

การดูดซับแบบแบตซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดสารไตรโคลซาน
โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

A BATCH AND PULSED BED COLUMN ADSORPTION FOR
TRICLOSAN REMOVAL BY USING ACTIVATED CARBON
PRODUCED FROM MACADAMIA NUT SHELL



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Industrial Systems and Environmental Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดสารไตรโคลซาน
โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



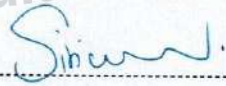
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)
ประธานกรรมการ

๑๑

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยัมรัตน์บวร)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

ศุภรณ์ จันทร์ภิรมณ์

(อาจารย์ ดร.ศุภรณ์ จันทร์ภิรมณ์)
กรรมการ



(ดร.ศิริวรรณ ณะวงษ์)
กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มนัญญา พะไลไผ่ : การดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดสารไตรโคลซาน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (A BATCH AND PULSED BED COLUMN ADSORPTION FOR TRICLOSAN REMOVAL BY USING ACTIVATED CARBON PRODUCED FROM MACADAMIA NUT SHELL)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร, 218 หน้า.

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์/กะลาแมคคาเดเมีย/สารไตรโคลซาน/การดูดซับแบบคอลัมน์/
อายุการใช้งานของคอลัมน์

สารไตรโคลซาน (Triclosan) มีคุณสมบัติเป็นสารต่อต้านแบคทีเรียที่พบในผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล สามารถกำจัดสารไตรโคลซานออกจากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมได้ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยไม่เกิดผลพลอยได้ที่เป็นพิษ กระบวนการดูดซับในอุตสาหกรรมมักนิยมใช้การดูดซับแบบคอลัมน์ แต่พบว่ามีปัญหาการอุดตัน ทำให้ต้องใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานแบบแบดซ์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC) และศึกษาการดูดซับแบบ Pulsed bed column เพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับแบบแบดซ์ คือ ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 780 นาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชเท่ากับ 2 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 119.05 มิลลิกรัมต่อกรัม และผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 10 เซนติเมตร มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 34.94 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีระยะเวลาหมดสภาพเท่ากับ 1,950 นาที ในขณะที่การดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับเท่ากับ 6 เซนติเมตร สามารถยืดอายุการใช้งานคอลัมน์ได้นานเท่ากับ 5,280 นาที และเพิ่มความความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม และผลการศึกษาการอุดตันด้วยเทคนิค XTM สนับสนุนการดูดซับแบบ Pulsed bed column ทำให้เพิ่มระยะเวลาการดูดซับยาวนานขึ้น และมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาที่พบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซานในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคลได้

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา มนัญญา พะไลไผ่
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จ.น.

MANANYA PHALAIPIHAI : A BATCH AND PULSED BED COLUMN ADSORPTION FOR TRICLOSAN REMOVAL BY USING ACTIVATED CARBON PRODUCED FROM MACADAMIA NUT SHELL.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 218 pp.

Keywords : ACTIVATED CARBON/MACADAMIA NUT SHELL/TRICLOSAN/ COLUMN ADSORPTION/LIFESPAN OF COLUMN

Triclosan (TCS), an antibacterial agent frequently used in personal care products, can be effectively removed from industrial wastewater through adsorption processes without generating toxic by-products. Column adsorption is commonly used for industrial applications; however, this method often faces clogging issues, resulting in the need for large quantities of activated carbon. This study investigated the conditions affecting TCS adsorption in a batch system using activated carbon derived from macadamia nut shells (MAC) and using a pulsed bed column to enhance the lifespan and adsorption efficiency of MAC. The optimal conditions for batch adsorption were contact time 780 min, initial TCS concentration 20 mg/L, agitation speed 150 rpm, adsorption temperature 45 °C, and pH 2. Under these conditions, the maximum adsorption capacity was 119.05 mg/g. The fixed bed column operation at a flow rate of 10 mL/min, TCS initial concentration of 60 mg/L and bed column height at 10 cm gave the highest adsorption capacity of 34.94 mg/g, with an exhaustion time of 1,950 minutes. By contrast, the pulsed bed column involving the removal of only 6 cm had an extended lifespan of 5,280 min and increased the adsorption capacity to 62.60 mg/g. The XTM analysis on clogging conditions confirmed that pulsed bed column adsorption significantly improved the longevity and efficiency of TCS removal using activated carbon derived from MAC. These findings demonstrated that MAC-derived carbon was a viable and effective adsorbent for TCS removal from wastewater generated by the personal care product industry.

School of Environmental Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature พญ.ณัฐพร น.ใจดี
Advisor's Signature Jareeya Yimrattanabovorn

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และความกรุณาเป็นอย่างสูงจากท่านรองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ให้ความรู้ ข้อชี้แนะ ดูแลเอาใจใส่ ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์ และ ดร.ศิริวรรณ ณะวงษ์ ที่สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตลอดจนข้อคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณ ดร.ภักคนันท์ ภักวินิตย์ และคณะเจ้าหน้าที่ประจำระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลอง XTM beamline (BL 1.2W: X-ray Tomographic Microscopy) และขอขอบพระคุณ ดร.ศิริวรรณ ณะวงษ์ และคณะเจ้าหน้าที่ประจำระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลอง IR beamline (BL4.1: Infrared Spectroscopy and Imagine) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา ที่ได้ให้การฝึกสอนใช้เครื่องมือคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และการอำนวยความสะดวกให้ความช่วยเหลือตลอดจนการศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่เป็นแหล่งบ่มเพาะให้การศึกษาและให้ทุนการศึกษาในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

และที่ขาดเสียไม่ได้ สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นพิเศษสำหรับความห่วงใยและกำลังใจจากบิดา นายประกิต พะไลไผ่ และมารดา นางสมร พะไลไผ่ และครอบครัว ที่อบรมเลี้ยงดู เป็นกำลังใจสำคัญ ส่งเสริมการศึกษา และสนับสนุนด้านการเงินในการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณนักศึกษาระดับบัณฑิตวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลเสมอมาจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จ

มณัญญา พะไลไผ่

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 4 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา..... | 4 |
| 1.4 สมมติฐานงานวิจัย..... | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 2 ปรัชญารรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 สารไตรโคลซาน (Triclosan)..... | 5 |
| 2.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติของสารไตรโคลซาน..... | 5 |
| 2.1.2 แหล่งที่พบสารไตรโคลซาน..... | 8 |
| 2.1.3 ผลกระทบของสารไตรโคลซาน..... | 10 |
| 2.2 รูปของสารไตรโคลซานที่พบในน้ำเสีย และความเป็นพิษ..... | 12 |
| 2.2.1 กลไกทางชีวภาพ..... | 12 |
| 2.2.2 กลไกการเปลี่ยนแปลงโดยค่าพีเอช..... | 13 |
| 2.2.3 กลไกการเปลี่ยนแปลงโดยแสง..... | 14 |
| 2.2.4 กลไกการเกิดสารไดออกซิน..... | 15 |
| 2.3 เทคโนโลยีการกำจัดสารไตรโคลซานในปัจจุบัน..... | 16 |
| 2.3.1 กระบวนการดูดซับ..... | 16 |
| 2.3.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง..... | 16 |
| 2.3.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ..... | 17 |
| 2.3.4 เปรียบเทียบข้อดี และข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยี..... | 17 |
| 2.4 กะลาแมคคาเดเมีย (Macadamia nut shell)..... | 19 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า | |
|-------|--|----|
| 2.4.1 | ลักษณะทางพฤกษศาสตร์กะลาแมคคาเดเมีย..... | 19 |
| 2.4.2 | การนำกะลาแมคคาเดเมียผลิตเป็นถ่านกัมมันต์..... | 20 |
| 2.5 | การดูดซับ (Adsorption)..... | 21 |
| 2.5.1 | กลไกการดูดซับ..... | 21 |
| 2.5.2 | ประเภทของการดูดซับ..... | 22 |
| 2.5.3 | ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ..... | 23 |
| 2.5.4 | สมดุลการดูดซับ..... | 24 |
| 2.5.5 | อุณหพลศาสตร์การดูดซับ (Thermodynamics)..... | 26 |
| 2.5.6 | จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetics)..... | 27 |
| 2.5.7 | ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Isotherm adsorption)..... | 27 |
| 2.6 | การดูดซับแบบคอลัมน์ (Column adsorption)..... | 30 |
| 2.6.1 | การดูดซับแบบ Fixed bed column..... | 30 |
| 2.6.2 | การดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 31 |
| 2.6.3 | การทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลอง..... | 32 |
| 2.7 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 33 |
| 2.7.1 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถ่านกัมมันต์กะลาแมคคาเดเมีย..... | 33 |
| 2.7.2 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ..... | 34 |
| 2.7.3 | งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแบบคอลัมน์..... | 35 |
| 2.7.4 | สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 36 |
| 3 | วิธีดำเนินการวิจัย..... | 37 |
| 3.1 | สถานที่ทำการศึกษาวิจัย..... | 37 |
| 3.2 | ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย..... | 37 |
| 3.3 | วิธีการศึกษาวิจัย..... | 37 |
| 3.4 | รายละเอียดขั้นตอนการศึกษา..... | 37 |
| 3.4.1 | การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย..... | 37 |
| 3.4.2 | การเตรียมสารละลายไตรโคลซาน..... | 40 |
| 3.4.3 | การศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบการดูดซับแบบแบดซ์..... | 43 |
| 3.4.4 | การศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์..... | 51 |
| 3.5 | การศึกษาสภาพการอุดตันของถ่าน MAC ที่ใช้ในการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 56 |
| 3.6 | การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่าน MAC..... | 57 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.6.1 | การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค BET analysis... | 58 |
| 3.6.2 | การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM... | 58 |
| 3.6.3 | การวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์..... | 59 |
| 3.6.4 | การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FTIR..... | 59 |
| 3.6.5 | การวิเคราะห์การดูดซับบนพื้นผิวโดยเครื่อง XTM..... | 60 |
| 3.7 | การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา..... | 60 |
| 3.7.1 | การวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซาน..... | 60 |
| 3.7.2 | การวิเคราะห์ข้อมูลผลของอุณหภูมิศาสตร์ของการดูดซับ..... | 60 |
| 3.7.3 | การวิเคราะห์ข้อมูลผลของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ..... | 61 |
| 3.7.4 | การวิเคราะห์ผลของค่าความสามารถในการดูดซับด้วยไอโซเทอร์ม ของ Langmuir และ Freundlich model..... | 62 |
| 3.7.5 | การวิเคราะห์ข้อมูลผลศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบ คอลัมน์..... | 62 |
| 3.7.6 | การทำนายเส้นโค้งการดูดซับของแบบจำลองโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model)..... | 64 |
| 4 | ผลการศึกษา..... | 66 |
| 4.1 | ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย..... | 66 |
| 4.1.1 | ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค BET..... | 66 |
| 4.1.2 | ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM..... | 67 |
| 4.1.3 | ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค XTM..... | 69 |
| 4.1.4 | ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค FTIR..... | 72 |
| 4.1.5 | ผลการศึกษาค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์..... | 74 |
| 4.2 | การศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์..... | 75 |
| 4.2.1 | ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 75 |
| 4.2.2 | ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ..... | 91 |
| 4.2.3 | ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ..... | 93 |
| 4.2.4 | ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 95 |
| 4.2.5 | การจัดกลุ่มความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค HCA (Hierarchical Cluster Analysis)..... | 102 |
| 4.3 | การศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์..... | 105 |
| 4.3.1 | ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column..... | 105 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------------|
| 4.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 117 |
| 4.4 ผลการศึกษาสภาพการดูดซับบนถ่าน MAC ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 124 |
| 4.4.1 ผลการดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC เมื่อมีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น..... | 124 |
| 4.4.2 ผลการดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของคอลัมน์..... | 129 |
| 4.5 การนำผลการศึกษาคอลัมน์แบบ Pulsed bed column มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซานในอุตสาหกรรม..... | 133 |
| 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ..... | 139 |
| 5.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ที่ใช้ในการศึกษา..... | 139 |
| 5.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์..... | 139 |
| 5.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 139 |
| 5.2.2 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 139 |
| 5.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 140 |
| 5.2.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 140 |
| 5.2.5 ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 140 |
| 5.3 ผลการศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์..... | 140 |
| 5.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column..... | 140 |
| 5.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 141 |
| 5.4 ผลการศึกษาสภาพการดูดซับบนถ่าน MAC ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 141 |
| 5.5 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย..... | 141 |
| รายการอ้างอิง..... | 142 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก รายละเอียดการคำนวณการดูดซับแบบแบดซ์..... | 156 |
| ภาคผนวก ข รายละเอียดการคำนวณการดูดซับแบบคอลัมน์..... | 161 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 168 |
| ภาคผนวก ง ข้อมูลผลการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบ Fixed bed column..... | 171 |
| ภาคผนวก จ ข้อมูลผลการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบ Pulsed bed column..... | 184 |
| ภาคผนวก ฉ บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 194 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 218 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| 2.1 | คุณสมบัติของสารไตรโคลซาน..... 7 |
| 2.2 | แหล่งที่พบสารไตรโคลซาน และความเข้มข้น..... 9 |
| 2.3 | ความเป็นพิษของสารไตรโคลซานต่อมนุษย์..... 11 |
| 2.4 | เปรียบเทียบข้อดี และข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยี..... 18 |
| 2.5 | คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกษลาแมคคาเดเมีย..... 20 |
| 2.6 | เปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี..... 22 |
| 3.1 | ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC จากงานวิจัยของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563)..... 39 |
| 3.2 | เปรียบเทียบความยาวคลื่นที่เหมาะสมโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer กับงานวิจัยที่ผ่านมา..... 43 |
| 3.3 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส..... 45 |
| 3.4 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น..... 46 |
| 3.5 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเร็วรอบการกวน..... 46 |
| 3.6 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของการดูดซับ..... 47 |
| 3.7 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอช..... 48 |
| 3.8 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซาน..... 48 |
| 3.9 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... 50 |
| 3.10 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column..... 53 |
| 3.11 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อการดูดซับของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column..... 54 |
| 3.12 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความสูงชั้นสารดูดซับต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column..... 55 |
| 3.13 | สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาสูงการชักกลับของถ่าน MAC ต่อการดูดซับ สารไตรโคลซานแบบ Pulsed bed column..... 56 |
| 4.1 | ผลการศึกษาคู่สมบัติทางกายภาพของถ่าน MAC หลังถูกระตุ่น..... 67 |
| 4.2 | ผลการศึกษาปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC ก่อนดูดซับด้วยเทคนิค XTM..... 70 |
| 4.3 | ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน MAC ก่อนดูดซับด้วยเทคนิค FTIR..... 73 |
| 4.4 | ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... 77 |
| 4.5 | ผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับของถ่าน MAC..... 79 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 4.6 | ผลของความเร็วยวรอบการกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....81 |
| 4.7 | ผลของอุณหภูมิของการดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....83 |
| 4.8 | ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....85 |
| 4.9 | ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน MAC ก่อนดูดซับและหลังดูดซับสารไตรโคลซาน ด้วยเทคนิค FTIR.....89 |
| 4.10 | เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....92 |
| 4.11 | ค่าคงที่ของอัตราเร็วการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....93 |
| 4.12 | ค่าคงที่และค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยใช้สมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich.....95 |
| 4.13 | ผลการจำแนกกลุ่มถ่าน MAC ก่อนและหลังดูดซับสารไตรโคลซานด้วยเทคนิค HCA.....104 |
| 4.14 | ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในการดูดซับแบบ Fixed bed column.....107 |
| 4.15 | ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของ ถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นในการดูดซับแบบ Fixed bed column.....109 |
| 4.16 | ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของ ถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column.....111 |
| 4.17 | ค่าคงที่การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC จากการดูดซับแบบ Fixed bed column ด้วยแบบจำลองของโทมัส.....113 |
| 4.18 | ค่าคงที่การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC จากการดูดซับแบบ Fixed bed column ด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน.....116 |
| 4.19 | ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร.....119 |
| 4.20 | ปริมาณรุกรุนของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการดูดซับ.....126 |
| 4.21 | ปริมาณรุกรุนของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงชั้นถ่าน MAC.....130 |
| 4.22 | โจทย์ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการ Scaling-up.....133 |
| 4.23 | รายละเอียดผลการศึกษากำจัดสารไตรโคลซานสำหรับประยุกต์ใช้ในการ Scaling-up คอลัมน์ดูดซับ.....133 |
| 4.24 | สรุปผลการกำจัดสารไตรโคลซานในคอลัมน์ (Pilot scale).....136 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | โครงสร้างทางเคมีของ (ก) สารไตรโคลซาน, (ข) หมู่ฟังก์ชันฟีนอล และ (ค) หมู่ฟังก์ชันอีเทอร์..... | 6 |
| 2.2 | เส้นทางการรับสารไตรโคลซานเข้าสู่ร่างกายมนุษย์..... | 10 |
| 2.3 | เส้นทางการปนเปื้อนสารไตรโคลซานสู่สิ่งแวดล้อม..... | 12 |
| 2.4 | กลไกการทำลายโครงสร้างสารไตรโคลซานเมื่อใช้เอนไซม์ของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย..... | 13 |
| 2.5 | กลไกการเปลี่ยนรูปของสารไตรโคลซานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช..... | 14 |
| 2.6 | กลไกการเปลี่ยนรูปของสารไตรโคลซานเมื่อถูกดัดแปลงแสงอาทิตย์..... | 14 |
| 2.7 | กลไกการเกิดสารไดออกซิน..... | 15 |
| 2.8 | กลไกการดูดซับสารไตรโคลซานบนพื้นผิวตัวดูดซับ SBH_F และ ACS_F | 16 |
| 2.9 | ผลแมคคาเดเมีย..... | 19 |
| 2.10 | กลไกการดูดติดผิว..... | 21 |
| 2.11 | ไอโซเทอร์มการดูดซับตามการแบ่งประเภทของ IUPAC..... | 25 |
| 2.12 | กราฟเชิงเส้นของ Langmuir isotherm..... | 28 |
| 2.13 | กราฟเชิงเส้นของ Freundlich isotherm..... | 29 |
| 2.14 | การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับในระบบ Fixed bed column แบบ Up-flow..... | 31 |
| 2.15 | Cycle ที่เกิดขึ้นจากการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 32 |
| 2.16 | ตัวอย่าง Cycle ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 36 |
| 3.1 | ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... | 38 |
| 3.2 | ขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์..... | 40 |
| 3.3 | เทคนิค Diazotization method..... | 41 |
| 3.4 | ผลการศึกษการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารไตรโคลซาน..... | 42 |
| 3.5 | กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นสารละลายไตรโคลซาน..... | 44 |
| 3.6 | ชุดทดลองการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบการดูดซับแบบแบดซ์..... | 44 |
| 3.7 | ชุดทดลองการศึกษากลไกการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 49 |
| 3.8 | ชุดทดลองการศึกษความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 50 |
| 3.9 | ชุดทดลองการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบการดูดซับแบบคอลัมน์..... | 51 |
| 3.10 | ชุดทดลองการดูดซับแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 53 |
| 3.11 | รายละเอียดชุดการทดลอง Pulsed bed column และจุดเก็บตัวอย่าง..... | 57 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 3.12 | ขั้นตอนการทดลองที่ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่าน MAC.....58 |
| 3.13 | การเตรียมตัวอย่างถ่าน MAC ที่ใช้ในการวิเคราะห์ FTIR แบบส่องผ่าน.....59 |
| 4.1 | สัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของ (ก)-(ค) ถ่านแมคคาเดเมียก่อนการกระตุ้น และ (ง)-(ฉ) ถ่าน MAC หลังผ่านการกระตุ้น.....69 |
| 4.2 | ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอรสามมิติของถ่าน MAC ก่อนดูดซับด้วยเทคนิค XTM.....70 |
| 4.3 | การจำแนกลักษณะของรูพรุนตามความพร้อมในการใช้งานของสภาพแวดล้อม โดยแก้ไขจาก IUPAC.....71 |
| 4.4 | ผลการศึกษา FTIR spectrum ของถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ.....73 |
| 4.5 | ผลการศึกษาค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ.....74 |
| 4.6 | แบบจำลองประจุที่พบบนพื้นผิวถ่าน MAC.....75 |
| 4.7 | ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....77 |
| 4.8 | ผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อการดูดซับของถ่าน MAC.....79 |
| 4.9 | ผลของความเร็วยวรอบการกวนต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....81 |
| 4.10 | ผลของอุณหภูมิของการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....83 |
| 4.11 | ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC.....85 |
| 4.12 | สัดส่วนของ Phenolic-TCS และ Phenolate-TCS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซาน.....87 |
| 4.13 | แบบจำลองการดูดซับสารไตรโคลซานที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวถ่าน MAC.....88 |
| 4.14 | หมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่าน MAC วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR.....90 |
| 4.15 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยถ่าน MAC.....92 |
| 4.16 | ผลของจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC (ก) อันดับหนึ่งเทียม และ (ข) อันดับสองเทียม.....94 |
| 4.17 | ผลของไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบ (ก) Langmuir isotherm และ (ข) Freundlich isotherm.....96 |
| 4.18 | ภาพ SEM ของถ่าน MAC ก่อนดูดซับที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 1,000 เท่า และถ่าน MAC หลังดูดซับที่กำลังขยาย (ค) 500 เท่า (ง) 1,000 เท่า.....99 |
| 4.19 | ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอรสามมิติของ (ก) ถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และหลังดูดซับที่ระยะเวลาการดูดซับ (ข) 870 นาที และ (ค) 1,770 นาที.....100 |
| 4.20 | ผลการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคของหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่าน MAC.....101 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.21 การจำแนกกลุ่มของค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานด้วยเทคนิค HCA..... | 104 |
| 4.22 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 107 |
| 4.23 ผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่าน MAC..... | 109 |
| 4.24 ผลของความสูงชั้นสารดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC... | 111 |
| 4.25 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล..... | 114 |
| 4.26 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น..... | 114 |
| 4.27 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงชั้นสารดูดซับ..... | 115 |
| 4.28 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 119 |
| 4.29 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 4 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 120 |
| 4.30 ผลของระยะความสูงของการชักกลับ 6 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สารไตรโคลซานของถ่าน MAC..... | 120 |
| 4.31 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณรุกรานของถ่าน MAC เมื่อระยะเวลาในการดูดซับ เพิ่มขึ้น..... | 126 |
| 4.32 แบบจำลองการเลื่อนตำแหน่งของถ่าน MAC ภายในคอลัมน์การดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่มีระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร..... | 127 |
| 4.33 ภาพสามมิติด้วยเทคนิค XTM ของถ่าน MAC ก่อนและหลังดูดซับที่ Cycle ต่าง ๆ ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column..... | 128 |
| 4.34 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณรุกรานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูง คอลัมน์..... | 130 |
| 4.35 ภาพสามมิติด้วยเทคนิค XTM ของถ่าน MAC ก่อนและหลังดูดซับที่ระดับความสูงของ คอลัมน์เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 เซนติเมตร ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column... | 131 |
| 4.36 การเวียนใช้ถ่านกัมมันต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ..... | 137 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สารไตรโคลซาน (Triclosan: 5-chloro-2-(2, 4-dichlorophenoxy)-phenol) เป็นสารเคมีสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวจนถึงสีขาวนวล ภายในโครงสร้างโมเลกุลเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่ฟีนอลและหมู่เอเทอร์ โดยแสดงคุณสมบัติในการต่อต้านแบคทีเรีย (องค์การอาหารและยา, 2561; Chen et al., 2023) จากการทบทวนงานวิจัยในปัจจุบันพบว่า สารไตรโคลซานถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่าร้อยละ 80 นิยมใช้สารไตรโคลซานผสมในผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล (Personal Care Products, PCPs) และเวชภัณฑ์ (Pharmaceutical products) ส่งผลทำให้พบสารไตรโคลซานปนเปื้อนในน้ำที่อุตสาหกรรมเป็นบริเวณกว้าง เช่น อุตสาหกรรมผลิตสารลดแรงตึงผิว (Ankesh et al., 2019) อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ซักล้างและซักล้าง (Procházková et al., 2022) และอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอางและเวชภัณฑ์ (Gkika et al., 2022) รวมถึงพบการปนเปื้อนสารไตรโคลซานในน้ำเสียชุมชน (Rusdiana et al., 2021; Sinicropi et al., 2022) สารไตรโคลซานที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งและแหล่งน้ำสาธารณะเป็นประเด็นที่ควรตระหนักถึง เพราะส่งผลทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิต เช่น สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบคลอรีนในน้ำประปาเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นสารคลอโรฟอร์มที่มีความเป็นพิษต่อผู้บริโภคได้ หรือเมื่อเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงจะส่งผลให้สารไตรโคลซานเปลี่ยนรูปเป็นสารไดออกซิน ซึ่งจัดเป็นสารก่อมะเร็ง นอกจากนี้พบว่าสารไตรโคลซานสามารถดูดซึมผ่านผิวหนังหรือเมื่อสูดดมเข้าสู่ร่างกายจะสามารถสะสมในชั้นไขมันของมนุษย์ได้ ส่งผลให้เกิดการระคายเคือง กล้ามเนื้ออ่อนล้า และเป็นส่วนหนึ่งของสาเหตุการเกิดมะเร็งในมนุษย์ เป็นต้น (Maynou et al., 2021; Chen et al., 2023) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์การระบาดของโรค COVID-19 ที่ประชากรโลกให้ความสนใจในด้านการทำความสะอาดและสุขอนามัยส่วนบุคคลมากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและเวชภัณฑ์มีบทบาทในชีวิตประจำวันของประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Mhlongo et al., 2023; Zhang et al., 2024) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นหาแนวทางในการกำจัดสารไตรโคลซานออกจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ และสามารถลดอัตราการเกิดสารผลพลอยได้ที่ไม่ต้องการ (By-product) เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซานในน้ำเสียหรือน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีหลากหลายกระบวนการ เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation processes) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพสามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้มากถึงร้อยละ 90 แต่ต้องใช้จุลินทรีย์ชนิดจำเพาะที่สามารถผลิตเอนไซม์ออกซิเจนเนสได้ แต่เนื่องจากสารไตรโคลซานมีโครงสร้าง

