้งที่เตรียมได้ (a) ผงถ่าน (b) ถ่านอัดเม็ด