ทางเคมีค่อนข้างซับซ้อน ส่งผลทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้หมด และพบการสะสมสารไตรโคลซานในชั้นไขมันของเซลล์จุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบบำบัด ส่งผลกระทบเกิดการดื้อยาปฏิชีวนะต่อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ในดินบริเวณหลุมฝังกลบ (Dar et al., 2022) การย่อยสลายด้วยแสงเป็นวิธีการย่อยสลายทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นเองได้ง่าย แต่ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นจัดเป็นสารในกลุ่มสารไดออกซิน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสารไดออกซินและสารไตรโคลซานมีความใกล้เคียงกันมาก สารไดออกซินที่เกิดขึ้นนี้มีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง สามารถเกิดการสะสมได้ในมนุษย์และสัตว์น้ำ และมีความเป็นพิษมากกว่าสารไตรโคลซานที่เป็นสารตั้งต้น (Li et al., 2021) กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารไตรโคลซานได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง โดยการออกซิไดส์สารอินทรีย์ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจะส่งผลทำให้สารไตรโคลซานที่ปนเปื้อนในน้ำมีความเข้มข้นลดลงเพราะเกิดการเปลี่ยนรูป แต่ยังคงพบว่ามีรูปของผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้ที่ไม่ต้องการ และยังมีความเป็นพิษอยู่ ได้แก่ 2,4-Dichlorophenol, 4-Chloroanisol, 4-Chlorocatechol และ 4-Chlorophenol หากนำน้ำที่ปนเปื้อนสารไตรโคลซานหรือผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นเหล่านี้มาผลิตเป็นน้ำประปาและผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนจะได้ผลพลอยได้เป็นสารคลอโรฟอร์ม และสารไดออกซิน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Luo et al., 2019; Phuekphong et al., 2020)

ดังนั้น จึงควรมีเทคโนโลยีในการกำจัดสารไตรโคลซานให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ กระบวนการดูดซับจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ก่อให้เกิดผลพลอยได้ที่มีความเป็นพิษ (Sonia et al., 2020; Castillo et al., 2022) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสูง แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนในกระบวนการผลิตที่มีราคาสูง ส่งผลให้ภาระค่าใช้จ่ายในระบบบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาค่าใช้จ่ายของระบบบำบัด จึงมีงานศึกษาวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาหาตัวดูดซับทางธรรมชาติที่มีราคาถูก ทำการปรับปรุงลักษณะสมบัติของวัสดุเพื่อให้มีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี รวมถึงถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (Macadamia nut shell Activated Carbon, MAC) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำที่ได้จากของเสียทางเกษตร และแสดงให้เห็นว่าหลังปรับปรุงคุณภาพส่งผลให้ถ่าน MAC มีพื้นที่ผิวสูงและมีความคุ้มค่าในการใช้งาน (Wongcharee et al., 2018; Machedi et al., 2019) จากการศึกษาวิจัยของ วิมลนันท์ พงศ์ภัทรกานต์ และคณะ (2558) และ นุชจิรา ดีแจ่ม และคณะ (2560) พบว่ากะลาแมคคาเดเมียมีความแข็ง ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ และเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรที่มีปริมาณมากจึงมีการนำมาเพิ่มมูลค่าโดยผลิตเป็นถ่านกัมมันต์พบว่ามีความ Iodine number อยู่ในช่วง 825-855 มิลลิกรัมต่อกรัม และจากการศึกษาวิจัยของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) ได้นำกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นตัวดูดซับโดยใช้กระบวนการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ (มอก. 900-2547) และมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลสูงสุดเท่ากับ 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาดูดซับสารไตรโคลซานซึ่งมีองค์ประกอบเป็นหมู่ฟังก์ชันฟีนอล และเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารไตรโคลซานต่อไป ระบบ

การดูดซับแบบคอลัมน์จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างต่อเนื่อง และการดูแลรักษาระบบสามารถทำได้ง่าย (Mesfer et al., 2020; AL-Doury and Alwan, 2021) การดูดซับในคอลัมน์แบบ Fixed bed column สามารถรองรับน้ำเสียที่มีความสกปรกสูง และน้ำเสียจะสัมผัสกับตัวดูดซับได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากมีปริมาณตัวดูดซับในคอลัมน์เป็นจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามพบว่า มีข้อจำกัดด้านการอุดตันของตัวดูดซับ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพหรือค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่านตัวดูดซับ ปัญหาด้านการอุดตันในคอลัมน์ทำให้อายุการใช้งานของคอลัมน์ลดลง ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และสิ้นเปลืองปริมาณตัวดูดซับเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการดูดซับแบบ Fixed bed column จะต้องเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ทั้งหมดออกจากคอลัมน์ เมื่อประสิทธิภาพของระบบลดลง (Patel, 2019; Mesfer et al., 2020; Futralan and Wan, 2022) ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำข้อจำกัดของการดูดซับแบบ Fixed bed column มาพัฒนาเป็นการดูดซับในคอลัมน์แบบ Pulsed bed column ซึ่งมีข้อได้เปรียบด้านการลดปริมาณตัวดูดซับที่สูญเสียออกจากระบบโดยไม่จำเป็น สามารถนำเฉพาะตัวดูดซับที่อิ่มตัวแล้วบางส่วนออกจากระบบเพื่อเข้าสู่ระบบฟื้นฟูสภาพต่อไปได้ ในขณะที่ตัวดูดซับส่วนที่ยังไม่อิ่มตัวจะยังคงอยู่ในคอลัมน์ ทำให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้เต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเป็นการยืดอายุการใช้งานของตัวดูดซับในคอลัมน์ ดังนั้น คอลัมน์การดูดซับแบบ Pulsed bed column จึงเป็นระบบการดูดซับที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (บังอร อินทร์สูงเนิน, 2562; Patel, 2019; Plangklang and Sookkumnerd, 2023; Subair et al., 2024)

ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ผลิตมาจากของเสียทางการเกษตรสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซาน (TCS) ผ่านกระบวนการดูดซับแบบแบตช์ และแบบคอลัมน์ โดยมุ่งเน้นที่การดูดซับแบบ Pulsed bed column ซึ่งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของคอลัมน์ และยืดอายุการใช้งานของตัวดูดซับในคอลัมน์ ทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมจากการดูดซับแบบแบตช์ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น ความเร็วรอบการกวน อุณหภูมิการดูดซับ และค่าพีเอช เป็นต้น รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับ และไอโซเทอร์มการดูดซับ ซึ่งผลจากการศึกษาปัจจัยของการดูดซับแบบแบตช์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ ซึ่งในการศึกษาวิจัยได้ทำการศึกษาเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve ของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ ได้แก่ อัตราการไหล ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น และความสูงชั้นสารดูดซับ เพื่อนำมาใช้ในการทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัส และแบบจำลองของยูน-เนลสัน และนำผลการศึกษามาประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับแบบ Pulsed bed column เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารไตรโคลซาน นำไปสู่การยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น และมีการใช้ปริมาณตัวดูดซับลดลง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ในการทดลองแบบแบตช์ (Batch experimental)

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียสำหรับระบบการดูดซับแบบพัลส์ (Pulsed bed column)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียที่กระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอ้างอิงวิธีการกระตุ้นจากงานวิจัยของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563)

1.3.2 สารละลายไตรโคลซานถูกเตรียมขึ้นโดยอ้างอิงวิธีการเตรียมจากงานวิจัยของ Kaur et al. (2018)

1.3.3 ศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบการดูดซับแบบแบตช์ และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น ความเร็วรอบการกวน อุณหภูมิของการดูดซับ และค่าพีเอช เป็นต้น ทำการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ และจลนพลศาสตร์การดูดซับ

1.3.4 การทดลองระบบคอลัมน์การดูดซับแบบ Pulsed bed column ทำการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับ และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราการไหล ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น และระดับความสูงชั้นสารดูดซับ เป็นต้น

1.4 สมมติฐานงานวิจัย

การดูดซับแบบ Pulsed bed column โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียสามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับของคอลัมน์เพิ่มขึ้น และสามารถยืดอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ได้ยาวนานยิ่งขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์เพื่อใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซานออกจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารไตรโคลซาน

1.5.2 สามารถเพิ่มมูลค่าของถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียได้

1.5.3 สามารถลดอัตราการเกิดผลพลอยได้ที่มีความเป็นพิษจากกระบวนการบำบัดได้

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแหล่งที่มาของสารไตรโคลซานที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ รูปและความเป็นพิษของสารไตรโคลซาน เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซาน และการดูดซับแบบคอลัมน์ เป็นต้น มีรายละเอียดดังนี้

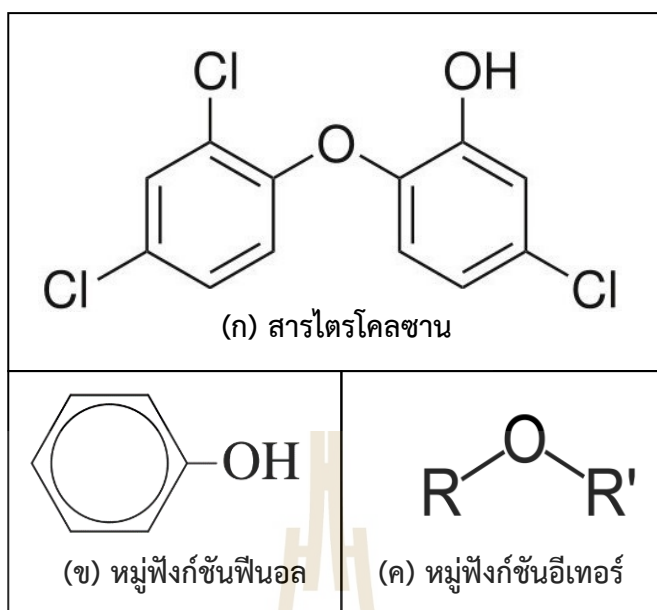
2.1 สารไตรโคลซาน (Triclosan)

สารไตรโคลซาน (Triclosan, TCS: 5-chloro-2-(2, 4-dichlorophenoxy)-phenol) ได้รับความจดทะเบียนครั้งแรกในปี พ.ศ. 2512 โดยสำนักงาน Environmental Protection Agency (EPA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในกลุ่ม "ยาฆ่าแมลง (Pesticide)" ต่อมาในปี พ.ศ. 2515 สารไตรโคลซานเริ่มถูกนำมาเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เวชภัณฑ์และดูแลส่วนบุคคล (Pharmaceutical and Personal Care Products, PPCPs) เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันฟีนอลและอีเทอร์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติในการต้านทานแบคทีเรียและเป็นที่ยอมรับในการใช้เป็น ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยเมื่อปี พ.ศ. 2560 องค์การ Food and Drug Administration (FDA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้เผยแพร่ประกาศเกี่ยวกับการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารไตรโคลซานทั้งด้านคุณสมบัติและพิษวิทยา พบว่าไตรโคลซานมีผลกระทบต่อการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยยับยั้งการทำงานของโปรตีนในแบคทีเรีย สามารถสะสมในร่างกายสิ่งมีชีวิตและมีผลต่อการทำงานของฮอร์โมนภายในร่างกายของมนุษย์ (EPA, 2008; FDA, 2008; Chen et al., 2023)

ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยมากมายที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารไตรโคลซาน เช่น ลักษณะและคุณสมบัติของสารไตรโคลซาน แหล่งที่พบ และผลกระทบที่เกิดขึ้น เป็นต้น รายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติของสารไตรโคลซาน

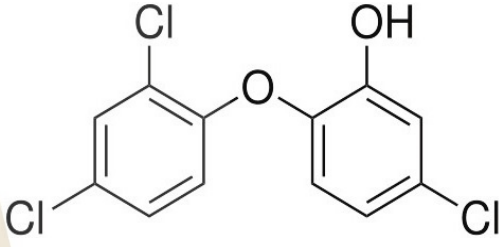
สารไตรโคลซานเป็นสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้น มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาว มีลักษณะ สัณฐานวิทยาเป็นของแข็ง เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีวงแหวนเบนซีนไม่อิ่มตัวจำนวน 2 วงแหวนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอีเทอร์ (Ether, R-O-R') ซึ่งเป็นวงแหวนอะโรมาติกของหมู่ฟังก์ชันฟีนอล (Phenol, R-OH) เชื่อมกับวงแหวนอะโรมาติกที่มีหมู่ฟังก์ชันอัลคิลฮาไลด์ (Alkyl-halide) ที่มีหมู่คลอโร (Chloro, Cl⁻) เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างนี้เรียกว่า Chlorinated aromatic compound โดยหมู่คลอโรจัดอยู่ในกลุ่มฮาโลเจนจะจับกับอะตอมคาร์บอน (Carbon, C⁺) ที่อยู่ในวงแหวนอะโรมาติกจำนวน 3 ตำแหน่ง แทนที่อะตอมไฮโดรเจน (Hydrogen, H⁺) โครงสร้างของสารไตรโคลซานแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันฟีนอลมีคุณสมบัติเด่นด้านการต่อต้านแบคทีเรีย (Antimicrobial) และทำให้สารไตรโคลซานมีกลิ่นจำเพาะของฟีนอลอ่อน ๆ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) สารไตรโคลซาน, (ข) หมู่ฟังก์ชันฟีนอล และ (ค) หมู่ฟังก์ชันอีเทอร์

สารไตรโคลซานมีสูตรโมเลกุลคือ $C_{12}H_7Cl_3O_2$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 289.546 กรัมต่อโมล รายละเอียดคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1 พบว่าสารไตรโคลซานสามารถเกิดการแตกตัวได้ง่ายที่ค่าพีเอชในช่วงเท่ากับ 7.80-8.14 (pK_a) เช่น เมื่อแหล่งน้ำมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 หรือสถานะต่าง ส่งผลทำให้สารไตรโคลซานอยู่ในรูป Phenolate-TCS เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันฟีนอลในโครงสร้างของสารไตรโคลซานจะสูญเสียอะตอมของไฮโดรเจน ส่งผลทำให้โมเลกุลสารเป็นประจุลบที่มีความเสถียรต่ำ และแตกตัวได้ง่าย ส่วนสารไตรโคลซานในสภาวะกรดจะอยู่ในรูป Phenolic-TCS ที่ไม่สูญเสียอะตอมของไฮโดรเจน และมีความเสถียรมากกว่าสถานะต่าง (EPA, 2008; FDA, 2008; Dhillon et al., 2015; Sonia et al., 2020) นอกจากนี้สารไตรโคลซานมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่งผลทำให้ละลายในน้ำได้ยาก แต่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอื่น ๆ เช่น อะซิโตน เอทานอล สารละลายไกลคอล น้ำมันมะกอก และน้ำมันละหุ่ง เป็นต้น (SCSS, 2010) สารไตรโคลซานมีค่าสัมประสิทธิ์ การกระจายตัวของสารในชั้นน้ำและชั้นออกทานอล (n-octanol/water partition coefficient, K_{ow}) เท่ากับ 4.76 แสดงว่าสามารถกระจายตัวได้ดีในชั้นออกทานอล ส่งผลทำให้สารไตรโคลซานสามารถซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และเกิดการสะสมในชั้นไขมันได้ (Chen et al., 2023) เมื่อสารไตรโคลซานได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ ส่งผลทำให้สารไตรโคลซานมีความเสถียรลดลง และเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นสารผลพลอยได้ที่มีความเป็นพิษสูง เช่น คลอโรฟอร์ม และไดออกซิน (Maynou et al., 2021) ดังนั้น โรงงานอุตสาหกรรมจึงนิยมเก็บและบรรจุสารไตรโคลซานไว้ในภาชนะปิดและทึบ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารไตรโคลซานกับแสง อีกทั้งนิยมจัดจำหน่ายในรูปของแข็งหรือผงผลึกมากกว่าในรูปสารละลาย เนื่องจากในรูปของแข็งจะเกิดปฏิกิริยาได้ยากกว่าในรูปสารละลาย

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของสารไตรโคลซาน

| หัวข้อ | อธิบาย |
|---|--|
| ชื่อสาร | Triclosan |
| ชื่อเรียก (ภาษาไทย) | สารไตรโคลซาน |
| ชื่อทางเคมี | 5-chloro-2-(2, 4-dichlorophenoxy)-phenol |
| ชื่อทางการค้า | Irgasan, Irgasan DP300, Irgacare MP, CH3565, Lexol 300, Cloxifenolum, Aquasept, Gamophen |
| โครงสร้างทางเคมี |  |
| สูตรโมเลกุล | $C_{12}H_7Cl_3O_2$ |
| น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล) | 289.546 |
| ลักษณะทางกายภาพ | ผงผลึก |
| สี | สีขาวจนถึงขาวนวล |
| ค่าการแตกตัว (pK_a) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส | 7.80 (Sonia et al., 2020), 7.90 (FDA, 2008) 8.14 (Dhillon et al., 2015, EPA, 2008) |
| จุดเดือด (องศาเซลเซียส) | 120 |
| จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส) | 55-57 |
| ความชอบน้ำ | ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) |
| ค่าการละลายน้ำ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (กรัมต่อลิตร) | 0.01 |
| ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสาร ในชั้นน้ำและชั้นออกทานอล (n-octanol/water partition coefficient, K_{ow}) | 4.76 |
| ความดันไอ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (มิลลิเมตรปรอท) | 4×10^{-6} |
| ค่าคงที่ของเฮนรี ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Henry constant, H_C) (เอทีเอ็มต่อโมล-ลูกบาศก์เมตร) | 1.5×10^{-7} |

2.1.2 แหล่งที่พบสารไตรโคลซาน

สารไตรโคลซานได้รับการยอมรับจากองค์การ Food and Drug Administration (FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกา ว่ามีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย และมีความปลอดภัยเมื่อถูกนำมาใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น ในผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคลและเวชภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นของสารไตรโคลซานอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1–0.3 (ร้อยละโดยมวล) จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ และยังคงปลอดภัยต่อร่างกายมนุษย์ (Yang et al., 2023; Chen et al., 2023)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารไตรโคลซานเป็นส่วนประกอบ พบผลิตภัณฑ์สบู่ที่มีฉลากระบุอย่างชัดเจนว่าได้ใช้สารไตรโคลซานเป็นส่วนผสมในสบู่ก้อน และสบู่เหลว ร้อยละ 1.2 และ 0.25 (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณสารไตรโคลซานสูงกว่าข้อกำหนด เนื่องมาจากปี พ.ศ. 2547 ยังมีการตระหนักความเป็นพิษของสารไตรโคลซานได้ไม่แพร่หลายเทียบเท่าในปัจจุบัน (พงษ์ศิริ วินิจฉัย และคณะ, 2547) จากการศึกษาวิจัยของ Cooper and Kosatsky (2019), Anders et al. (2021) และ Sinicropi et al. (2022) พบว่ามีสารไตรโคลซานเป็นส่วนผสมในยาสีฟันไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารไตรโคลซานสามารถลดการสะสมของเชื้อโรคในช่องปากได้ จึงถูกนำมาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ดูแลช่องปาก สามารถลดโรคฟันผุและโรคเหงือก มีฤทธิ์ตกค้างในช่องปากประมาณ 4-6 ชั่วโมง และมีระยะเวลาตกค้างยาวนานกว่าฟลูออไรด์ และจากผลการศึกษาวิจัยของ Orhan (2020) ได้นำสารไตรโคลซานมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผ้าเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียบนเสื้อผ้า พบว่า ผ้าโพลีเอสเตอร์+ผ้าคอนตอน+สารไตรโคลซานเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังถูกซักจำนวน 20 ครั้ง ภายใน 24 ชั่วโมง พบว่าสารไตรโคลซานสามารถลดอัตราการเกิดเชื้อ *E. Coli* บนเนื้อผ้าได้สูงถึงร้อยละ 70.99 ซึ่งผลการทดลองในการศึกษานี้สามารถยืนยันคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียของสารไตรโคลซานได้ดี แต่เป็นปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม เพราะแสดงให้เห็นว่าสารไตรโคลซานมีระยะเวลาตกค้างในสิ่งแวดล้อมยาวนาน

จากผลการสำรวจความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมของเมือง Gauteng (สาธารณรัฐแอฟริกาใต้) พบสารไตรโคลซานปนเปื้อนในปริมาณสูงในช่วงความเข้มข้น 2.01 ถึง 17.60 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เนื่องจากระบบบำบัดทางชีวภาพไม่สามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้หมด จึงพบสารไตรโคลซานปนเปื้อนในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.99 ถึง 13.00 มิลลิกรัมต่อลิตร (Lehutso et al., 2017) และในปี พ.ศ. 2563 โลกประสบปัญหาวิกฤตการณ์ COVID-19 พบว่ามีการใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดเพื่อการฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ส่งผลให้สารไตรโคลซานมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มขึ้น และยังคงพบสารไตรโคลซานปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล (Bakare and Adeyinka, 2022; Mhlongo et al., 2023; Zhang et al., 2024) สามารถจำแนกแหล่งที่พบการปนเปื้อนสารไตรโคลซานได้ 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ น้ำเสียอุตสาหกรรม และน้ำเสียชุมชน (Milanović et al., 2021) รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณสารไตรโคลซานที่พบในระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และน้ำเสียชุมชน ซึ่งเกิดมาจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ใช้กระบวนการทางชีวภาพในการบำบัด ส่งผลทำให้ไม่สามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้หมด

ตารางที่ 2.2 แหล่งที่พบสารไตรโคลซาน และความเข้มข้น

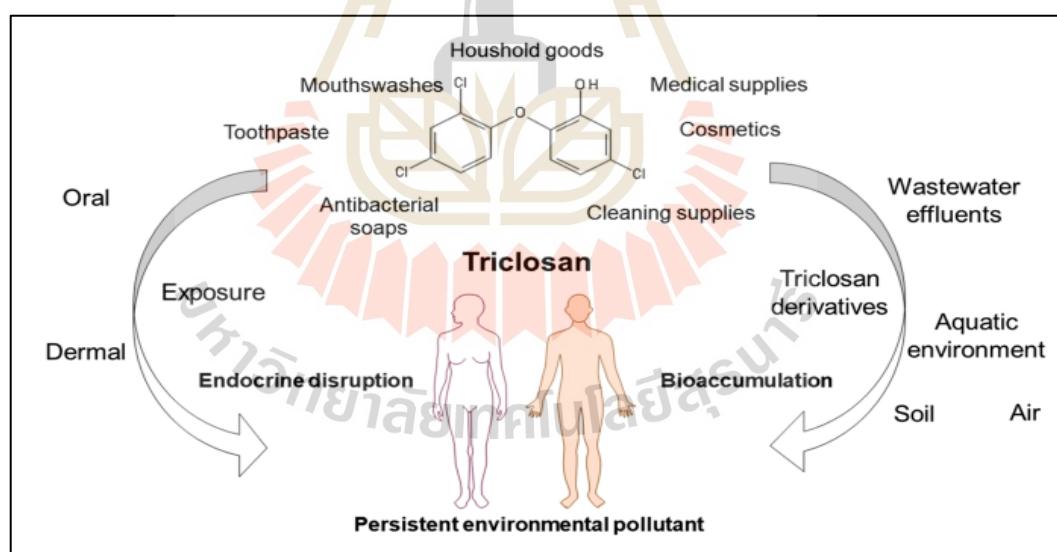
| แหล่งที่พบ | หน่วย | ความเข้มข้น สารไตรโคลซาน | อ้างอิง |
|---|------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Sewage treatment plants in USA | ไมโครกรัมต่อลิตร | 3.1-6.3 | Heidler and Halden (2007) |
| Sewage treatment plants in Australia | ไมโครกรัมต่อลิตร | 0.023-0.434 | Ying and Kookana (2007) |
| Chaleston, South Carolina (Southeast U.S. estuarine site), USA | ไมโครกรัมต่อลิตร | 2.8 | Fair et al. (2009) |
| The Indian River Lagoon, Florida (Southeast U.S. estuarine site), USA | ไมโครกรัมต่อลิตร | 3.4 | Fair et al. (2009) |
| WWTPs across Luxembourg, Germany | ไมโครกรัมต่อลิตร | 0.02-86.161 | SCSS (2010) |
| Sewage treatment plants in USA | ไมโครกรัมต่อลิตร | 0.245-86.2 | Bedoux et al. (2012) |
| WWTPs across Singapore | ไมโครกรัมต่อลิตร | 0.341-0.744 | Tran et al. (2016) |
| WWTPs across Gauteng, South Africa | มิลลิกรัมต่อลิตร | 2.01-17.60 | Lehutso et al. (2017) |
| 13 WWTPs across Canada | ไมโครกรัมต่อลิตร | 0.289-33.500 | Guerra et al. (2019) |
| WWTPs across Durban metropolis, KwaZulu-Natal, South Africa. | ไมโครกรัมต่อลิตร | 1.906-73.462 | Bakare and Adeyinka (2022) |
| WWTPs containing of triclosan | มิลลิกรัมต่อลิตร | 0.2 | Kaminska et al. (2022) |
| Municipal wastewater treatment plant in Ukkadam, India | มิลลิกรัมต่อลิตร | 0.07-0.18 | Kannan et al. (2022) |

2.1.3 ผลกระทบของสารไตรโคลซาน

สารไตรโคลซานเป็นสารเคมีที่สามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ ภายใต้สภาวะที่มีการสัมผัสแสงจะมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 41 นาที (Dhillon et al., 2015) และเมื่อสารไตรโคลซานถูกย่อยสลายภายใต้สภาวะไม่ใช้อากาศ จะตกค้างในสิ่งแวดล้อมยาวนานขึ้นมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 70 วัน เนื่องมาจากสารไตรโคลซานในสภาวะไม่ใช้อากาศมีความเสถียรมาก (Abbott et al., 2020) นอกจากนี้พบว่าสารไตรโคลซานมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในชั้นน้ำและชั้นออกทานอลเท่ากับ 4.76 ส่งผลให้สารไตรโคลซานสามารถสะสมในชั้นไขมัน และในของเหลวภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิต เช่น เลือด น้ำเหลือง ปัสสาวะ และน้ำนม เป็นต้น ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบภายในร่างกาย และทำลายระบบนิเวศของจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม

2.1.3.1 ผลกระทบต่อมนุษย์

สารไตรโคลซานสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ผ่านการดูดซึมทางผิวหนัง และทางช่องปาก ผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร และระบบไหลเวียนเลือด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การได้รับสารไตรโคลซานผ่านทางช่องปาก เช่น การดื่มน้ำ และการกินซึ่งเป็นกิจกรรมหลักในการรับสารไตรโคลซานเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ รวมถึงการสัมผัสน้ำประปา ถึงแม้ว่าสารไตรโคลซานมีคุณสมบัติระเหยได้ง่าย และไวต่อการทำปฏิกิริยากับแสง แต่ยังคงพบการปนเปื้อนสารไตรโคลซานในน้ำประปา และแหล่งน้ำธรรมชาติ (Olaniyan et al., 2016; Milanović et al., 2021)



รูปที่ 2.2 เส้นทางการรับสารไตรโคลซานเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ (Milanović et al., 2021)

จากการทบทวนงานวิจัยของ Bagley and Lin (2000) พบว่าเมื่อมนุษย์ได้รับสารไตรโคลซานผ่านทางช่องปากที่ระดับความเข้มข้น 13×10^{-6} โมลาร์ เมื่อเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง หลังจากได้รับสารไตรโคลซาน ตรวจพบการเพิ่มระดับความเข้มข้นสารไตรโคลซานในพลาสมาได้ถึง 0.84×10^{-6} โมลาร์ แสดงให้เห็นว่าสารไตรโคลซานสะสมและตกค้างภายในร่างกายมนุษย์ หากผู้ใหญ่หรือคนที่มียาลรวมร่างกายมากได้รับสารไตรโคลซานจะไม่เกิดความเป็นพิษเฉียบพลัน เพราะมี

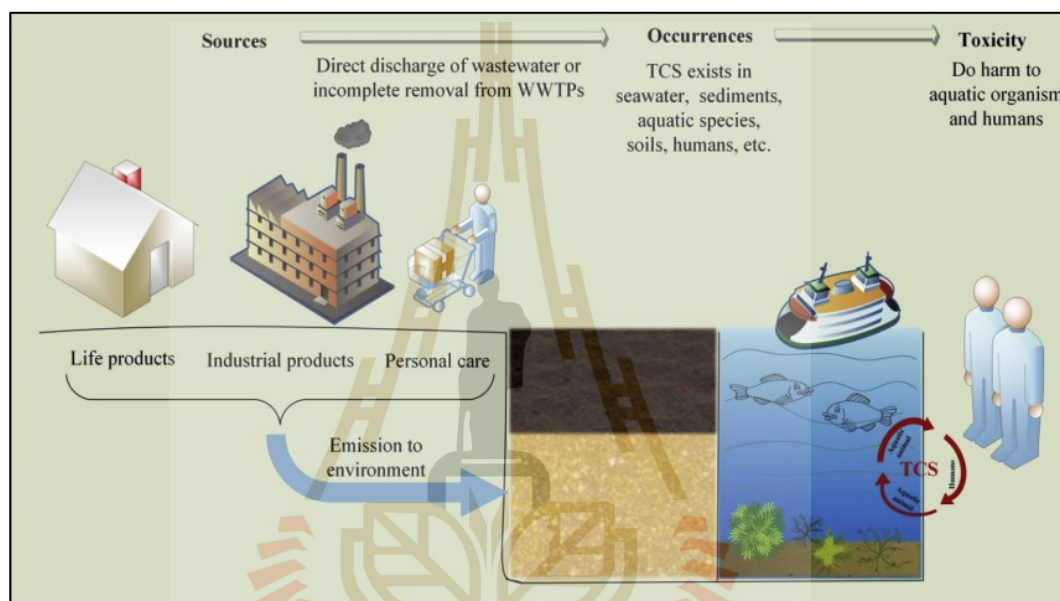
สัดส่วนความเข้มข้นสารไตรโคลซานต่อมวลรวมร่างกายต่ำ ผลกระทบจากการสะสมสารไตรโคลซานในร่างกายจึงไม่ถึงแก่ชีวิต แต่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของต่อมไร้ท่อ หรือขัดขวางการทำงานในการสร้างพลังงานภายในเซลล์ เป็นต้น (Olaniyan et al., 2016) รายละเอียดความเป็นพิษของสารไตรโคลซานต่อมนุษย์ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความเป็นพิษของสารไตรโคลซานต่อมนุษย์

| เซลล์ | ความเข้มข้นสารไตรโคลซาน ($\mu\text{g/L}$) | ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) | ความเป็นพิษ | อ้างอิง |
|---|---|--------------------------|---|--------------------------|
| เซลล์มะเร็งเต้านม (Human breast cancer cells MCF-7) | 345.4 | 120 | - รบกวนการทำงานฮอร์โมนเอสโตรเจน | Henry and Fair (2013) |
| เซลล์มะเร็งปอด (Human (A549) lung cancer cell) | 250 | 24 | - ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ และมีการสร้างแลคเตต ดีไฮโดรจีเนส (Lactate dehydrogenase; LDH) เพิ่มขึ้น | Kwon et al. (2013) |
| เซลล์มะเร็งปอด (Human (H460) lung cancer cell) | 10 | 24 | - รบกวนการทำลายเซลล์ที่ตายแล้ว - ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ และมีการสร้างแลคเตต ดีไฮโดรจีเนส (Lactate dehydrogenase; LDH; LD) เพิ่มขึ้น | Winitthana et al. (2014) |
| เซลล์ผิวหนังมนุษย์ ชนิดเคอราติโนไซต์ (Human keratinocytes; HaCaT) | ≥ 86 | 30 | - ขัดขวางการสร้างพลังงาน และยับยั้งการจับคู่ฟอสโฟรีเลชันในไมโทคอนเดรีย - เกิดเนื้อร้าย หรือเนื้อตาย | Ajao et al. (2015) |
| แมสต์เซลล์ (Human mast cells; HMC-1.2) | ≥ 5 | 1 | - ขัดขวางการสร้างพลังงาน และยับยั้งการจับคู่ฟอสโฟรีเลชันในไมโทคอนเดรีย | Weatherly et al. (2016) |

2.1.3.2 ผลกระทบต่อสัตว์และสิ่งแวดล้อม

สารไตรโคลซานสามารถตกค้างในแหล่งน้ำและตะกอนดินได้ยาวนาน เมื่อสารไตรโคลซานที่ตกค้างในแหล่งน้ำ เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงและสัมผัสกับคลอรีน ส่งผลให้สารไตรโคลซานเปลี่ยนไปอยู่รูปคลอโรฟอร์ม และสารไดออกซิน ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และเมื่อสารไตรโคลซานจับตัวกับตะกอนดินจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ในดินมีฤทธิ์ดื้อยาปฏิชีวนะได้ (Luo et al., 2019; Maynou et al., 2021) เส้นทางของสารไตรโคลซานสู่สิ่งแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.3



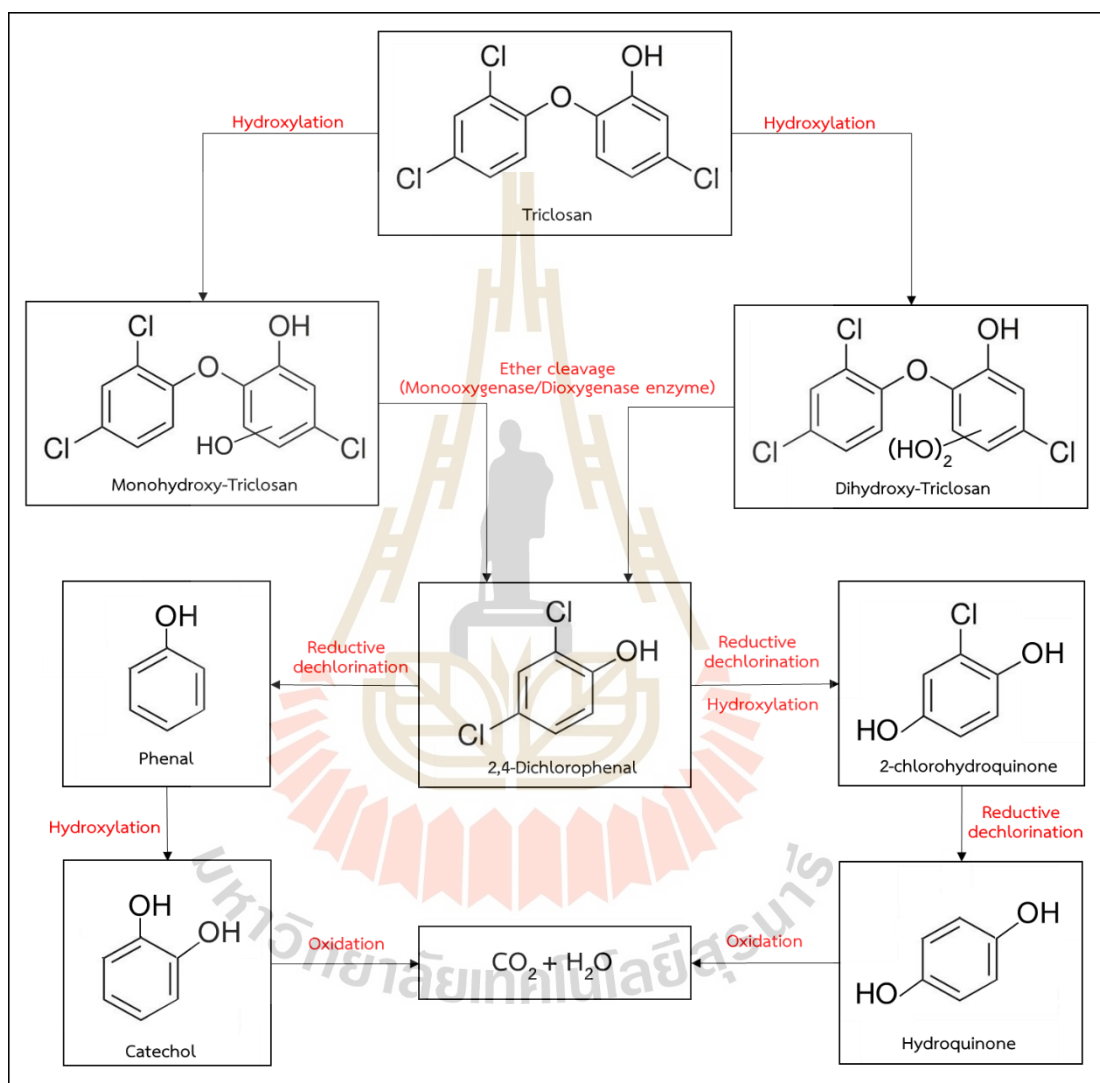
รูปที่ 2.3 เส้นทาง การปนเปื้อนสารไตรโคลซานสู่สิ่งแวดล้อม (Luo et al., 2019)

2.2 รูปของสารไตรโคลซานที่พบในน้ำเสีย และความเป็นพิษ

2.2.1 กลไกทางชีวภาพ

สารไตรโคลซานสามารถเปลี่ยนเป็นรูปอื่นได้โดยกลไกทางชีวภาพและทางเคมี เช่น การเกิดกระบวนการไฮดรอกซิเลชัน โดยแบคทีเรียสายพันธุ์ *Sphingomonas* sp. Rd1 (Hay et al., 2001), *Nitrosomonas europaea* และ *Nitrifying activated sludge* (Roh et al., 2009) และ *Sphingomonas* sp. PH-07 เป็นต้น จะทำให้เกิดการเติมหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่สารไตรโคลซานจะได้ Monohydroxy-Triclosan และ Dihydroxy-Triclosan ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ เกิดกระบวนการตัดพันธะอีเทอร์ เป็นการตัดพันธะระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน (C-O bond) ระหว่างวงแหวนอะโรมาติกทั้งสองโดยเอนไซม์โมโนออกซิเจเนส (Monooxygenase) หรือเอนไซม์ ไดออกซิเจเนส (Dioxygenase) จะเกิดเป็นสาร 2,4-Dichlorophenol เป็นสารตัวกลาง และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อีก 2 แบบ คือ (1) แบบเกิดกระบวนการทำลายหมู่คลอโรจะได้อินอลจากนั้นเกิดกระบวนการไฮดรอกซิเลชันอีกครั้งจะได้ Catechol เมื่อ catechol เกิดกระบวนการออกซิเดชันจะได้

คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลผลิตสุดท้าย และ (2) แบบเกิดกระบวนการไฮดรอกซิเลชันและการทำลายหมู่คลอโรจะได้ 2-chlorohydroquinone จากนั้นเกิดการทำลายหมู่คลอโรอีกครั้งจะได้ hydroquinone และเมื่อ hydroquinone เกิดกระบวนการออกซิเดชันจะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Abbott et al., 2020) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

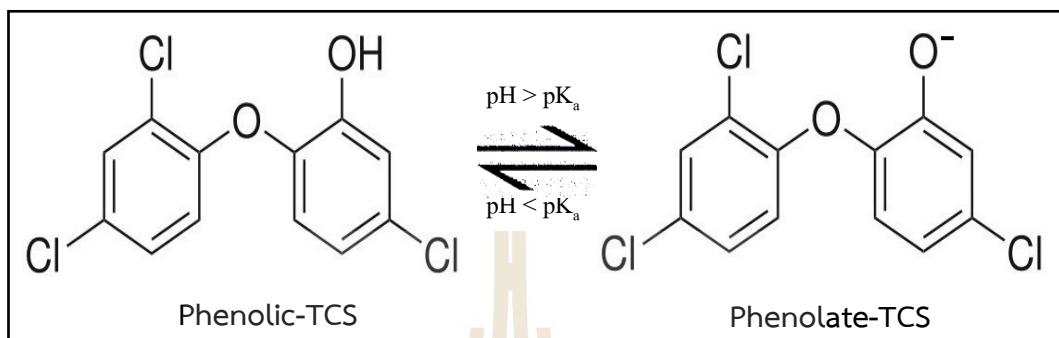


รูปที่ 2.4 กลไกการทำลายโครงสร้างสารไตรโคลซานเมื่อใช้เอนไซม์ของจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย

2.2.2 กลไกการเปลี่ยนแปลงโดยค่าพีเอช

สารไตรโคลซานมีค่า pK_a ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วง 7.80 ถึง 8.14 (EPA, 2008; Dhillon et al., 2015; Sonia et al., 2020) เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย เมื่อค่าพีเอชมีค่าน้อยกว่าค่า pK_a ($pH < 7.80-8.14$) ในสภาวะนี้สารไตรโคลซานอยู่ในรูปฟีนอลิก (Phenolic-TCS form) ซึ่งเป็นรูปปกติหรือรูปที่เสถียรในสภาวะเป็นกลางของสารไตรโคลซาน และ

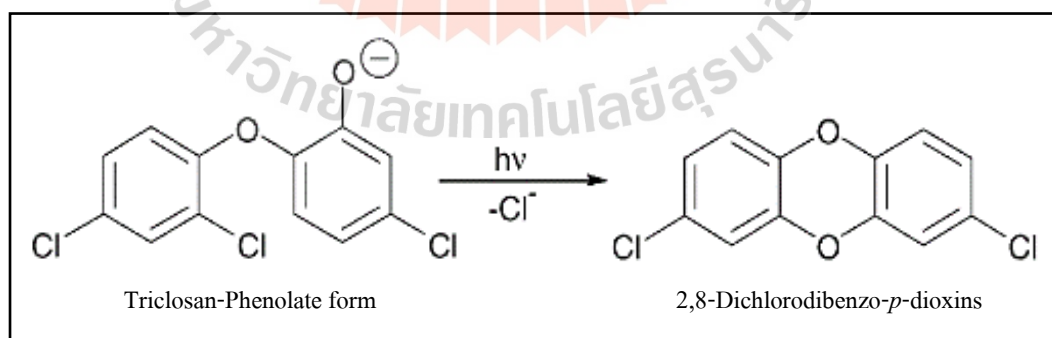
เมื่อค่าพีเอชมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ pK_a ($pH \geq 7.80-8.14$) ส่งผลทำให้สารไตรโคลซานจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปฟีนอลेट (Phenolate-TCS form) ที่มีความเสถียรลดลง (Dhillon et al., 2015; Abbott et al., 2020) รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการเปลี่ยนรูปของสารไตรโคลซานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

2.2.3 กลไกการเปลี่ยนแปลงโดยแสง

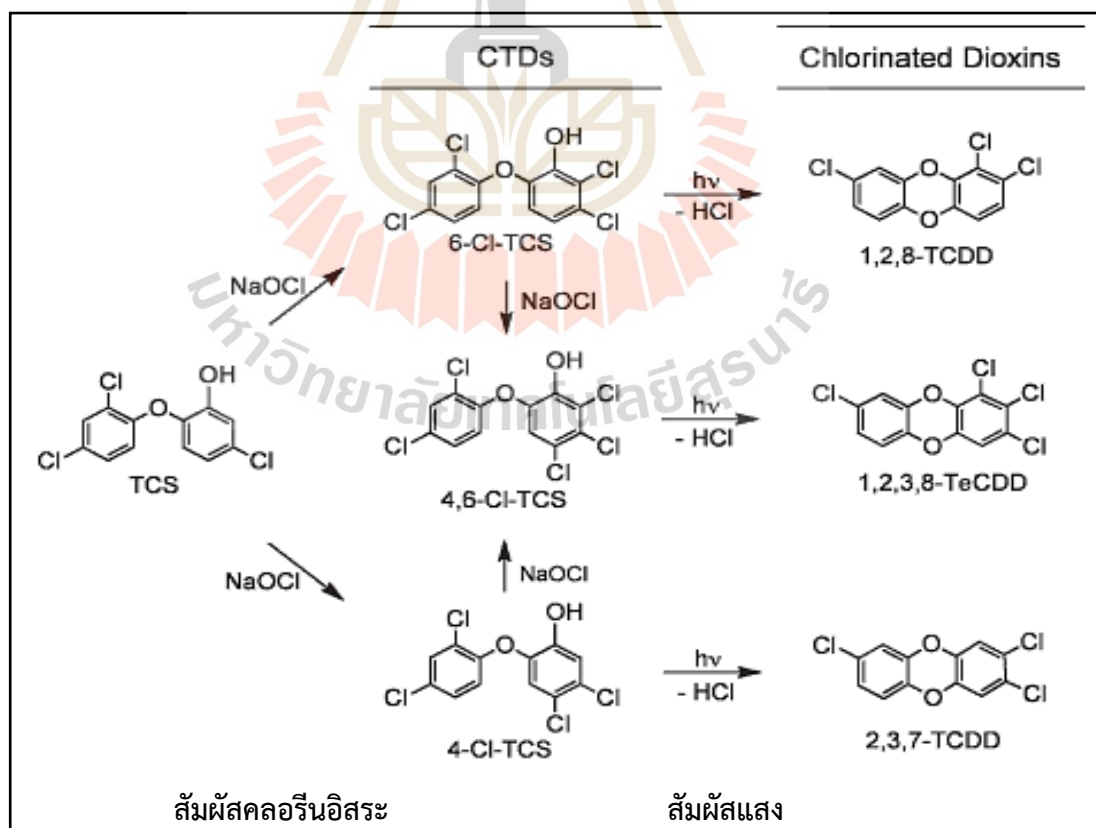
กระบวนการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) เป็นกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดจากสารไตรโคลซานจะดูดซับแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะในรูป Phenolate-TCS ที่มีความเสถียรต่ำจะสามารถดูดซับแสงได้มาก รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะพบว่าโครงสร้างทางเคมีของสารไดออกซินและสารไตรโคลซานมีความใกล้เคียงกันมาก เมื่อสารไตรโคลซานที่สูญเสียหมู่คลอโรออกจากโมเลกุล และอะตอมของออกซิเจนเข้ามาแทนที่หมู่คลอโร และเกิดการเชื่อมต่อระหว่างวงแหวนอะโรมาติกที่ไม่อิ่มตัวทั้งสอง จะส่งผลให้เกิดผลผลิตที่เป็นพิษและมีโครงสร้างคล้ายสารไดออกซิน เช่น 2,8-Dichlorodibenzo-*p*-dioxins (Prochazkova et al., 2022)



รูปที่ 2.6 กลไกการเปลี่ยนรูปของสารไตรโคลซานเมื่อดูดซับแสงอาทิตย์

2.2.4 กลไกการเกิดสารไดออกซิน

กลไกการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารไตรโคลซานโดยกระบวนการแทนที่ด้วยคลอรีน (Chlorine Substitution) ซึ่งสารไตรโคลซานจะทำปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระและกลายเป็นสารตัวกลางที่อยู่ในรูปของคลอโรฟินอล ได้แก่ Dichloro-2-(2,3-dichlorohenoxy)phenol และ Trichloro-2-(2,3-dichlorohenoxy)phenol จากนั้นจะเกิดกระบวนการตัดพันธะอีเทอร์ของสารไตรโคลซานหรือสารตัวกลางที่มีคลอรีนสูงกว่าทำให้เกิดเป็นสารคลอโรฟินอลที่อยู่ในรูป 2,4,6-Trichlorophenol และผลผลิตที่เกิดขึ้น คือ คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ซึ่งเกิดจากการทำลายวงแหวนของสารไตรโคลซาน ทำลายพันธะในหมู่คลอโรฟินอล และทำลายการแทนที่ด้วยคลอรีนจากสารตัวกลางที่เกิดขึ้น คือ Dichloro-2-(2,3-dichlorohenoxy)-phenol, Trichloro-2-(2,3-dichlorohenoxy)-phenol และ 2,4,6-Trichlorophenol (Fiss et al., 2007) และหากในน้ำที่มีคลอรีนอิสระ เช่น น้ำทะเล เมื่อสัมผัสกับแสงอาทิตย์จะเกิดคลอรีเนตไดออกซิน (Chlorinated Dioxin) (Buth et al., 2010) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 กระบวนการดีคลอรีเนชันแบบรีดักทีฟ (Reductive dechlorination) เป็นกระบวนการที่สูญเสียหมู่คลอโรออกจากโครงสร้างของสารไตรโคลซานโดยสาหร่าย *Chlorella pyrenoidosa* ภายใต้สภาวะที่สัมผัสรังสีหรือแสงอาทิตย์ (Wang et al., 2013) ได้ผลผลิตเป็น Dichlorohydroxydiphenyl ether ซึ่งละลายได้ดีในไขมันและเกิดการสะสมอยู่ในเซลล์ ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตของสาหร่าย



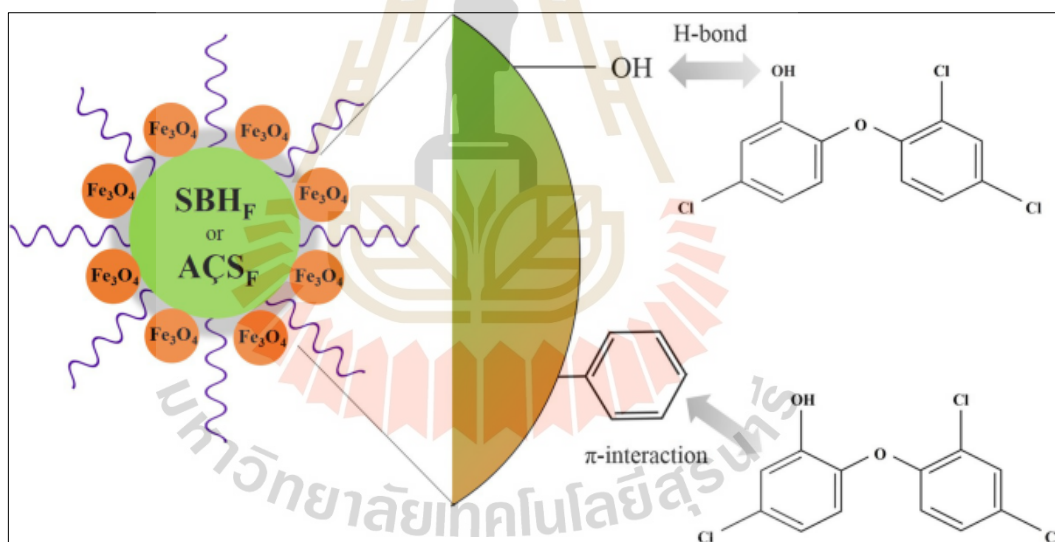
รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดสารไดออกซิน (Buth et al., 2010)

2.3 เทคโนโลยีในการกำจัดสารไตรโคลซานในปัจจุบัน

2.3.1 กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า เป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารซึ่งเกิดจากการที่สารในของเหลวถูกเคลื่อนย้ายมาสะสมหรือเกาะติดบนพื้นผิวของของแข็ง ทำให้สามารถกำจัดสารนั้นออกจากของเหลวได้ โมเลกุลของสารต่าง ๆ ซึ่งมาสะสมหรือถูกดูดซับติดที่พื้นผิวถูกเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และเรียกของแข็งที่ทำการดูดซับว่าตัวดูดซับ (Absorbent)

Vidovix et al. (2022) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยเปลือกถั่วเหลือง (SBH_F) และเมล็ดอาซาฮีเบอร์รี่ (ACS_F) ที่กราฟหมู่ฟังก์ชันด้วยผงแม่เหล็ก (Fe₃O₄) พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 158.35 และ 155.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ผลการศึกษาที่ได้มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาการดูดซับอันดับสองเทียม และแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม แสดงว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง และสามารถผันกลับได้ นอกจากนี้พบว่าที่สภาวะกรดเกิดการดูดซับได้ดี ซึ่งสารไตรโคลซานถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับด้วยพันธะไฮโดรเจนและพันธะ π - π รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการดูดซับสารไตรโคลซานบนพื้นผิวดูดซับ SBH_F และ ACS_F
(Vidovix et al., 2022)

2.3.2 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง คือ กระบวนการบำบัดทางเคมีที่ใช้อนุมูลไฮดรอกซิล (OH[•]) ในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์อย่างรวดเร็ว (Oxidation potential เท่ากับ 2.80) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่นิยมนำมาในการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาและบำบัดน้ำเสีย เพราะอนุมูลอิสระของหมู่ไฮดรอกซิลมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง สามารถกำจัดความสกปรก แบคทีเรีย และไวรัส

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แหล่งกำเนิด OH^{\cdot} มีหลายวิธีเช่น ปฏิกิริยาเฟนตัน ปฏิกิริยาโซโนเฟนตัน กระบวนการไฟฟ้าเคมี และกระบวนการโอโซนเนชั่น เป็นต้น

Vege et al. (2018) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไตรโคลซานในน้ำโดยเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการกำจัดจากการเปลี่ยนแปลงคลีนความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความเข้มข้น สารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่มีความถี่เท่ากับ 574 กิโลเฮิรตซ์ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.9 ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา 60 นาที และมีประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 88 อันดับการเกิดปฏิกิริยาคลายอันดับหนึ่ง และได้ทำการวิเคราะห์สารผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC-MS) พบสาร 2,8-Dichlorodibenzo-p-dioxin ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มีความเป็นพิษ

2.3.3 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

การบำบัดทางชีวภาพ เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยเฉพาะสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์ในถังเกิดปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกตกลง (Eskander and Saleh, 2017) โดยจุลินทรีย์อาจเป็นจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Organisms) หรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Organisms)

Verlicchi and Zambello (2015) ได้ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ในการกำจัดสารต้านเชื้อแบคทีเรีย โดยทำการแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์ยาและผลิตภัณฑ์บำรุงส่วนบุคคลออกเป็น 7 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มยาแก้ปวด กลุ่มยาปฏิชีวนะ กลุ่มยาที่เกี่ยวข้องกับฮอร์โมนส์ กลุ่มยาจิตเวช กลุ่มยาฆ่าเชื้อ กลุ่มน้ำหอม และกลุ่มสารลดแรงตึงผิว ซึ่งตรวจพบว่ามีสารกลุ่มยาฆ่าเชื้อที่มีไตรโคลซานเป็นส่วนประกอบตกค้างในตะกอนจุลินทรีย์ในช่วงความเข้มข้นประมาณ 100-100,000 นาโนกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง)

2.3.4 เปรียบเทียบข้อดี และข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยี

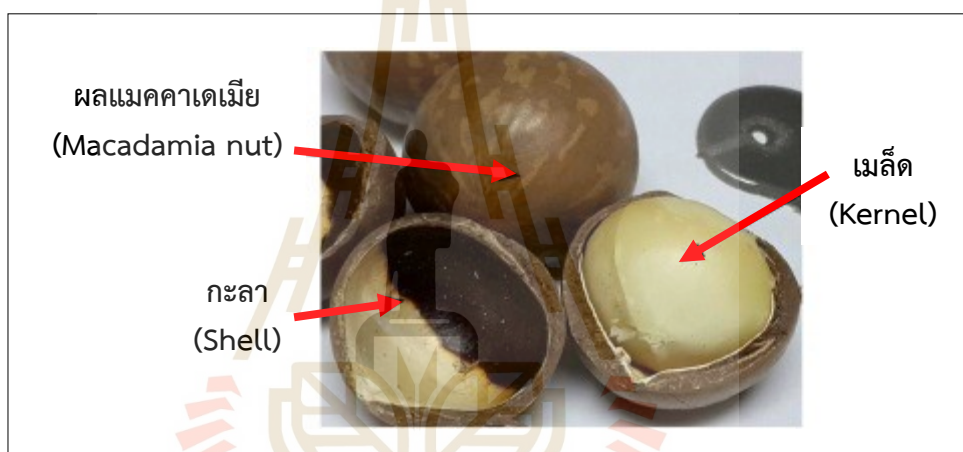
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้สามารถวิเคราะห์สภาวะ และประสิทธิภาพในการกำจัดของแต่ละกระบวนการ และสามารถเปรียบเทียบข้อดี-ข้อจำกัดของแต่ละกระบวนการได้ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละกระบวนการกำจัดมีความแตกต่างกัน เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพต้องใช้จุลินทรีย์ที่มีความจำเพาะในการกำจัดสารไตรโคลซาน ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนาน อีกทั้งยังพบการสะสมสารไตรโคลซานในเซลล์ของจุลินทรีย์ ปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงจะได้สารไดออกซินเป็นผลพลอยได้ที่มีความเป็นพิษ และหากสารไตรโคลซานที่ปนเปื้อนในน้ำสัมผัสกับคลอรีนอิสระและสัมผัสแสงจะได้สารคลอโรฟีนอลเป็นผลพลอยได้ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นวิธีที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง แต่ได้ผลผลิตที่มีความเป็นพิษ เช่น 2,4-Dichlorophenol, 4-Chlorocatechol และ 4-Chlorophenol เป็นต้น สำหรับกระบวนการดูดซับสามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่มีความเป็นพิษ แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนของถ่านกัมมันต์ในกระบวนการผลิต เนื่องจากตัวดูดซับที่มีราคาสูง ส่งผลให้การใช้วัสดุทางธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับราคาถูก

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดี และข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยี

| เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัด | ข้อดี | ข้อจำกัด |
|----------------------------|---|---|
| กระบวนการดูดซับ | <ul style="list-style-type: none"> - สามารถใช้กับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง ๆ ได้ - ไม่เกิด By-product - ตัวดูดซับสามารถใช้ซ้ำได้ - สามารถใช้วัสดุทางการเกษตรที่ไม่ถูกใช้งานแล้ว มาผลิตเป็นตัวดูดซับราคาถูกลงได้ - ตัวดูดซับมีความหลากหลายซึ่งบางชนิดสามารถดูดซับฟีนอลได้ - การปรับปรุงตัวดูดซับจะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวมากขึ้น | <ul style="list-style-type: none"> - ตัวดูดซับที่อิ่มตัวแล้วจะต้องถูกเปลี่ยนออก หรือนำไปฟื้นฟูสภาพ - มีค่าใช้จ่ายในเรื่องของถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ |
| กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง | <ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง - ใช้ระยะเวลาในการกำจัดสั้น | <ul style="list-style-type: none"> - เกิด By-product ที่มีความเป็นพิษ - ต้องการพลังงานมาก |
| กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ | <p>เมื่อจุลินทรีย์ใช้เอนไซม์ Monooxygenase หรือ Dioxygenase ในย่อยสลายสารไตรโคลซาน จะได้ $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ เป็นผลิตภัณฑ์</p> | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้แบคทีเรียที่จำเพาะเจาะจงในการย่อยสลาย - จุลินทรีย์ในดินทั่วไปไม่สามารถกำจัดสารไตรโคลซานได้ อาจทำให้จุลินทรีย์เกิดการดื้อยาได้ - สารไตรโคลซานสามารถสะสมอยู่ในกากของแข็งจากระบบบำบัด - ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนาน - ในสภาวะไร้อากาศจะทำให้สารไตรโคลซานมีความเสถียรมาก - จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อใช้สารไตรโคลซานเป็นแหล่งอาหาร - ต้องการการบำบัดขั้นต้น เพื่อลดมลพิษก่อนเข้าสู่ระบบ |

2.4 กะลาแมคคาเดเมีย (Macadamia nut shell)

แมคคาเดเมีย (Macadamia) เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง มีลักษณะเป็นพุ่มหนาค่อนข้างพีระมิด เมล็ดแมคคาเดเมียสามารถรับประทานได้ สามารถนำไปแปรรูป และมีคุณค่าทางอาหารสูง จึงนิยมนำเมล็ดแมคคาเดเมียมาบริโภคอย่างแพร่หลาย ดังนั้น แมคคาเดเมียจึงจัดว่าเป็นพืชเศรษฐกิจอีกประเภทหนึ่งที่มีความต้องการทางตลาดสูงมาก แต่ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดมีความแข็ง และหนามาก เรียกว่า “กะลา” เป็นส่วนที่ไม่สามารถรับประทานได้ จึงเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ปัจจุบันได้มีการนำกะลาแมคคาเดเมียมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น นำมาเผาเป็นถ่านสำหรับดูดซับกลิ่นและความชื้น นำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล หรือนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับสารมลพิษในน้ำ เพราะถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียมีพื้นที่ผิวสูง และมีรูพรุนมาก ตัวอย่างการดูดซับ เช่น สารประกอบฟีนอล และสีย้อม เป็นต้น



รูปที่ 2.9 ผลแมคคาเดเมีย

2.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์กะลาแมคคาเดเมีย

ชื่อสามัญ : แมคคาเดเมีย (Macadamia nut)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Macadamia* spp.

ตระกูล : Proteaceae

กะลาแมคคาเดเมียมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลสร้อยละ 40-50 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20-30 ลิกนินร้อยละ 20-25 และซีไธนร้อยละ 1-5 (Piechocki et al., 2014) จึงพบว่ากะลาแมคคาเดเมียมีความแข็งมาก คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกะลาแมคคาเดเมียรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่ากะลาแมคคาเดเมียมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ เพราะมีค่าคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 45 เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทั่วไปของวัตถุดิบที่ใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบที่เป็นเปลือกถั่วมีค่าคาร์บอนร้อยละ 40-45 เป็น

องค์ประกอบหลัก มีค่าของแข็งระเหยร้อยละ 55-60 ต้องมีความเป็นกรดต่ำ (ยัวร์ตัน เงินเย็น และ คณะ, 2550) และมีค่าซัลเฟอร์ต่ำ (อลิสรา นิติวัดนะ, 2553)

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกะลาแมคคาเดเมีย

| คุณสมบัติทางกายภาพ (ร้อยละ) | | | | คุณสมบัติทางเคมี (ร้อยละ) | | | | | อ้างอิง |
|-----------------------------|------|---------------|-----------|---------------------------|------|------|------|------|-------------------------------------|
| ความชื้น | เถ้า | อินทรีย์ระเหย | อนินทรีย์ | C | S | N | H | O | |
| 2.02 | 5.06 | 27.68 | 65.24 | - | - | - | - | - | Pongsak and Yimrattanabovorn (2021) |
| 12.5 | 0.7 | 5.0 | 81.80 | 94.16 | 0.05 | 0.47 | 0.93 | 4.40 | Wongcharee et al. (2018) |
| 10.0 | 0.4 | 71.0 | 18.60 | 57.5 | 0.1 | 0.3 | 5.9 | 36.2 | Bae et al. (2013) |
| 1.68 | 2.31 | 74.55 | 21.45 | 51.6 | 0.03 | 0.7 | 6.0 | 41.5 | อลิสรา นิติวัดนะ (2553) |
| - | 2.51 | 77.86 | 19.81 | 49.2 | 0.12 | 0.6 | 5.5 | 42.1 | Fan et al. (2018) |

2.4.2 การนำกะลาแมคคาเดเมียผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

กะลาแมคคาเดเมียเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปแมคคาเดเมีย ซึ่งลักษณะกะลาแมคคาเดเมียมีความหนา และแข็งมาก รวมถึงบริเวณกะลาแมคคาเดเมียมีต่อมน้ำมัน มีความหนาแน่นต่ำ และมีรูพรุนสูง เหมาะสำห้รนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ จากผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC) และศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC จากงานวิจัยของ Pongsak and Yimrattanabovorn (2021) พบว่าลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของกะลาแมคคาเดเมีย (ตัวอย่างจากจังหวัดเชียงราย) มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 65.24 และมีปริมาณเถ้าร้อยละ 2.02 ซึ่งเหมาะสำห้รนำมาผลิตเป็นตัวดูดซับ รายละเอียดผลการศึกษาพบว่าถ่าน MAC ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการไหล 200 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 384.62 ถึง 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.1922 ถึง 0.69 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.04 ถึง 2.57 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-ขนาดเล็ก และจากผลการศึกษาการดูดซับฟีนอล พบว่าถ่าน MAC มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 357.14 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากผลการศึกษาการดูดซับ Methylene blue dye ของถ่าน MAC จากงานวิจัยของ Wongcharee et al. (2018) พบว่า ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่าน MAC มีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 81.80 และมีปริมาณเถ้าร้อยละ 0.7 มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ จากผลการศึกษาการกระตุ้นพบว่าถ่าน MAC มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 830 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 0.830 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กร้อยละ 26.03 และรูพรุนขนาดกลางร้อยละ 73.97 จากผลการดูดซับ Methylene blue dye พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 135 มิลลิกรัมต่อกรัม

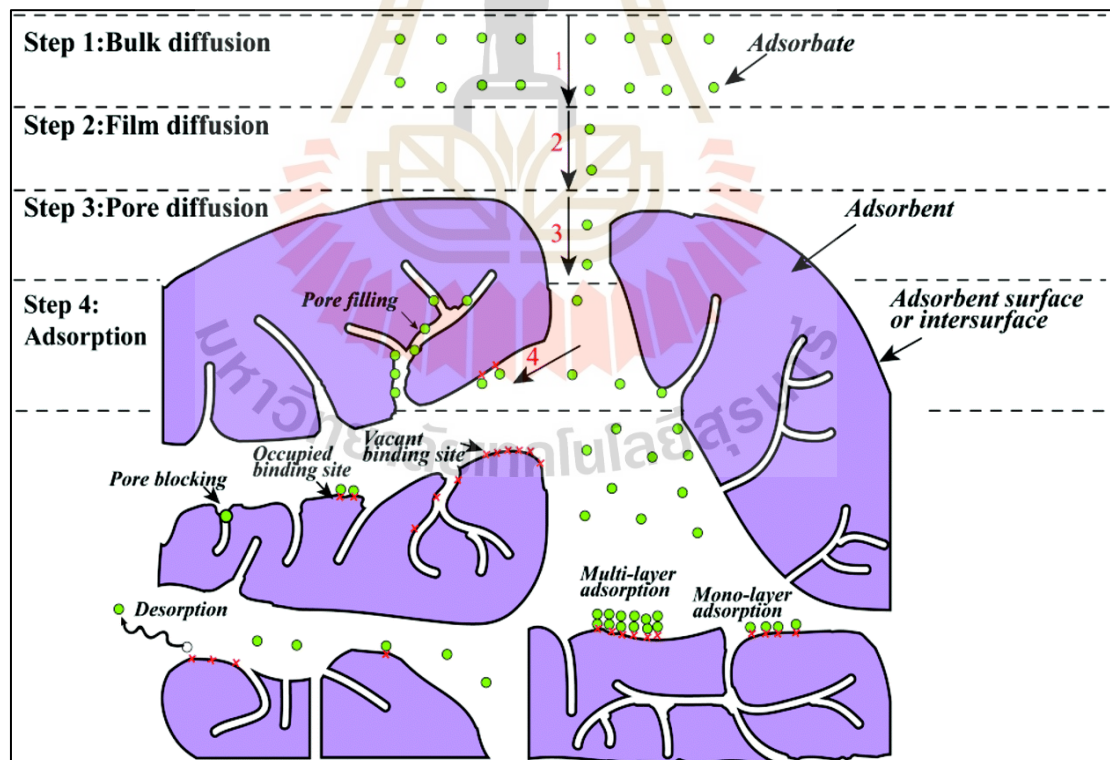
2.5 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) คือ การเพิ่มความเข้มข้นของสารบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ หรือเป็นการลดความเข้มข้นของสารมลพิษหรือตัวถูกดูดซับที่ปนเปื้อนในน้ำ มีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับเป็นการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer) จากก๊าซหรือของเหลวมาข้างของแข็งหรือของเหลว การดูดซับสามารถจำแนกได้ 4 ระยะ (Wang et al., 2020) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

- 1) ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในน้ำเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลวที่ปกคลุมพื้นผิวตัวดูดซับ
- 2) ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่มาเกาะบริเวณพื้นผิวรอบนอกของถ่านกัมมันต์
- 3) ระยะที่ 3 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวผิวจะฟุ้งกระจาย (Diffusion) เข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์
- 4) ระยะที่ 4 เกิดการดูดซับในรูพรุนระหว่างโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งอาจจะดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์ ทางเคมี หรือทั้งสองอย่างได้



รูปที่ 2.10 กลไกการดูดซับ (Wang et al., 2020)

2.5.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาประเภทของกระบวนการดูดซับ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และมีรายละเอียด ดังนี้

2.5.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่าง การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

| คุณลักษณะ | การดูดซับทางกายภาพ | การดูดซับทางเคมี |
|----------------------------|--|--|
| ค่าความร้อนของการดูดซับ | ≤ 20 kJ/mol | ≥ 50 kJ/mol |
| อุณหภูมิการดูดซับ | ต่ำ (อุณหภูมิจุดเดือดของตัวดูดซับ) | สูง |
| แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล | แรงแวนเดอร์วาลส์ | พันธะเคมี |
| การผันกลับของปฏิกิริยา | สามารถเกิดการผันกลับได้ | ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ และกระบวนการคายการดูดซับสามารถทำได้โดยให้ความร้อน |
| การดูดซับบนก๊าซ และของแข็ง | เกิดได้เกือบทุกชนิดที่ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม | เกิดได้เฉพาะบางระบบที่มีแนวโน้มที่จะเกิดสารประกอบได้ |
| พลังงานก่อกัมมันต์ | ไม่มี | มี |
| รูปแบบการดูดซับ | ชั้นเดียว (Monolayer) หรือหลายชั้น (Multilayer) | ชั้นเดียว (Monolayer) |

2.5.2.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่

ชั้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50 ถึง 400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.6

2.5.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซาน ได้แก่ ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ระยะเวลาสัมผัส ค่าพีเอชของสารละลาย ความเร็วรอบการเขย่า อุณหภูมิของการดูดซับ และน้ำหนักถ่านกัมมันต์ เป็นต้น มีรายละเอียด ดังนี้

2.5.3.1 ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของถ่านกัมมันต์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างสารและถ่านกัมมันต์ได้มากที่สุด จึงทำให้สารขนาดเล็กถูกดูดเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ก่อน จากนั้นสารขนาดใหญ่จึงจะถูกดูดเข้าสู่รูพรุนเป็นลำดับต่อไป

2.5.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับจะแปรผกผันกับอัตราเร็วการดูดซับ แต่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความสามารถในการดูดซับ แสดงว่าขนาดของตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่กว่า จะเกิดการดูดซับได้ช้ากว่าตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า และตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

2.5.3.3 ระยะเวลาสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลาย

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัส จนกระทั่งระบบเข้าสู่จุดสมดุลซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคาย (Rate of desorption) ซึ่งความสามารถในการดูดซับในช่วงนี้จะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น

2.5.3.4 ค่าพีเอชของสารละลาย

ค่าพีเอชของสารละลายจะมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนของตัวถูกละลาย และความเป็นขั้วบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังแสดงในสมการที่ 2.1-2.2



เมื่อ S^+ คือ ตำแหน่งประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีความเป็นกรด
 S^- คือ ตำแหน่งประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีความเป็นด่าง

ความหนาแน่นของประจุที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตัวดูดซับจะแปรผันตาม S^+ และ S^- จากสมการที่ 2.1-2.1 เมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะต่าง (ค่าพีเอชสูง) จะมี S^- มากกว่า S^+ แสดงว่าพบประจุลบ

บนพื้นผิวตัวดูดซับมากกว่าประจุบวก แต่หากสารละลายอยู่ในสภาวะกรด (ค่าพีเอชต่ำ) จะมี S^+ มากกว่า S^- แสดงว่าจะพบประจุบวกบนพื้นผิวได้มากกว่า

2.5.3.5 การถูกรบกวนของน้ำ

การสร้างความปั่นป่วนในระบบเกิดขึ้นได้จากการกวนสารละลาย การเขย่า หรือการไหลผ่านคอลัมน์ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีขนาดและคุณลักษณะแตกต่างกัน การสร้างความปั่นป่วนจึงมีระดับแตกต่างกัน ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ จะเกิดการรบกวนของน้ำน้อย อาจทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบผิวตัวดูดซับมีความหนามาก ส่งผลให้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มได้ไม่ดี แต่ถ้าน้ำมีการปั่นป่วนสูงเกินไป การสะสมชั้นฟิล์มของน้ำล้อมรอบผิวตัวดูดซับอาจเกิดได้ยาก ส่งผลให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าหาพื้นผิวของตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง

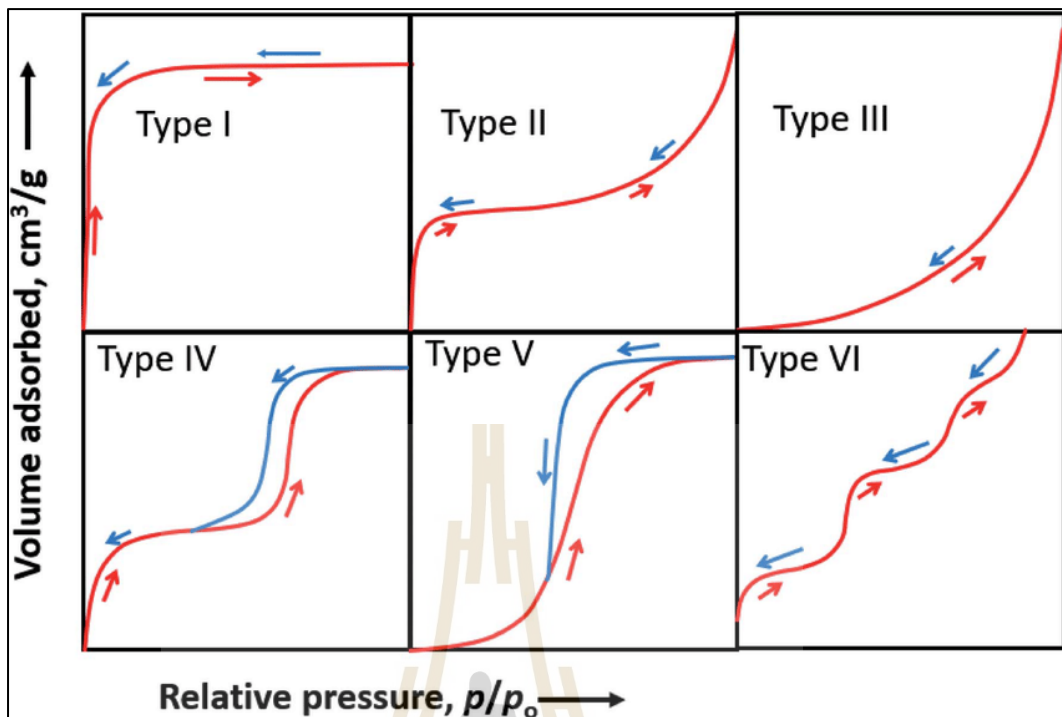
2.5.3.6 อุณหภูมิของการดูดซับ

ในสภาวะของเหลว เมื่อการดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน หากเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าลดอุณหภูมิลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง แต่ถ้าการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง แต่ถ้าลดอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Mhemeed, 2018)

2.5.4 สมดุลการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นการดูดติดมวลสารในของเหลวบนพื้นผิวตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ พร้อมกับการคายการดูดซับ การดูดซับจะเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายการดูดซับเท่ากัน เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลแต่ยังเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอีกจะทำให้แรงดึงดูดของตัวดูดซับลดลงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวลดลง แต่อาจเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นได้อีกเป็นการดูดซับในชั้นที่สองหรือสาม โดยจะใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายสมดุลการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟลอการิทึมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเคมีที่เหลืออยู่ในน้ำและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นโค้งที่สามารถนำมาหาค่าความสามารถในการดูดซับได้ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับทางกายภาพมี 6 แบบ ตามการแบ่งประเภทการดูดซับของ IUPAC รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.11 (Kumar et al., 2019) มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอร์มการดูดซับตามการแบ่งประเภทของ IUPAC (Kumar et al., 2019)

1) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 1 (Type I)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 1 (Type I) เป็นการดูดซับจากตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (Microporous adsorbent) ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของสารเพียงเล็กน้อย และมีพื้นที่ผิวภายนอก ดังนั้นการดูดซับจึงเกิดขึ้นได้น้อยเนื่องจากสารบางสารไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการดูดซับจนกระทั่งตัวดูดซับอิ่มตัว จะเกิดการเรียงสารเป็นชั้นเดียว (Monolayer) ลักษณะของเส้นโค้งจะโค้งเข้าหาแกน P/P_0 สามารถเรียกไอโซเทอร์มนี้ได้ว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

2) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 2 (Type II)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 2 (Type II) สามารถพบได้ทั่วไปเมื่อตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous adsorbent) หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous adsorbent) จะเกิดการดูดซับที่เรียงตัวแบบชั้นเดียวก่อน จากนั้นจะเกิดเป็นการเรียงตัวแบบหลายชั้น (Multilayer) เส้นโค้งจะมีจุดเปลี่ยนเส้นแนวโน้ม เรียกว่า จุด B (Breakthrough point) จุดนี้จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวที่สมบูรณ์แล้ว จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรก และการดูดซับจะสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูง ๆ สามารถเรียกไอโซเทอร์มนี้ได้ว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm

3) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 3 (Type III)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 3 (Type III) เป็นรูปแบบการดูดซับที่มีแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับกับสารค่อนข้างอ่อน แต่แรงดึงดูดระหว่างสารค่อนข้างมาก จึงทำให้สารรวมตัวกันก่อนที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับก่อนที่การจัดเรียงชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ แต่การ

ดูดซับแบบที่ 3 จะมีแรงระหว่างโมเลกุลของสารกับผิวตัวดูดซับมากกว่าแบบที่ 2 ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออกจากแกน P/P_0 จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด

4) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 4 (Type IV)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 4 (Type IV) เป็นการดูดซับจากตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของสารที่ถูกดูดซับ เกิดการเรียงตัวบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบสองชั้น (Bilayer) เส้นกราฟเป็นเส้นโค้งและจะมีความชันเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงว่าโมเลกุลของสารเริ่มถูกดูดเข้าไปในรูพรุนอีกครั้ง การเปลี่ยนระดับของกราฟจะเกิดขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการควบแน่นภายในรูพรุน (Capillary Condensation in pores) โดยเส้นกราฟในช่วงแรกจะคล้ายกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 2 จากนั้นจะเป็นจุดเปลี่ยนเส้นโค้งที่แสดงว่าเกิดการจัดเรียงแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

5) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 5 (Type V)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 5 (Type V) จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับมีค่าน้อย คล้ายกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 3 แต่จะพบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดอยู่ในช่วงเดียวกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 4

6) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 6 (Type VI)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 6 (Type VI) เป็นการดูดซับจากตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน แต่เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น โดยความสูงของแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการจัดเรียงตัวของชั้นนั้น ๆ ลักษณะเส้นกราฟจะโค้งคล้ายขั้นบันได

2.5.5 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ (Thermodynamics)

อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบและสิ่งแวดล้อมในรูปของความร้อนและงาน สามารถบอกทิศทางการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะหนึ่งประกอบด้วย ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS , kJ/mol-K) ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH , kJ/mol) และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG , kJ/mol) โดยเมื่อมีค่า ΔH น้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นกลไกทางกายภาพ (Edokpayi et al., 2020; Vidovix et al., 2019) ซึ่งการดูดซับเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Multilayer) สามารถเกิดการดูดซับได้ที่อุณหภูมิไม่สูง และไม่ต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยา (Aljamali et al., 2021; Mubarak et al., 2021) ค่า ΔS แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแบบสุ่ม จากการทบทวนงานวิจัยของ Sahmoune (2019) พบว่าค่า ΔS ที่แสดงเครื่องหมายบวกจะบ่งบอกถึงปฏิกิริยาการดูดซับแบบสุ่มที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณพื้นผิวของแข็งกับสารละลาย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ (Reversible processes) และค่า ΔS ที่แสดงเครื่องหมายลบ บ่งบอกถึงปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ช้าอย่างมีแบบแผน และไม่สามารถผันกลับได้ และค่า ΔG ซึ่งแสดงเครื่องหมายลบ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ และเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง ๆ แต่เมื่อค่า ΔG ซึ่งแสดงเครื่องหมายบวก แสดงว่าการดูดซับต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยา (Wongcharee et al., 2018; Heydari et al., 2022)

2.5.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetics)

แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาการดูดซับเพื่อใช้อธิบายกลไกการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ และแบบจำลองการแพร่ของการดูดซับ เพื่อใช้อธิบายกลไกการแพร่เข้าสู่รูพรุนภายในตัวดูดซับ มีรายละเอียดดังนี้ โดยสมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ใช้อธิบายกลไกการดูดซับของแข็ง-ของเหลว ที่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสารละลายจะแปรผันตรงกับระยะเวลาสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ และสมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ใช้อธิบายกลไกการดูดซับบนพื้นผิว การดูดซับเกิดขึ้นมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ โดยที่เมื่อเวลาการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปจนเริ่มเข้าสู่สมดุล จะส่งผลให้จำนวนตำแหน่งเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวดูดซับ เนื่องจากเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นผิวตัวดูดซับ (Simiyu et al., 2023)

2.5.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Isotherm adsorption)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่สมดุลกับปริมาณตัวดูดซับ ในสภาวะอุณหภูมิคงที่ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ด้วยรูปสมการสมการไอโซเทอร์มการดูดซับที่นิยมในปัจจุบัน ได้แก่ แบบ Langmuir Isotherm และแบบ Freundlich isotherm เพื่อใช้อธิบายกลไกการดูดซับ รวมไปถึงการจัดเรียงตัวของสารเมื่อถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ มีรายละเอียดดังนี้

2.5.7.1 สมการไอโซเทอร์มแบบ Langmuir Isotherm

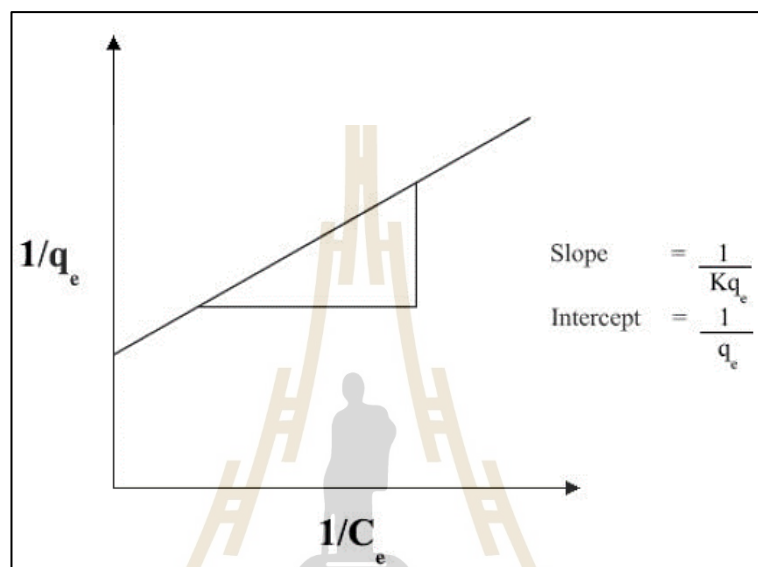
ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir Isotherm ถูกนำเสนอขึ้นโดย Irving Langmuir เป็นไอโซเทอร์มแบบง่าย ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีสมมติฐานว่า โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน ในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งจะมีค่าความร่อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถย้ายข้ามพื้นผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ แต่มีข้อจำกัด คือ แรงที่ใช้ในการดูดซับตัวเป็นแรงอ่อน ๆ สามารถเกิดการคายการดูดซับหรือการผันกลับได้ เกิดสภาพจำเพาะของสารดูดซับต่อสารที่ถูกดูดซับ เนื่องจากการดูดซับที่มีการสร้างพันธะเคมี ระบบการดูดซับทางเคมีจึงมีการดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับเท่านั้น (Monolayer adsorption) สมการของ Langmuir isotherm (Dada et al., 2012) ดังแสดงในสมการที่ 2.3 คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_t} + \frac{1}{q_t k_L} \quad (2.3)$$

| | | |
|--------|-------|--|
| โดยที่ | q_e | คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
| | q_t | คือ ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
| | k_L | คือ ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม) |

C_e คือ ความเข้มข้นไตรโคลซานที่หลงเหลืออยู่หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สมการไอโซเทอร์มแบบ Langmuir สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ K_L (mg/g), q_m (mg/g) และ R_L ได้จากจุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 กราฟเชิงเส้นของ Langmuir isotherm

ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรที่สถานะสมดุล R_L (Separation factor or equilibrium parameter) ซึ่งบ่งบอกถึงความสอดคล้องระหว่างไอโซเทอร์มและปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้น (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558) ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$R_L = \frac{1}{1 + (1 + K_L C_0)} \quad (2.6)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) การพิจารณาค่า R_L แบ่งได้ 4 กรณี คือ

- $R_L > 1$ คือ เกิดการดูดซับได้ไม่ดี (Unfavorable)
- $R_L = 1$ คือ ไอโซเทอร์มการดูดซับเกิดเป็นเส้นตรง (Linear)
- $0 < R_L < 1$ คือ เกิดการดูดซับได้ดี (Favorable)
- $R_L = 0$ คือ การดูดซับสามารถเกิดการผันกลับได้ (Irreversible)

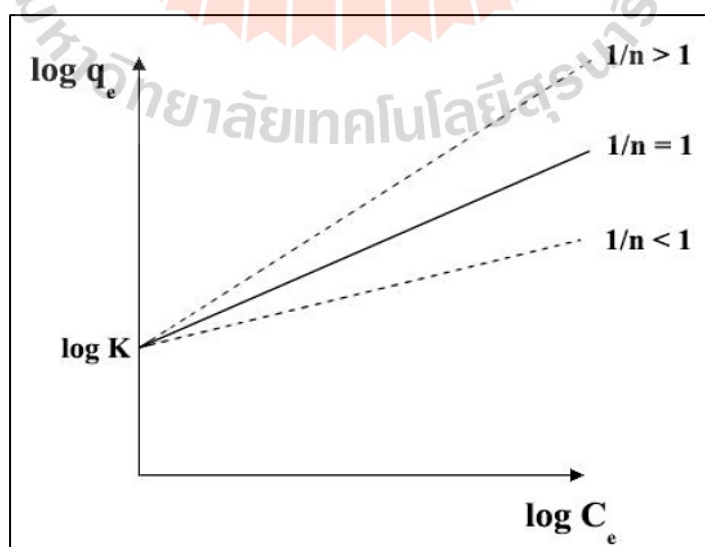
2.5.7.2 สมการไอโซเทอร์มแบบ Freundlich isotherm

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich Isotherm เกิดการดึงดูดระหว่างโมเลกุลด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดได้กับสารที่มีขั้ว และไม่มีขั้ว ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง (Non-specific adsorption) จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงไฟฟ้าสถิตย์มาเกี่ยวข้อง ทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของสารได้หลายชั้น (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554) โดยมีสมมติฐานว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดหรือพื้นผิวตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ (Heterogeneous surface) สมการของ Freundlich isotherm (Dada et al., 2012) ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.4)$$

โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_F คือ ค่าคงที่การดูดซับของ Freundlich (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 n คือ ความแรงของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich isotherm สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ซึ่งสมการเส้นตรงที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.13 สามารถคำนวณหา ค่าคงที่ n และ K_F ($(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$) ได้จากจุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ ถ้าค่า K_F และ $1/n$ มีค่าต่ำ แสดงว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับต่ำถึงแม้จะเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นก็ตาม และถ้ามีค่า $1/n$ สูง แสดงว่าความเข้มข้นเริ่มต้นส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เมื่อลดความเข้มข้นเริ่มต้นลง ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเช่นกัน



รูปที่ 2.13 กราฟเชิงเส้นของ Freundlich isotherm

2.6 การดูดซับแบบคอลัมน์ (Column adsorption)

การดูดซับแบบคอลัมน์เป็นระบบการดูดซับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างต่อเนื่อง และการดูแลรักษาระบบทำได้ง่าย การไหลของน้ำผ่านคอลัมน์มีทั้งการไหลขึ้น (Up-flow) และไหลลง (Down-flow) สามารถจำแนกการดูดซับแบบคอลัมน์ได้ 2 แบบ คือ ตัวดูดซับไม่เคลื่อนที่ (Fixed bed column) และตัวดูดซับเคลื่อนที่ (Pulsed bed column) มีรายละเอียดดังนี้

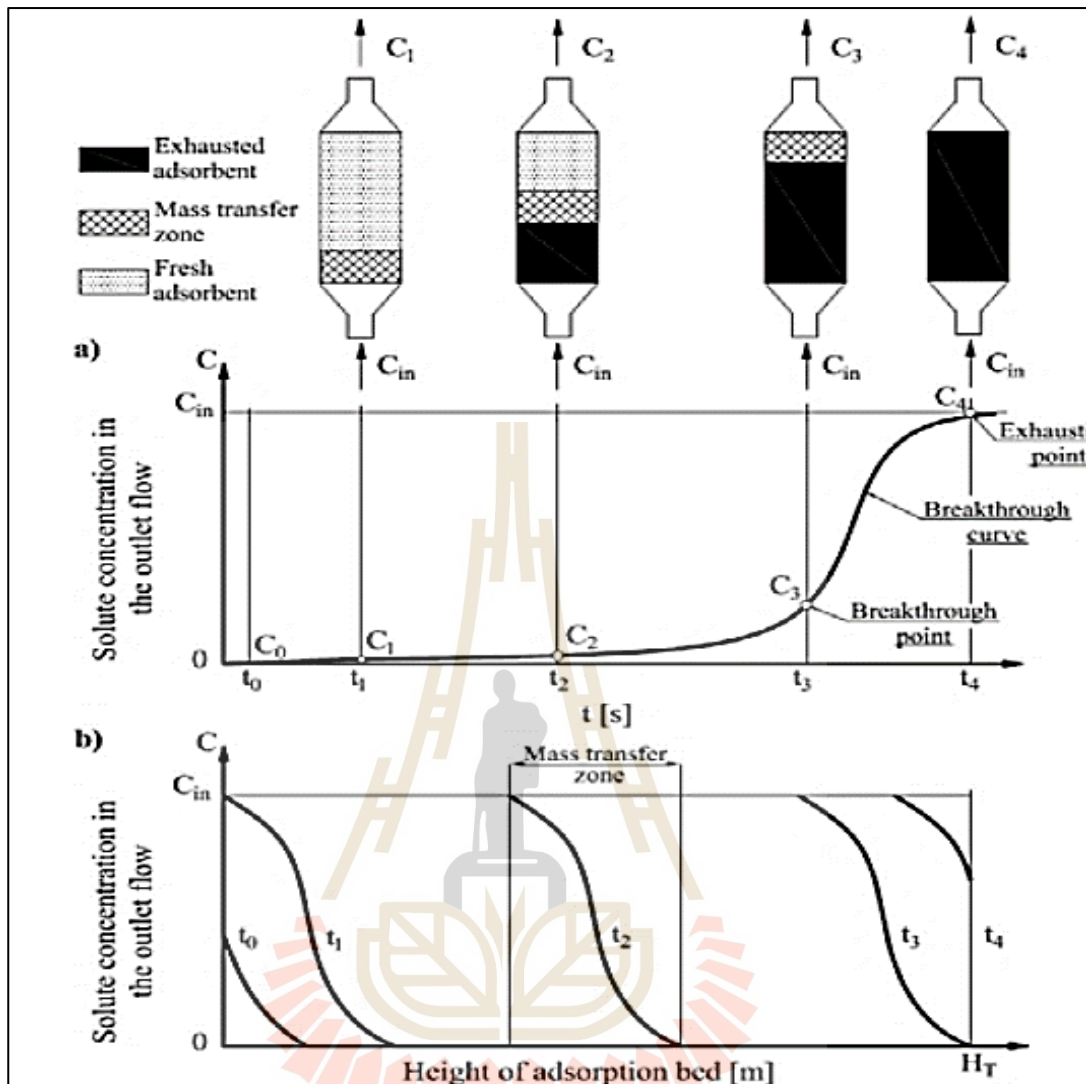
2.6.1 การดูดซับแบบ Fixed bed column

การดูดซับแบบ Fixed bed column กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายมวลสารจากสารละลายเข้ามายังพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยความเข้มข้นของมวลสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว กระบวนการดูดซับแบบ Fixed bed column เป็นระบบที่ตัวดูดซับไม่เคลื่อนที่ ลักษณะการดูดซับในคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยเมื่อสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (C_0) ถูกป้อนเข้าด้านล่างของคอลัมน์ (C_{in}) จะเกิดการดูดซับ เรียกว่าบริเวณที่เกิดการดูดซับว่าบริเวณถ่ายโอนมวลสาร (Mass Transfer Zone, MTZ) จากนั้นจะได้สารละลายที่ผ่านการดูดซับออกทางด้านบนของคอลัมน์ ($C_1 - C_4$) บริเวณถ่ายโอนมวลสารที่เกิดการดูดซับก่อน คือ ด้านล่างของคอลัมน์ซึ่งจะเกิดการอิ่มตัว (Saturation zone) เรียกตัวดูดซับที่เกิดการดูดซับจนอิ่มตัวว่า Exhausted adsorbent เมื่อเกิดกระบวนการดูดซับเรื่อย ๆ จะทำให้บริเวณถ่ายโอนมวลสารเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของน้ำจนถึงจุดอิ่มตัวทั้งคอลัมน์ทำให้สารที่ถูกดูดซับหลุดออกจากชั้นของการดูดซับ การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่หลุดออกจากระบบต่อความเข้มข้นของตัวดูดซับเริ่มต้นกับปริมาตรของสารละลายหรือระยะเวลาสัมผัส สามารถนำเสนอได้ในรูปของกราฟเบรคทูร์ (Breakthrough curve) จากกราฟจะพบว่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่หลุดออกจากระบบจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ และจะเห็นได้ว่าระดับความลึกของตัวดูดซับในคอลัมน์ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยการดูดซับจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อระดับความลึกของตัวดูดซับมีมากกว่าความลึกของบริเวณถ่ายโอนมวลสาร (POÓS and VARJU, 2020)

บริเวณถ่ายโอนมวลสารมีระดับความลึก เท่ากับ L_{MTZ} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$L_{MTZ} = L \left(1 - \frac{t_b}{t_s}\right) \quad (2.5)$$

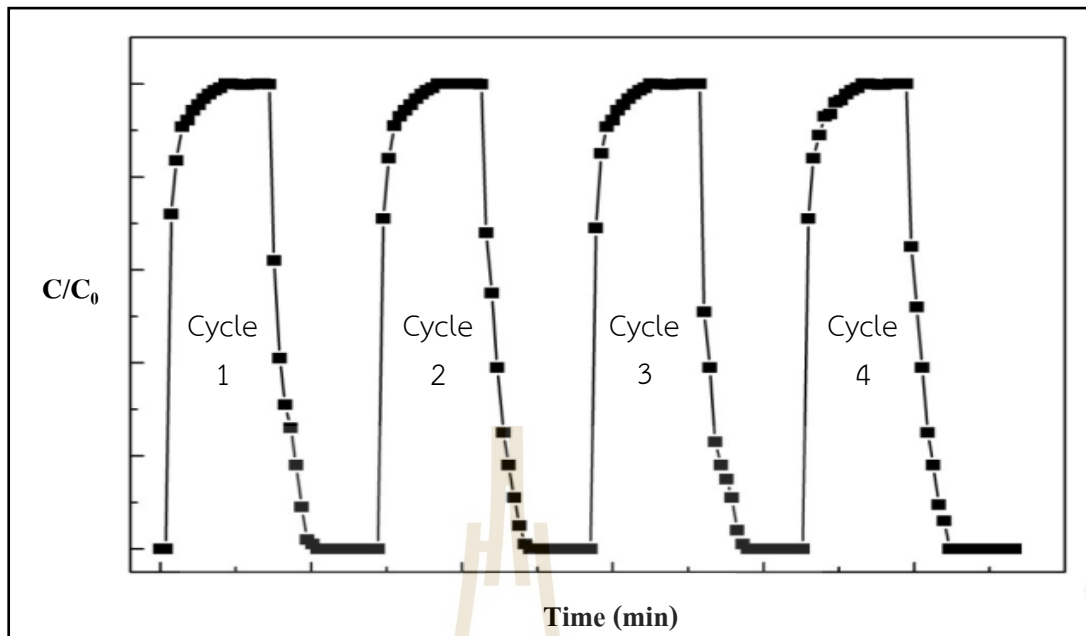
| | | |
|-------|-----------|---|
| เมื่อ | L_{MTZ} | คือ ความลึกของชั้นการดูดซับ (cm) |
| | L | คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (cm) |
| | t_b | คือ เวลาที่ใช้ในการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึง Breakthrough point (min) |
| | t_s | คือ เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (min) |



รูปที่ 2.14 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับในระบบ Fixed bed column แบบ Up-flow (POOS and VARJU, 2020)

2.6.2 การดูดซับแบบ Pulsed bed column

การดูดซับแบบ Pulsed Bed Column เป็นการดูดซับแบบต่อเนื่อง ตัวดูดซับเกิดการเคลื่อนที่ เพราะมีการเปลี่ยนถ่ายตัวดูดซับที่อิ่มตัวออกจากคอลัมน์เท่านั้น และมีการป้อนตัวดูดซับที่ยังไม่อิ่มตัวหรือยังไม่เกิดการดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับกับระยะเวลาสัมผัส พบว่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับจะลดลงจนกระทั่งเกิดการดูดซับอิ่มตัว ทำให้สารที่ถูกดูดซับหลุดออกมาจากระบบเพิ่มมากขึ้น จึงทำการเปลี่ยนถ่ายตัวดูดซับที่อิ่มตัวออก และจึงเติมตัวดูดซับชุดใหม่เข้าสู่ระบบพบว่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในระบบจะลดลงอีกครั้ง ส่งผลให้กราฟแสดงความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นวัฏจักร (Cycle) และลดปริมาณการสูญเสียตัวดูดซับได้ ลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Cycles ที่เกิดขึ้นจากการดูดซับแบบ Pulsed bed column

2.6.3 การทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลอง

2.6.3.1 แบบจำลอง Thomas model

แบบจำลอง Thomas model เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพื่อทำนายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วย Thomas model สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง และค่าคงที่อัตราการดูดซับ (Sivaprakasam et al., 2020) ภายใต้สมมติฐานว่า

- การดูดซับสอดคล้องกับการดูดซับแบบ Langmuir isotherm
- อัตราการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
- การไหลเป็นแบบ Plug flow และไม่เกิดการผสมตามแนวแกน ($D_L = 0$)
- อุณหภูมิของระบบคงที่
- ความเร็วของสารละลายไหลผ่านชั้นสารดูดซับภายในคอลัมน์มีค่าคงที่

$$\ln \left[\frac{C_0}{C_t} - 1 \right] = \left[\frac{K_{TH} q_{TH} M}{Q} \right] - K_{TH} C_0 t \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{C_0}{C_t} - 1 \right]$ กับ t ทำให้สามารถ

คำนวณหาค่าคงที่ K_{TH} (mL/mg-min) และ q_{TH} (mg/g) ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y

2.6.3.2 แบบจำลอง Yoon-Nelson model

แบบจำลอง Yoon-Nelson model มีหลักการของอัตราการดูดซับที่ไม่ได้พิจารณาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับและคอลัมน์ แต่จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการดูดซับและการไหลผ่านชั้นสารดูดซับของตัวถูกดูดซับ เป็นแบบจำลองภายใต้สมมติฐานว่า อัตราการลดลงของความน่าจะเป็นในการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความน่าจะเป็นในการดูดซับของตัวดูดซับ และอัตราการดูดซับ และอัตราการคายการดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Sivaprakasam et al., 2020) การคำนวณดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right] = K_{YN} t - t_{1/2} K_{YN} \quad (2.7)$$

โดย C_t คือ ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับ ที่เวลาใด ๆ (g/l)
 C_0 คือ ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับ ที่เวลาเริ่มต้น (g/l)
 K_{YN} คือ ค่าคงที่ของ Yoon-Nelson model (min^{-1})
 t คือ เวลาการดูดซับ ที่เวลาใด ๆ (min)
 $t_{1/2}$ คือ เวลาการดูดซับ ที่ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับเท่ากับร้อยละ 50 ของ Breakthrough curve (τ , min)

จากสมการที่ 2.7 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right]$ กับ t ทำให้สามารถคำนวณหาค่าคงที่ K_{YN} (min^{-1}) และเวลาที่ต้องการสำหรับการดูดซับของตัวที่ถูกดูดซับที่ร้อยละ 50 (τ , min) ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านกัมมันต์แมคคาเดเมียในการดูดซับ การดูดซับสารไตรโคลซาน และการดูดซับในระบบคอลัมน์เพื่อใช้ประกอบในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังนี้

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถ่านกัมมันต์กะละแมคคาเดเมีย

นุชจิรา ดีแจ้ และคณะ (2560) ทำการศึกษาวิจัยพบว่าการบริโภคมะคคาเดเมียเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ในอุตสาหกรรมการผลิตจะเหลือกะลาแมคคาเดเมียอยู่เป็นจำนวนมาก จึงนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และเพิ่มมูลค่าของกะลาแมคคาเดเมีย สอดคล้องกับ วิมลนันท์ พงศ์ภัทรกานต์ และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาวิจัยพบว่าแมคคาเดเมียเป็นพืชเศรษฐกิจ สร้างรายได้ให้แก่ชุมชนในอำเภอเขาหัว จังหวัดเลย โดยจะขายเนื้อแมคคาเดเมียที่อยู่ด้านใน และส่วนกะลาที่ถูกกะเทาะออกจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอยู่เป็นจำนวนมาก ทางผู้วิจัยจึงสนใจนำกะลาแมคคาเดเมียมาเพิ่มมูลค่าโดยนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริก พบว่ามีร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วง 30.38 ถึง 34.28 มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.57 ถึง 0.62 กรัมต่อลูกบาศก์

เซนติเมตร มีค่า Iodine number อยู่ในช่วง 825 ถึง 855 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2547) คือ 600 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อมผ้าจำนวน 3 สี ความสามารถในการดูดซับสูงสุดร้อยละ 41 ถึงร้อยละ 57 ภายใต้สภาวะค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5 ถึง 7

Pongsak and Yimrattanabovorn (2021) ได้นำถ่านกะลาแมคคาเดเมียมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพที่สภาวะอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ระยะเวลากระตุ้น 60, 120, 180 และ 240 นาที พบว่า มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 448.92 ถึง 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วง 2.06-2.56 นาโนเมตร มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.2678 ถึง 0.4718 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีค่าความสามารถในการดูดซับฟีนอลอยู่ในช่วง 322.58 ถึง 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม และ Rodrigues et al. (2012) ได้นำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียมาใช้ในการดูดซับสารฟีนอล พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียมีรูพรุน เท่ากับ 1.23 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) มีความหนาแน่นรูพรุน เท่ากับ 1,033 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนรวมเท่ากับ 0.476 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พบว่า ลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นแบบ Type I ตามการจำแนกของ IUPC เป็นการดูดซับแบบ Langmuir isotherm เป็นการดูดซับทางกายภาพและเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นสมการอันดับสอง (Second-order model) มีค่า pH_{PZC} เท่ากับ 9.8 พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความเป็นด่างมากกว่าความเป็นกรด เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่า 9.8 จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นประจุบวก และเมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงกว่า 9.8 จะส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นประจุลบ ในสภาวะกรดมีความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลสูงสุด มีค่าพีเอชในช่วง 7 ถึง 8 มีความสามารถในการดูดซับลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายจนเท่ากับ 10 พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเป็นอย่างมาก สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Senturk et al. (2009) ว่าเมื่อ $pH > pK_a$ จะเพิ่มแรงผลักระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวเป็นประจุลบ ในการศึกษาอุณหพลศาสตร์ได้ค่า ΔG และค่า ΔH มีค่าเป็นลบ แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบคายพลังงาน อีกทั้งค่า ΔS มีค่าเป็นลบ แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้โมเลกุลของสารฟีนอลในสารละลายเคลื่อนที่หาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง (Zhang et al., 2009) และจากการศึกษาการคายการดูดซับ (Desorption) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นประจุลบ และเกิดแรงผลักระหว่างตัวดูดซับกับสารฟีนอลในรูปฟีนอล (Anion phenolate)

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2564) ได้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) หมู่ฟังก์ชันที่พบ ได้แก่ O-H, C=C, C=O, C-H, C-C, C-O, C≡C และ C-Cl และ Hadibarata et al. (2018) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากเนื้อมะพร้าว พบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับ ได้แก่ O-H, C=C, C=O, C-H, C-C และ C-Cl ซึ่งสามารถดักจับอนุภาคของแอลกอฮอล์ ฟีนอล อัลเคน และอัลคิลแฮไลด์ เป็นต้น ส่วนหมู่ไฮดรอกซิลสามารถดักจับ สารมลพิษ

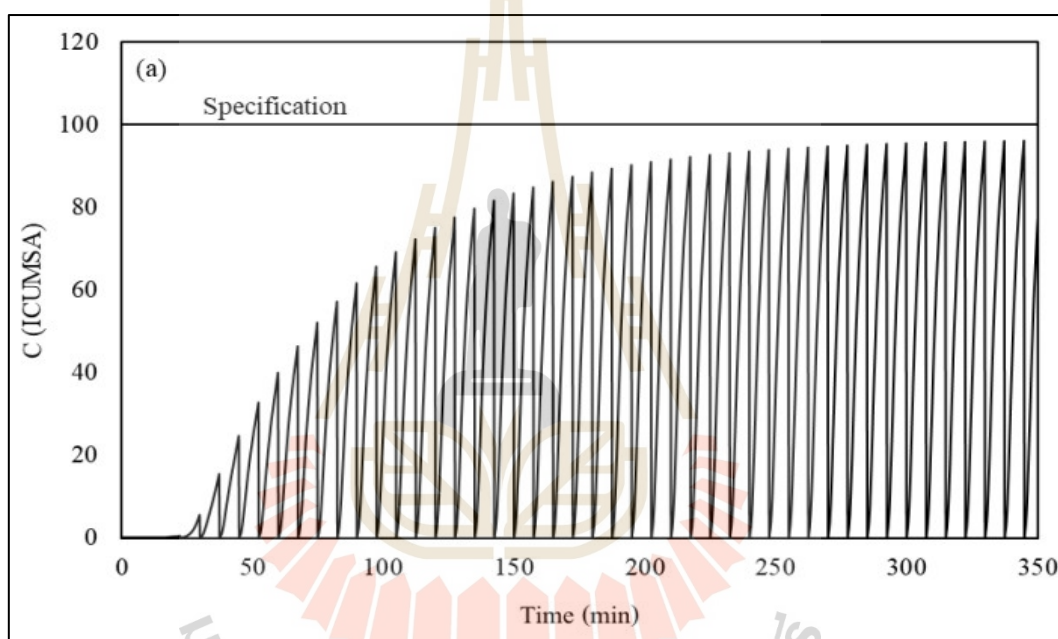
และโลหะหนักได้ดี Lazim et al. (2015) ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส ความปั่นป่วนของน้ำ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซาน ค่าพีเอช และอุณหภูมิของสารละลาย พบว่าปริมาณตัวดูดซับ 0.05 และ 0.1 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารไตรโคลซานร้อยละ 75.3 และ 80.8 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารไตรโคลซานลดลงร้อยละ 74.2 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็น 0.2 กรัม การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารไตรโคลซานเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเติมตัวดูดซับมากกว่าปริมาณตัวดูดซับที่สมดุลจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารไตรโคลซานลดลง เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการทับซ้อนระหว่างตัวดูดซับด้วยตัวเอง ส่งผลให้พื้นผิวบางส่วนไม่สัมผัสกับสารไตรโคลซาน เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสจาก 0.5 เป็น 20 นาที ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 42.9 ถึง 80.8 แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสจนถึง 60 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง เนื่องจากสารไตรโคลซานหลุดออกจากพื้นผิวตัวดูดซับกลับสู่สารละลาย เมื่อเพิ่มความปั่นป่วนในน้ำจะทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับได้มากขึ้น แต่หากมีความปั่นป่วนมากเกินไปจะทำให้สารไตรโคลซานหลุดออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซานในช่วง 5 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 80.8 เป็นร้อยละ 93.5 เนื่องจากมีแรงขับเคลื่อนสูง เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นในช่วง 3.0 ถึง 5.6 พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 67.0 ถึงร้อยละ 80.8 แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7 ถึง 9 จากร้อยละ 61.5 เป็นร้อยละ 59.9 เพราะที่สภาวะกรดจะทำให้พื้นผิวตัวดูดซับเป็นประจุบวก สอดคล้องกับ Rodrigues et al. (2012) และสารไตรโคลซานมี pK_a เท่ากับ 8.14 จะเกิดแรงผลักด้วยไฟฟ้าสถิตย์ต่ำ ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น หากมีความเป็นกรดมากเกินไปจะทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุบวกมาก และลดแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ แต่เมื่อมีความเป็นด่างมากเกินไปจะทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุลบของสารไตรโคลซาน (Phenolate-TCS) กับพื้นผิวประจุลบได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงร้อยละ 80.8 ถึงร้อยละ 12.1 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 เป็น 60 องศาเซลเซียส แสดงว่าการดูดซับเป็นแบบคายพลังงาน

2.7.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแบบคอลัมน์

Karunarathne and Amarasinghe (2012) ทำการศึกษารูปร่างการดูดซับสารฟีนอลด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากชานอ้อย ในระบบการดูดซับแบบ Fixed bed column เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากสามารถรองรับน้ำเสียปริมาณมาก และเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่องได้ เริ่มจากการทดลองแบบแบตช์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มการดูดซับ นำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลองในระบบคอลัมน์ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารฟีนอล ระยะเวลาสัมผัส อัตราการไหล และปริมาณตัวดูดซับ ทำการวิเคราะห์ Breakthrough curve และความสูงของชั้นดูดซับ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับในคอลัมน์จะทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

Plangklang and Sookkumnerd (2023) ทำการศึกษารูปร่างการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกขาวน้ำตาล ทำการดูดซับในคอลัมน์แบบ Pulsed bed column พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยออกแบบการทดลองระยะซีกกลับของถ่านกัมมันต์

ให้คงเหลือถ่านกัมมันต์ชุดเก่าอยู่ในคอลัมน์มากกว่าร้อยละ 14 และออกแบบให้แต่ละ Cycle มีประสิทธิภาพการกำจัดคงเหลือร้อยละ 25 จึงทำการชักถ่านกัมมันต์ออก ตัวอย่าง Cycle ที่เกิดขึ้นจากการชักกลับดังแสดงในรูปที่ 2.16 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการชักถ่านกัมมันต์ออกเพียงบางส่วนของคอลัมน์ จะส่งผลให้มีจำนวน Cycle เพิ่มขึ้น สามารถยืดอายุการใช้งานคอลัมน์ได้ถึงร้อยละ 87 เนื่องจากเมื่อชักถ่านกัมมันต์ออกเพียงบางส่วนแล้ว จะต้องเติมถ่านกัมมันต์ชุดใหม่เข้าสู่คอลัมน์ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว และตำแหน่งว่างสำหรับการดูดซับ สอดคล้องกับผลการทบทวนงานวิจัยของ Patel (2019) และ Vidovix et al. (2022) ที่พบว่า การดูดซับแบบ Pulsed bed column เป็นการดูดซับแบบ Continuous flow สามารถลดการสูญเสียถ่านกัมมันต์ในการดูดซับได้ดีกว่าแบบ Fixed bed column รวมถึงสามารถเพิ่มระยะเวลาการดูดซับได้



รูปที่ 2.16 ตัวอย่าง Cycles ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column

2.7.4 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กะลาแมคคาเดเมียสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับฟีนอลได้ จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า สารไตรโคลซานมีหมู่ฟีนอลและอีเทอร์เป็นองค์ประกอบ เป็นสารที่สามารถถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ได้ ความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซาน ระยะเวลาสัมผัส ความปั่นป่วนของน้ำ อุณหภูมิ ค่าพีเอช และปริมาณตัวดูดซับ เป็นต้น การทดลองในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่นิยมทดลองแบบแบตช์ และนำผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบไหลต่อเนื่องในระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ ปัจจัยที่ทำการศึกษา เช่น อัตราการไหล ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซาน เป็นต้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยเรื่อง การดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดสารไตรโคลซานโดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง มีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

ทำการศึกษาวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเคมี และศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 5, 10 และ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และระบบลำเลียงแสง XTM beamline (BL 1.2W: X-ray Tomographic Microscopy) และระบบลำเลียงแสง IR beamline (BL 4.1: Infrared Spectroscopy and Imagine) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.2 ระยะเวลาทำการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาเริ่มตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2565 ถึงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2566

3.3 วิธีการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental research) ขั้นตอนการศึกษาวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

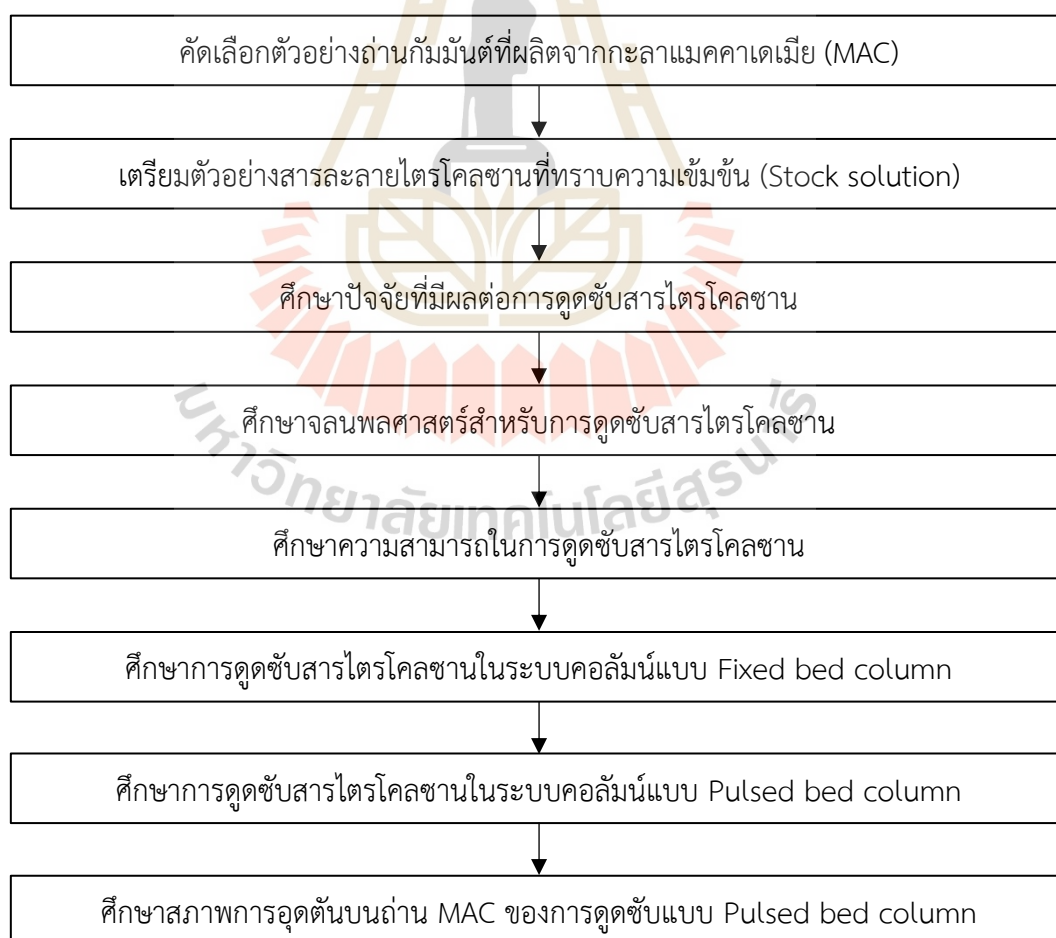
3.4 รายละเอียดขั้นตอนการศึกษา

3.4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย

3.4.1.1 ทบทวนวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC)

ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (Macadamia Activated Carbon, MAC) ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ได้อ้างอิงจากผลการศึกษาของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) ที่ได้เตรียมวัตถุดิบถ่านกะลาแมคคาเดเมียจากโครงการแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ทำการกระตุ้นด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ ที่สภาวะอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 100 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิกระตุ้นเท่ากับ 950 องศาเซลเซียส ช่วงระยะเวลากระตุ้นเท่ากับ 60, 120, 180 และ 240 นาที ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1 พบว่ามีปริมาณร้อยละผลผลิตเฉลี่ย (%Yield)

อยู่ในช่วง 31.33 ถึง 67.32 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area, S_{BET}) อยู่ในช่วง 448.92 ถึง 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume, V_{total}) อยู่ในช่วง 0.2678 ถึง 0.4718 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Pore diameter, D_p) อยู่ในช่วง 2.06 ถึง 2.56 นาโนเมตร จากการจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐานของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) พบว่าถ่าน MAC จัดเป็นรูพรุนขนาดกลางจนถึงขนาดเล็ก (Yokoyama et al., 2019) โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity, q_e) สารละลายฟีนอลอยู่ในช่วง 322.58 ถึง 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น ในการศึกษานี้ได้ทำการคัดเลือกถ่าน MAC ที่มีลักษณะสมบัติผ่านมาตรฐานถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยอ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 900-2547 ถ่านกัมมันต์สำหรับอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งกำหนดว่าควรมีค่า Iodine number ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่น้อยกว่า 600 ตารางเมตรต่อกรัม (มอก. 900-2547; ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์, 2562) และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.20 ถึง 1.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (Virginia and Adrián, 2012) และควรมีปริมาณร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 (Chung, 2000)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ตารางที่ 3.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC จากงานวิจัยของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563)

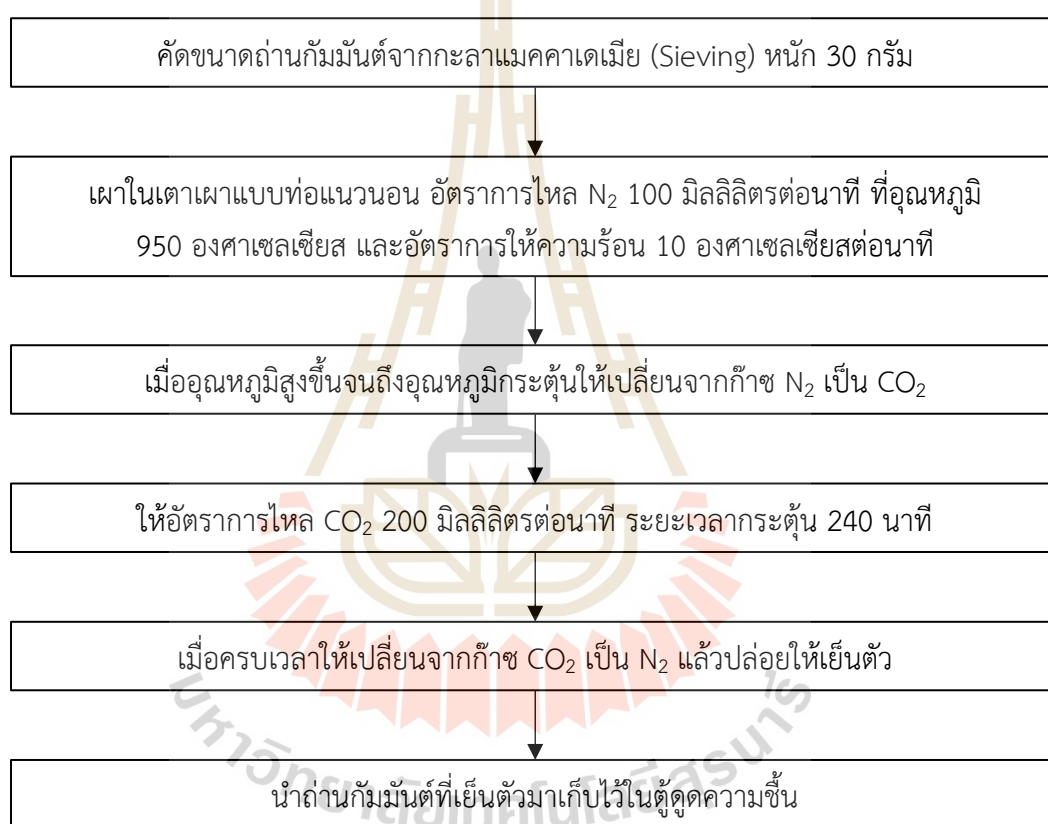
| Activation conditions | | Burn-off (%) | Total Yield (%) | S_{BET} (m^2/g) | V_{total} (cm^3/g) | D_p (nm) | q_e Phenol (mg/g) |
|------------------------------------|------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|------------|---------------------|
| CO ₂ Flow rate (mL/min) | Time (min) | | | | | | |
| 100 | 60 | 32.68 | 67.32 | 454.54 | 0.27 | 2.36 | - |
| | 120 | 49.69 | 50.31 | 524.69 | 0.33 | 2.51 | - |
| | 180 | 55.83 | 44.17 | 528.06 | 0.34 | 2.58 | - |
| | 240 | 65.47 | 34.53 | 917.71 | 0.47 | 2.06 | 322.58 |
| 200 | 60 | 33.14 | 66.86 | 448.92 | 0.28 | 2.40 | - |
| | 120 | 53.37 | 46.63 | 609.98 | 0.36 | 2.43 | - |
| | 180 | 59.13 | 40.87 | 921.69 | 0.45 | 2.23 | 370.37 |
| | 240 | 68.67 | 31.33 | 1,363.75 | 0.69 | 2.36 | 588.24 |

ดังนั้น ในการศึกษาคั้งนี้ได้เลือกวิธีกระตุ้นที่สภาวะอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลากระตุ้น 240 นาที เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายฟีนอลสูงสุดเท่ากับ 588.24 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีคุณสมบัติผ่านมาตรฐานถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 1,363.75 ตารางเมตรต่อกรัม มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.36 นาโนเมตร ดังนั้น ในการศึกษาคั้งนี้จึงได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC) เพื่อนำมาใช้ในศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบแบบแบตช์และแบบคอลัมน์ต่อไป

3.4.1.2 ขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย (MAC)

ในการศึกษาคั้งนี้ได้รับกะลาแมคคาเดเมียจากอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ เพื่อนำมาเตรียมเป็นตัวดูดซับถ่าน MAC นำมาบดและคัดขนาดถ่านกัมมันต์ด้วยวิธี Sieve analysis (ASTM, 2004) ให้มีอนุภาคอยู่ในช่วง 1.70-2.38 มิลลิเมตร จัดเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ดที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.25-5.00 มิลลิเมตร (สัมฤทธิ์ ไม้พวง, 2558) จากนั้นนำถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการคัดขนาดแล้วปริมาณ 30 กรัม มากระตุ้นโดยอ้างอิงวิธีการกระตุ้นของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) รายละเอียดขั้นตอนการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยเริ่มจากให้ความร้อนที่สภาพไร้อากาศในเตาเผาแบบนอนแบบท่อ (เครื่อง Tube furnace รุ่น CTF 12/75/700/201, ยี่ห้อ Carbolite, ประเทศอังกฤษ) เพิ่มอุณหภูมิในเตาเผาโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหลก๊าซ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งเตาเผาที่มีอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จากนั้นเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสภาวะอัตราการไหลก๊าซ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลากระตุ้น 240 นาที จากนั้นเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนอีกครั้งเพื่อลดอุณหภูมิภายในเตาเผาให้เป็นอุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างถ่าน MAC ที่ผ่านการกระตุ้นแล้วมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นจนถ่าน MAC มีน้ำหนักคงที่ จะได้ค่าปริมาณร้อยละผลิตของถ่าน MAC และนำตัวอย่างถ่าน MAC ที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค BET

analysis (เครื่อง BET รุ่น Bel Sorp mini II, ยี่ห้อ Bel-Japan, ประเทศญี่ปุ่น) วิเคราะห์ลักษณะทาง
 สัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM (เครื่อง SEM รุ่น JEOL JSM-6010LV,
 ประเทศเยอรมนี) วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค XTM (BL1.2W: X-ray
 Tomographic Microscopy, Synchrotron Light Research Institute) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ
 ถ่าน MAC ด้วยเทคนิค FTIR (เครื่อง FTIR; Spectrometer รุ่น VERTEX 70, Microscope รุ่น
 Hyperion 2000, ยี่ห้อ Bruker, Optic Ettlingen, ประเทศเยอรมันนี) และวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิว
 เป็นศูนย์ (pH_{PZC}) การเก็บรักษาตัวอย่างทำได้โดยเก็บไว้ในโถดูดความชื้นที่ปิดสนิท เพื่อลดความชื้นที่
 เกิดขึ้น และเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
 (ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์, 2563)

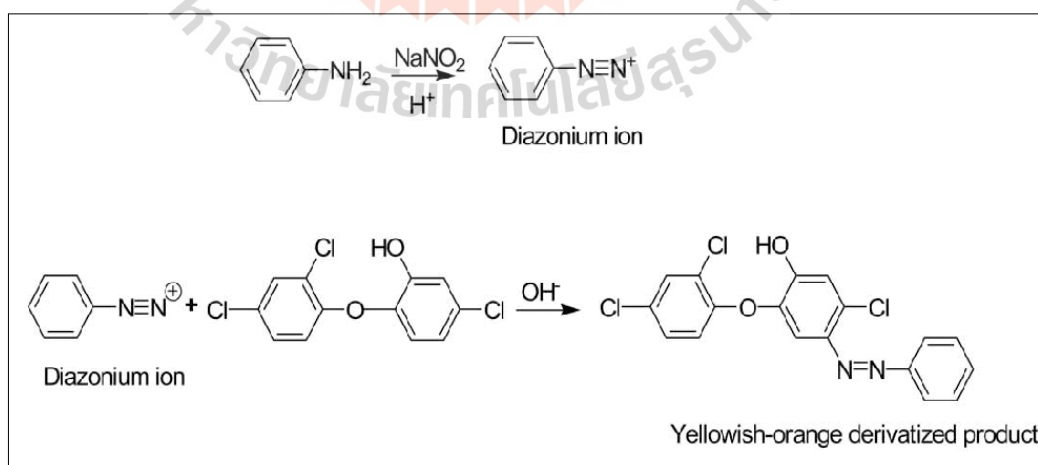
3.4.2 การเตรียมสารละลายไตรโคลซาน

การเตรียมสารละลายไตรโคลซานที่ใช้ในการศึกษาอ้างอิงวิธีเตรียมสารจากงานวิจัย
 Kaur et al. (2018) เตรียมสารละลายไตรโคลซานที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (Stock solution) เท่ากับ
 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ผงสารไตรโคลซาน (Thermo Fisher Scientific Inc. Waltham,
 ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 97 ปริมาณ 20 มิลลิกรัม ละลายด้วย
 สารละลาย 0.01M NaOH ปริมาณ 20 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยน้ำปราศจากสารอินทรีย์และ

ประจุให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร ทำการเก็บสารละลายไตรโคลซานที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ภายในภาชนะที่บดแสง เพื่อป้องกันปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง

3.4.2.1 การตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารไตรโคลซาน

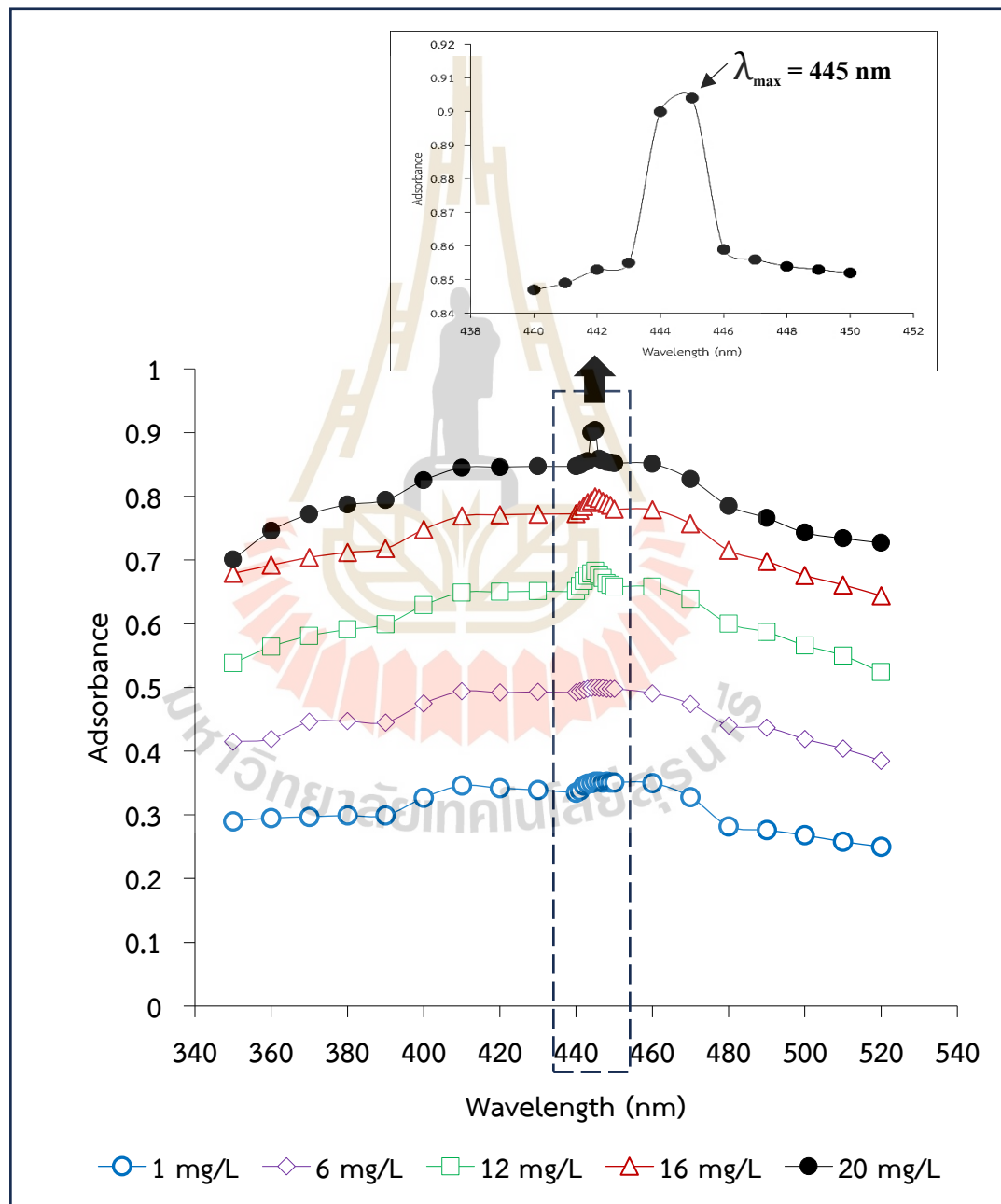
ความเข้มข้นสารละลายไตรโคลซานที่พบในงานวิจัยต่าง ๆ มีค่าในช่วงกว้าง ตั้งแต่ในหน่วยนาโนกรัมต่อลิตร-มิลลิกรัมต่อลิตร และมีวิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นสารแตกต่างกัน จากการทบทวนงานวิจัยพบว่าที่ความเข้มข้นในระดับหน่วยนาโนกรัมต่อลิตร-ไมโครกรัมต่อลิตร นิยมใช้เครื่องมือ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) และ Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS) ซึ่งมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ปริมาณสารไตรโคลซานที่มีความเข้มข้นต่ำ แต่พบข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน (Orhon et al., 2017) ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณสารไตรโคลซานที่มีความเข้มข้นสูง อยู่ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร นิยมใช้เครื่องมือ UV-Vis Spectrophotometer ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ได้ผลอย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำ (Kaur et al., 2018) ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นสารไตรโคลซานด้วยเครื่องมือ UV-Vis Spectrophotometer เนื่องจากค่าความเข้มข้นของสารไตรโคลซานที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล และน้ำเสียชุมชน พบความเข้มข้นสารไตรโคลซานอยู่ในช่วง 2.01-17.60 มิลลิกรัมต่อลิตร (Leehutso et al., 2017) และจากงานวิจัยของ Wyllie (2014), Orhon et al. (2017), Hadibarata et al. (2018) และ Kaur et al. (2018) ได้ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นสารไตรโคลซานด้วยเครื่องมือ UV-Vis Spectrophotometer ด้วยเทคนิค Diazotization method จะได้สารละลายสีเหลืองจนถึงส้มที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Diazonium ion และโมเลกุลสารไตรโคลซาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นหาช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับงานวิจัย เพื่อใช้ในการหาค่าหาความเข้มข้นของสารไตรโคลซานต่อไป



รูปที่ 3.3 เทคนิค Diazotization method (Kaur et al., 2018)

3.4.2.2 การหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสารละลายไตรโคลซาน

ความเข้มข้นของสารละลายไตรโคลซานที่เลือกใช้ในการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการศึกษาค่าความยาวคลื่นในช่วง 320-520 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานในช่วง 12-20 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 445 นาโนเมตร อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น ได้ค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมเท่ากับ 445 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการศึกษาการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารไตรโคลซาน

ผลการศึกษาค่าความยาวคลื่นที่ได้ในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kaur et al. (2018) ซึ่งได้วิเคราะห์ความเข้มข้นสารไตรโคลซานในหน่วยไมโครโมลาร์ มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 320-600 นาโนเมตร และมีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Morales et al. (2012), Wyllie (2015) และ Hadibarata et al. (2018) ซึ่งใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 279-460 นาโนเมตร รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยนี้จึงนำค่าการความยาวคลื่นที่เหมาะสมเท่ากับ 445 นาโนเมตร ไปสร้างกราฟมาตรฐานของการวัดความเข้มข้นของสารไตรโคลซานเป็นลำดับต่อไป

ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบความยาวคลื่นที่เหมาะสมโดยใช้เครื่อง UV-Vis spectrophotometer กับงานวิจัยที่ผ่านมา

| ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (nm) | ช่วงความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่ศึกษา | อ้างอิง |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 445 | 1-20 mg/L | งานวิจัยนี้ |
| 352 | 0.1-3.0 μ M | Kaur et al. (2018) |
| 460 | 10-60 mg/L | Morales et al. (2012) |
| 475 | 10-40 mg/L | Wyllie (2015) |
| 279 | 5-90 mg/L | Hadibarata et al. (2018) |

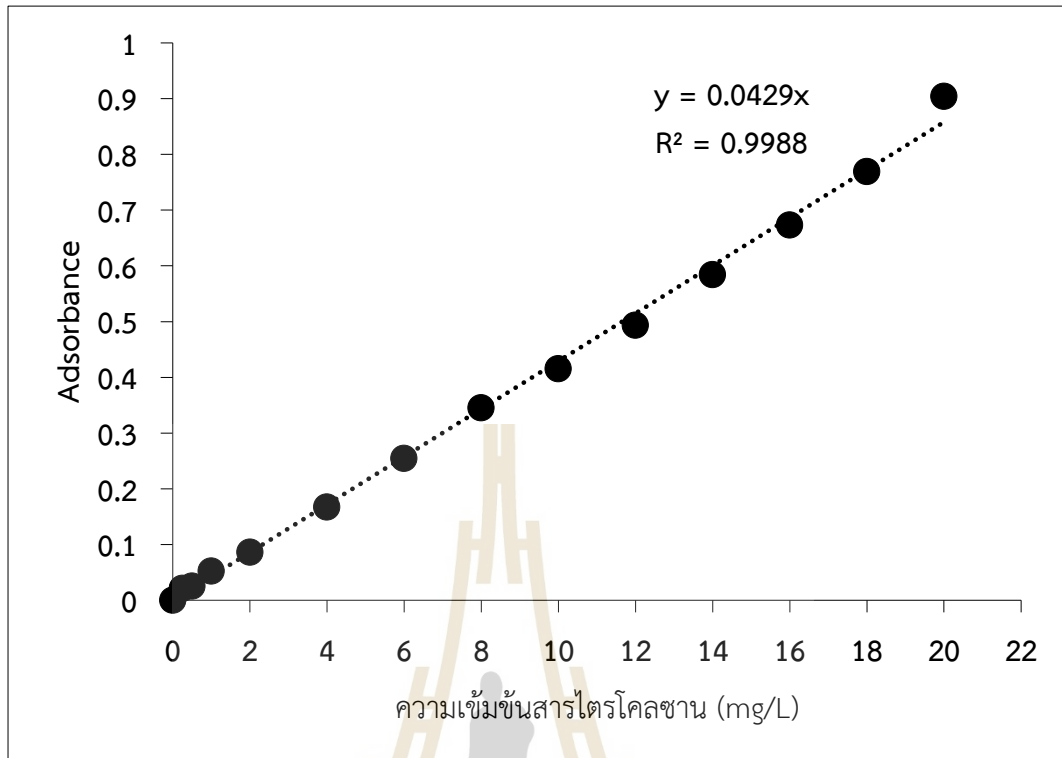
3.4.2.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายไตรโคลซาน

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายไตรโคลซานในช่วงความเข้มข้น 0.25-20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าครอบคลุมช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นที่ทำการศึกษา (1-20 มิลลิกรัมต่อลิตร) วัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 445 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายไตรโคลซาน ได้สมการเส้นตรงเท่ากับ $y=0.0429x$ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และความถดถอย (R^2) เท่ากับ 0.9988 ดังแสดงในรูปที่ 3.5

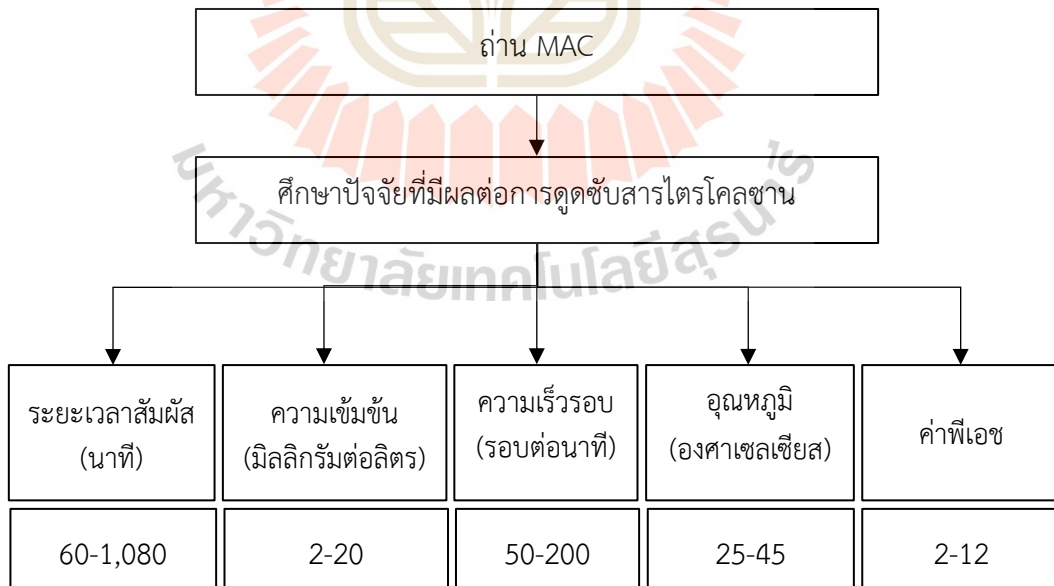
3.4.3 การศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบการดูดซับแบบแบดจ์

3.4.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

นำถ่าน MAC มาศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น ความเร็วรอบการกวน อุณหภูมิของการดูดซับ และค่าพีเอช เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบแบดจ์ ทำการวัดค่าความเข้มข้นสารไตรโคลซานก่อนและหลังการดูดซับด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer มีรายละเอียดชุดทดลองและขั้นตอนการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้นสารละลายไตรโคโลซาน



รูปที่ 3.6 ชุดทดลองการดูดซับสารไตรโคโลซานในระบบการดูดซับแบบแบตช์

1) การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสที่ระยะเวลาแตกต่างกันตั้งแต่ 60 ถึง 1,080 นาที หรือจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซาน เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตรน้ำ 200 มิลลิตร ถ่าน MAC ปริมาณ 0.1 กรัม เขย่าที่ ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง กำหนดค่าพีเอชที่ได้จากการเตรียมสารละลายซึ่งอยู่ในช่วง 10.5 ± 0.2 รายละเอียดสภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 3.3 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสไปคำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.1

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|-------------------------------|
| ระยะเวลาสัมผัส | นาที | 60 - 1,080 (ทุก ๆ 60 นาที) |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 20 |
| ความเร็วรอบการกวน | รอบต่อนาที | 150 |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง |
| ค่าพีเอช | - | 10.5 ± 0.2 |
| ปริมาตร | มิลลิลิตร | 200 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 0.1 |

2) การศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 2 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่าน MAC ปริมาณ 0.1 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง กำหนดค่าพีเอชที่ได้จากการเตรียมสารละลายซึ่งอยู่ในช่วง 10.5 ± 0.2 ที่ระยะเวลาสัมผัส 780 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสัมผัสที่ดีที่สุดจากการทดลองแบบแบดซ์ (หัวข้อ 3.4.3.1) รายละเอียดสภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.4 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นไปคำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.1

ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|----------|
| ระยะเวลาสัมผัส | นาที | 780* |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 2-20 |
| ความเร็วรอบการกวน | รอบต่อนาที | 150 |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง |
| ค่าพีเอช | - | 10.5±0.2 |
| ปริมาตร | มิลลิลิตร | 200 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 0.1 |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1

3) การศึกษาผลของความเร็วยรอบการกวนต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การศึกษาค้นคว้าผลของความเร็วยรอบการกวนที่มีความเร็วยรอบแตกต่างกันในช่วง 50-200 รอบต่อนาที โดยจะใช้ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมเท่ากับ 780 นาที และความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบดซ์ (หัวข้อ 3.4.3.1) ในปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง กำหนดค่าพีเอชที่ได้จากการเตรียมสารละลายซึ่งอยู่ในช่วง 10.5±0.2 ถ่าน MAC 0.1 กรัม รายละเอียดสภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบการกวน ดังแสดงในตารางที่ 3.5 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของความเร็วยรอบการกวนไปคำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.1

ตารางที่ 3.5 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเร็วยรอบการกวน

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|----------|
| ระยะเวลาสัมผัส | นาที | 780* |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 20* |
| ความเร็วรอบการกวน | รอบต่อนาที | 50-200 |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง |
| ค่าพีเอช | - | 10.5±0.2 |
| ปริมาตร | มิลลิลิตร | 200 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 0.1 |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1

4) การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของ ถ่าน MAC

การศึกษาผลของอุณหภูมิของการดูดซับมีค่าแตกต่างกันจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 25, 30, 35 และ 45 องศาเซลเซียส โดยจะใช้ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมเท่ากับ 780 นาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมเท่ากับ 150 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบดซ์ (หัวข้อ 3.4.3.1) ในปริมาตรน้ำ 200 มิลลิลิตร กำหนดค่าพีเอชที่ได้จากการเตรียมสารละลายซึ่งอยู่ในช่วง 10.5 ± 0.2 ถ่านกัมมันต์ MAC 0.1 กรัม รายละเอียดสภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเร็วรอบการกวน ดังแสดงในตารางที่ 3.6 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของอุณหภูมิไปคำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.1 และนำผลของการศึกษาที่ได้ไปคำนวณค่าคงที่ของเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.2

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของการดูดซับ

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|----------------|
| ระยะเวลาสัมผัส | นาที | 780* |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 20* |
| ความเร็วรอบการกวน | รอบต่อนาที | 150* |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | 25-45 |
| ค่าพีเอช | - | 10.5 ± 0.2 |
| ปริมาตร | มิลลิลิตร | 200 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 0.1 |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1

5) การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การศึกษาผลของค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานที่มีค่าแตกต่างกัน ในช่วง 2 ถึง 12 โดยจะใช้ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมเท่ากับ 780 นาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนที่เหมาะสมเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของการดูดซับที่อุณหภูมิห้องและ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบดซ์ (หัวข้อ 3.4.3.1) รายละเอียดสภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.7 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของค่าพีเอชไปคำนวณเพื่อหาค่าความสามารถในการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.1

ตารางที่ 3.7 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอช

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|--------------|
| ระยะเวลาสัมผัส | นาที | 780* |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 20* |
| ความเร็วรอบการกวน | รอบต่อนาที | 150* |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง และ 45* |
| ค่าพีเอช | - | 2-12 |
| ปริมาตร | มิลลิลิตร | 200 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 0.1 |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1

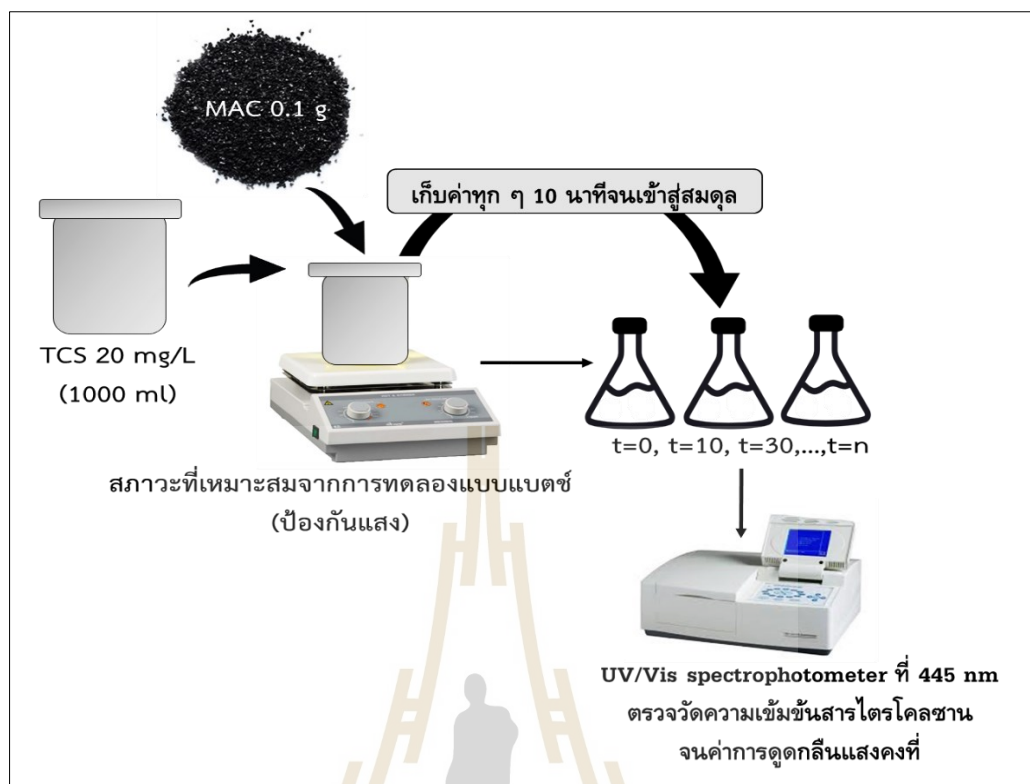
3.4.3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซาน

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารไตรโคลซานเพื่อหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา และนำไปเปรียบเทียบกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) โดยสามารถพิจารณาอันดับปฏิกิริยาที่เหมาะสมได้จากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (R^2) ของผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไตรโคลซานที่ได้จากแต่ละสภาวะในทดลองข้อ 3.4.3.1 ได้แก่ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ความเร็วรอบการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง และค่าพีเอชเท่ากับ 10.5 ± 0.2 และกำหนดปริมาณถ่าน MAC ที่ใช้เท่ากับ 0.1 กรัม สำหรับการทดลอง จากนั้นวัดค่าความเข้มข้นของสารไตรโคลซานที่เหลืออยู่ทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 445 นาโนเมตร รายละเอียดชุดการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.7 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับไปคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ของอัตราเร็วการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.3

ตารางที่ 3.8 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซาน

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|------------------------------|
| ระยะเวลาสัมผัส | นาที | ทุก ๆ 10 นาที จนเข้าสู่สมดุล |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 20* |
| ความเร็วรอบการกวน | รอบต่อนาที | 150* |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง* |
| ค่าพีเอช | - | $10.5 \pm 0.2^*$ |
| ปริมาตร | มิลลิลิตร | 1,000 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 0.1 |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1



รูปที่ 3.7 ชุดทดลองการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

3.4.3.3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซาน

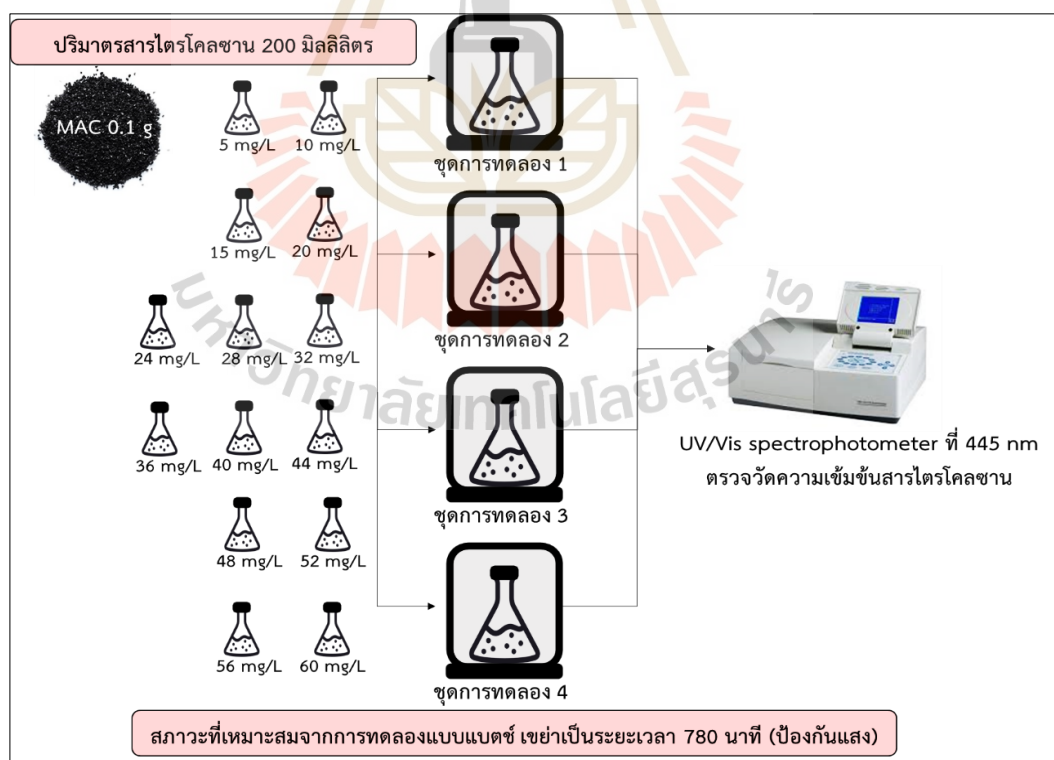
จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานจากการดูดซับแบบแบดซ์ในหัวข้อ 3.4.3.1 สามารถสรุปสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสารไตรโคลซานเพื่อนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC รายละเอียดการศึกษาดังต่อไปนี้ นำสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในช่วง 5-60 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 780 นาที ทำการศึกษาค่าความสามารถภายใต้สถานะการดูดซับที่แตกต่างกันจำนวน 4 ชุดข้อมูล โดยทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องและ 45 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดจากการดูดซับแบบแบดซ์ในหัวข้อ 3.4.3.1 ซึ่งจะต้องให้ความร้อนกับสารละลายไตรโคลซาน ทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น จึงทำการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิห้องเพื่อเป็นแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายนั้น และทำการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 10.5 ± 0.2 เนื่องจากค่าพีเอชเท่ากับ 2 เป็นค่าพีเอชที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดจากการดูดซับแบบแบดซ์ในหัวข้อ 3.4.3.1 แต่พบปัญหาค่าใช้จ่ายสารเคมี ในขณะที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10.5 ± 0.2 เป็นค่าพีเอชเริ่มต้นที่ได้จากการเตรียมสารละลายจึงสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ การศึกษาความสามารถในการดูดซับทั้ง 4 ชุดข้อมูล จะใช้ปริมาณถ่าน MAC 0.1 กรัม สำหรับทุกการทดลอง รายละเอียดสถานะที่ใช้เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับดังแสดงในตารางที่ 3.9 วัดความเข้มข้น

สารไตรโคลซานเริ่มต้นและที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer รายละเอียดการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.8 จากนั้นนำผลการศึกษาที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich Isotherm เพื่อคำนวณค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซาน รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.4

ตารางที่ 3.9 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

| ปัจจัย | หน่วย | ชุดการทดลอง | | | |
|-------------------------|------------------|-------------|----------|------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| อุณหภูมิ* | องศาเซลเซียส | ห้อง | ห้อง | 45 | 45 |
| ค่าพีเอช* | - | 2 | 10.5±0.2 | 2 | 10.5±0.2 |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซาน | มิลลิกรัมต่อลิตร | 5-60 | 5-60 | 5-60 | 5-60 |
| ระยะเวลาสัมผัส* | นาที | 780 | 780 | 780 | 780 |
| ความเร็วรอบการกวน* | รอบต่อนาที | 150 | 150 | 150 | 150 |
| ปริมาตร | มิลลิลิตร | 200 | 200 | 200 | 200 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |

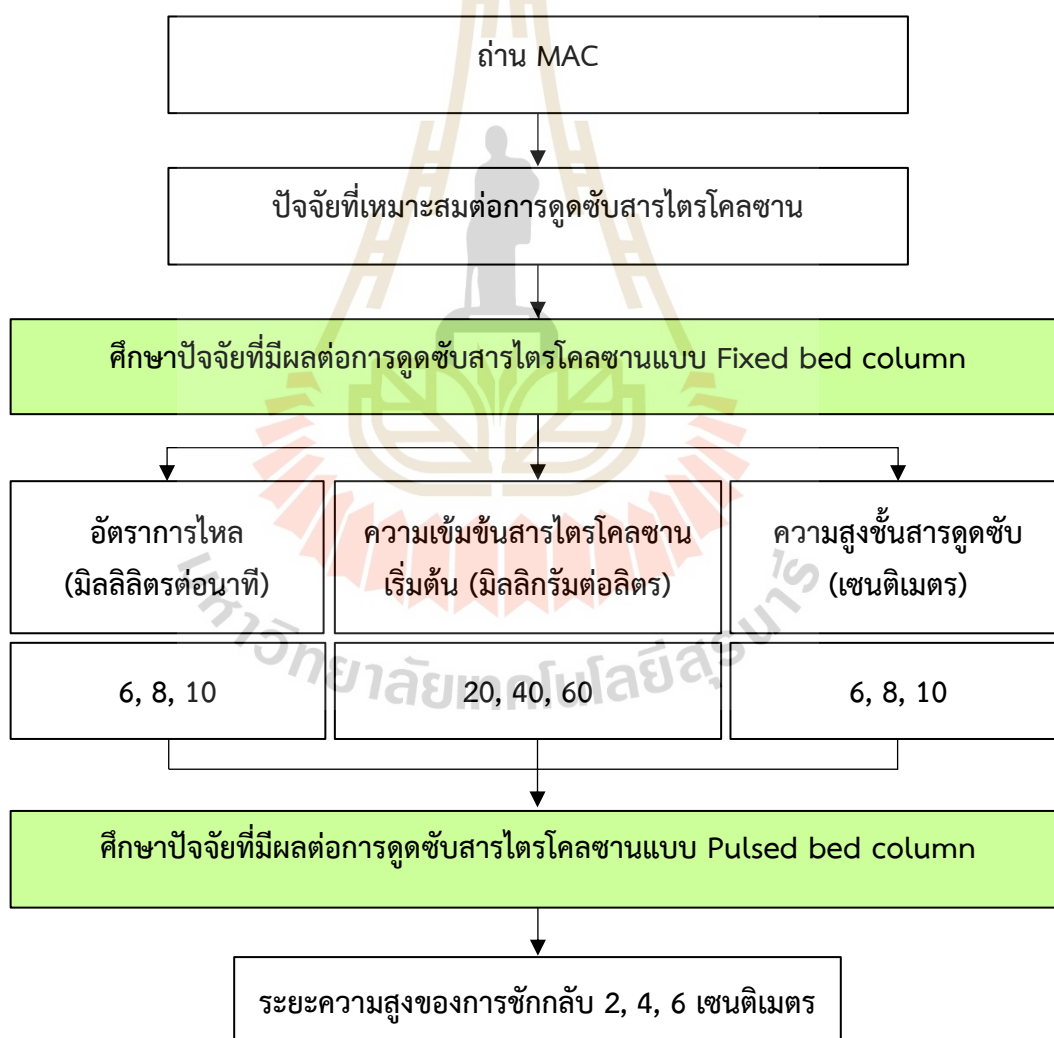
*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1



รูปที่ 3.8 ชุดทดลองการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

3.4.4 การศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์

นำผลการศึกษาการดูดซับแบบแบตช์ในข้อ 3.4.3.1 มาใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ โดยทำการศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์จำนวน 2 แบบ ได้แก่ ระบบคอลัมน์แบบไม่เคลื่อนที่ (Fixed bed column) และระบบคอลัมน์แบบพัลส์ (Pulsed bed column) กำหนดให้มีรูปแบบอัตราการไหลแบบต่อเนื่องชนิด Up-flow โดยเริ่มจากการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซาน ได้แก่ อัตราการไหล ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น และความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC โดยใช้วิธีการศึกษาค่า Breakthrough curve จากนั้นนำมาออกแบบการดูดซับใน Pulsed bed column เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคอลัมน์ และยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ มีรายละเอียดชุดการทดลองในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.9



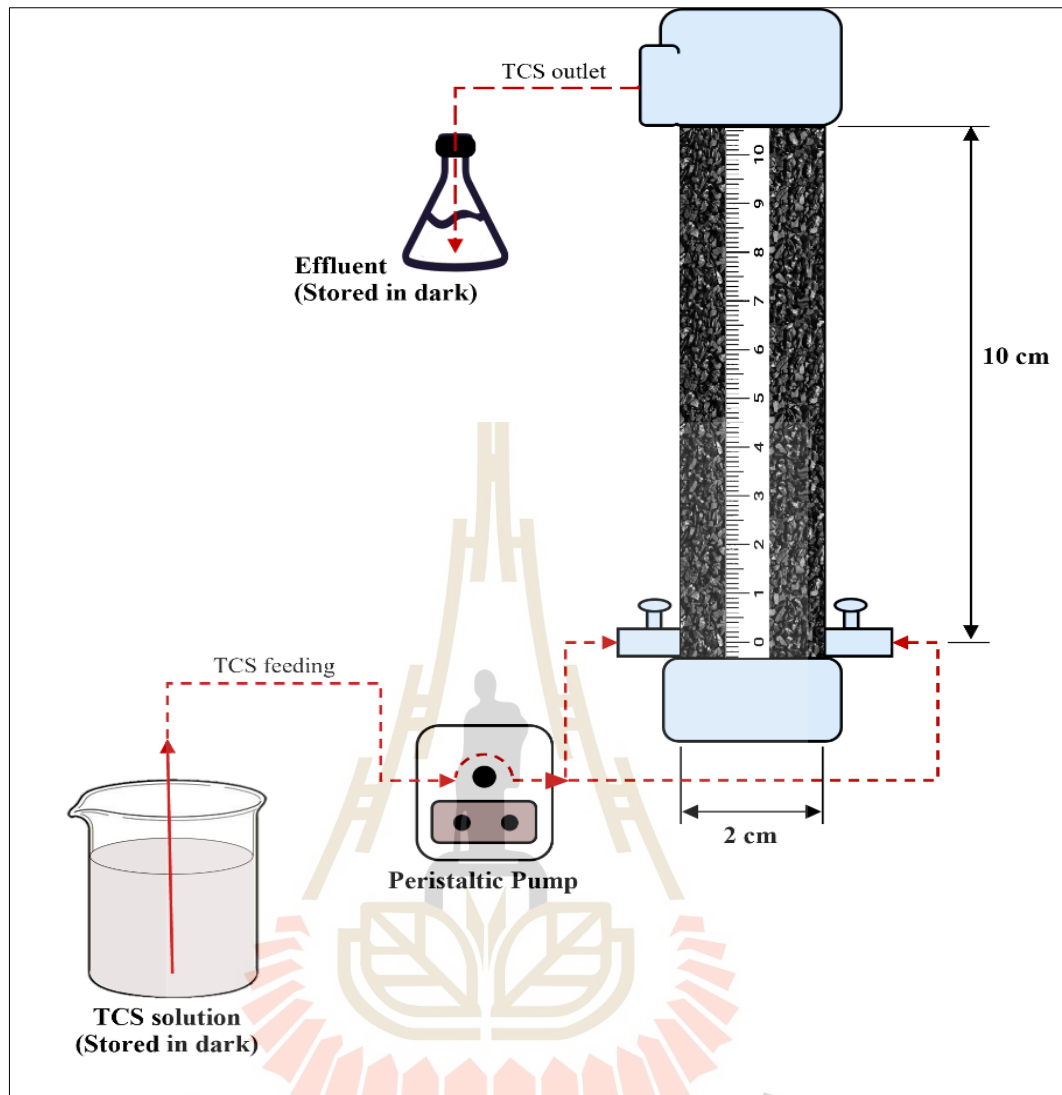
รูปที่ 3.9 ชุดทดลองการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบการดูดซับแบบคอลัมน์

3.4.4.1 การศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานแบบ Fixed bed column

ทำการศึกษาดูดซับสารไตรโคลซานแบบ Fixed bed column เพื่อหา ค่า Breakthrough curve ของการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยถ่าน MAC ควบคุมความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาการดูดซับแบบแบตช์ในหัวข้อ 3.4.3.1 เพื่อลดต้นทุนการใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ ลดต้นทุนการใช้สารละลายปรับค่าพีเอช และพบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 เป็นค่าพีเอชที่พบในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล และพบว่าเป็นช่วงสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ (หัวข้อ 3.4.3.2) และไอโซเทอร์มการดูดซับ (หัวข้อ 3.4.3.3) เพื่อนำมาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแบบ Fixed bed column ได้แก่ อัตราการไหล ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น และความสูงชั้นสารดูดซับ มีรายละเอียดการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.9 ทำการทดลองโดยนำถ่าน MAC น้ำหนัก 14.02 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์ที่ทำจากวัสดุเครื่องแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 เซนติเมตร และมีความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 10 เซนติเมตร ลักษณะการไหลสำหรับระบบการดูดซับเป็นแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) ชนิด Up-flow โดยสารละลายไตรโคลซานจะไหลผ่านคอลัมน์จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน รายละเอียดของชุดการทดลองแบบ Fixed bed column ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยสารละลายไตรโคลซานจะไหลผ่านชั้นถ่าน MAC ขึ้นสู่ด้านบนของคอลัมน์ด้วยแรงดันปั๊ม จากนั้นวัดปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่ไหลออกจากคอลัมน์ (Volume of effluent, V_{eff}) วัดความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น (Initial concentration, C_0) และความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่เหลืออยู่ (Residual concentration, C_e) ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัว มีค่า $C_e/C_0 \geq 0.95$ และนำข้อมูลผลการศึกษาที่ได้ไปทำนายเส้นโค้งการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ด้วยแบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model)

1) การศึกษาผลของอัตราการไหล

การศึกษามูลของอัตราการไหลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานในคอลัมน์แบบ Fixed bed column ของถ่าน MAC โดยศึกษาอัตราการไหลแตกต่างกันในช่วง 6, 8, และ 10 มิลลิเมตรต่อนาที โดยกำหนดความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความสูงชั้นสารดูดซับเท่ากับ 10 เซนติเมตร (ถ่าน MAC ปริมาณ 14.02 กรัม) ค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 ที่อุณหภูมิห้อง วัดปริมาตรสารละลายไตรโคลซานและความเข้มข้นของสารไตรโคลซานที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัว มีค่า $C_e/C_0 \geq 0.95$ (มีประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 5 รายละเอียดของชุดการทดลองผลของอัตราการไหลดังแสดงในตารางที่ 3.10 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของอัตราการไหลไปคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.5 และนำไปทำนายเส้นโค้งการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.6



รูปที่ 3.10 ชุดทดลองการดูดซับแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

ตารางที่ 3.10 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|-----------|
| อัตราการไหล | มิลลิลิตรต่อนาที | 6, 8, 10 |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 20* |
| ความสูงชั้นสารดูดซับ | เซนติเมตร | 10 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 14.02 |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง* |
| ค่าพีเอช | - | 10.5±0.2* |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1

2) การศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น

การศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อการดูดซับสารไตรโคลซานในคอลัมน์แบบ Fixed bed column ของถ่าน MAC โดยศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นแตกต่างกันในช่วง 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกำหนดอัตราการไหลที่เหมาะสมเท่ากับ 10 มิลลิตรต่อนาที ซึ่งได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.4.1 มีความสูงชั้นสารดูดซับเท่ากับ 10 เซนติเมตร (ถ่าน MAC ปริมาณ 14.02 กรัม) ค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 ที่อุณหภูมิห้อง วัดปริมาตรสารละลายไตรโคลซานและความเข้มข้นของสารไตรโคลซานที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัว มีค่า $C_e/C_0 \geq 0.95$ (มีประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 5) รายละเอียดของชุดการทดลองผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นดังแสดงในตารางที่ 3.11 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นไปคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.5 และนำไปทำนายเส้นโค้งการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.6

ตารางที่ 3.11 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อการดูดซับของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|------------------|
| อัตราการไหล | มิลลิตรต่อนาที | 10** |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 20, 40, 60 |
| ความสูงชั้นสารดูดซับ | เซนติเมตร | 10 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 14.04 |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง* |
| ค่าพีเอช | - | $10.5 \pm 0.2^*$ |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1; **หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.4.1

3) การศึกษาผลของความสูงชั้นสารดูดซับ

การศึกษาผลของความสูงชั้นสารดูดซับต่อการดูดซับสารไตรโคลซานในคอลัมน์แบบ Fixed bed column ของถ่าน MAC โดยศึกษาความสูงชั้นสารดูดซับที่แตกต่างกันในช่วง 6, 8, และ 10 เซนติเมตร ซึ่งมีน้ำหนักถ่าน MAC เท่ากับ 8.41, 11.21 และ 14.02 กรัม ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราการไหลที่เหมาะสมเท่ากับ 10 มิลลิตรต่อนาที และความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่เหมาะสมเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.4.1 มีค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 ที่อุณหภูมิห้อง วัดปริมาตรสารละลายไตรโคลซานและความเข้มข้นของสารไตรโคลซานที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัว มีค่า $C_e/C_0 \geq 0.95$ (มีประสิทธิภาพการกำจัดน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 5) รายละเอียดของชุดการทดลองผลของความสูงชั้นสารดูดซับแสดงในตารางที่ 3.12 นำข้อมูลที่ได้จาก

การศึกษาผลของความสูงชั้นสารดูดซับไปคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.6.5 และนำไปทำนายเส้นโค้งการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.6

ตารางที่ 3.12 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของความสูงชั้นสารดูดซับต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|-----------------------|
| อัตราการไหล | มิลลิลิตรต่อนาที | 10 ^{**} |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 60 ^{**} |
| ความสูงชั้นสารดูดซับ | เซนติเมตร | 6, 8, 10 |
| น้ำหนักถ่าน | กรัม | 8.41, 11.21, 14.04 |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง* |
| ค่าพีเอช | - | 10.5±0.2 [*] |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1; **หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.4.1

3.4.4.2 การศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานแบบ Pulsed bed column

ทำการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานแบบ Pulsed bed column ของถ่าน MAC เพื่อหาค่าคงที่ Breakthrough curve ของการดูดซับไตรโคลซานด้วยถ่าน MAC โดยควบคุมอัตราการไหลเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับเริ่มต้นเท่ากับ 10 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column ในหัวข้อ 3.4.4.1 ควบคุมค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5±0.2 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาการดูดซับแบบแบตช์ในหัวข้อ 3.4.3.1 เพื่อนำมาหาค่าระยะความสูงของการซັกกลับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับแบบ Pulsed bed column รายละเอียดชุดการทดลองแบบ Pulsed bed column ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ทำการดูดซับจนกระทั่งมีค่า $C_t/C_0=0.50$ หรือมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 และถ่าน MAC ชุดใหม่จะถูกบรรจุทางด้านบนของคอลัมน์ในปริมาณที่เท่ากับถ่าน MAC ที่ถูกซັกออก ทำการซັกกลับตามระยะความสูงที่กำหนดจำนวน 4 ครั้ง หรือ 4 Cycles

1) การศึกษาผลของระยะความสูงของการซັกกลับของถ่าน MAC

การศึกษาผลของระยะความสูงการซັกกลับของถ่าน MAC ต่อการดูดซับสารไตรโคลซานในการดูดซับ Pulsed bed column เพื่อศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด และอายุการใช้งานของคอลัมน์ โดยศึกษาผลของระยะความสูงการซັกกลับของถ่าน MAC ที่แตกต่างกันเท่ากับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร โดยกำหนดอัตราการไหลเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความสูงชั้นสารดูดซับเริ่มต้นเท่ากับ 10 เซนติเมตร ซึ่งได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.4.1 มีค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5±0.2 ที่อุณหภูมิห้อง วัดปริมาตรสารละลายไตรโคลซานและความเข้มข้นของสารไตรโคลซาน

ที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ ทำการดูดซับจนกระทั่งการดูดซับมีค่า $C_t/C_0=0.50$ นำไปคำนวณหาค่าคงที่ Breakthrough curve จากนั้นทำการหยุดป้อนสารละลายไตรโคลซานและทำการปล่อยถ่าน MAC ออกทางด้านล่างของคอลัมน์ ปริมาณถ่าน MAC ที่ถูกปล่อยตามความสูงที่กำหนดไว้เท่ากับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร จากนั้นเติมถ่าน MAC ทางด้านบนของคอลัมน์ กำหนดถ่าน MAC ที่เติมเข้าคอลัมน์มีปริมาณตามความสูงที่ปล่อยออก และเริ่มป้อนสารละลายไตรโคลซานไหลเข้าคอลัมน์อีกครั้ง ควบคุมลักษณะการปล่อยถ่าน MAC ของ Pulsed bed column ทำในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบจำนวน 4 Cycle รายละเอียดของชุดการทดลองผลของระยะความสูงของการซັกกลับ ดังแสดงในตารางที่ 3.13 นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของระยะความสูงของการซັกกลับไปคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับ รายละเอียดการคำนวณแสดงในหัวข้อ 3.7.5

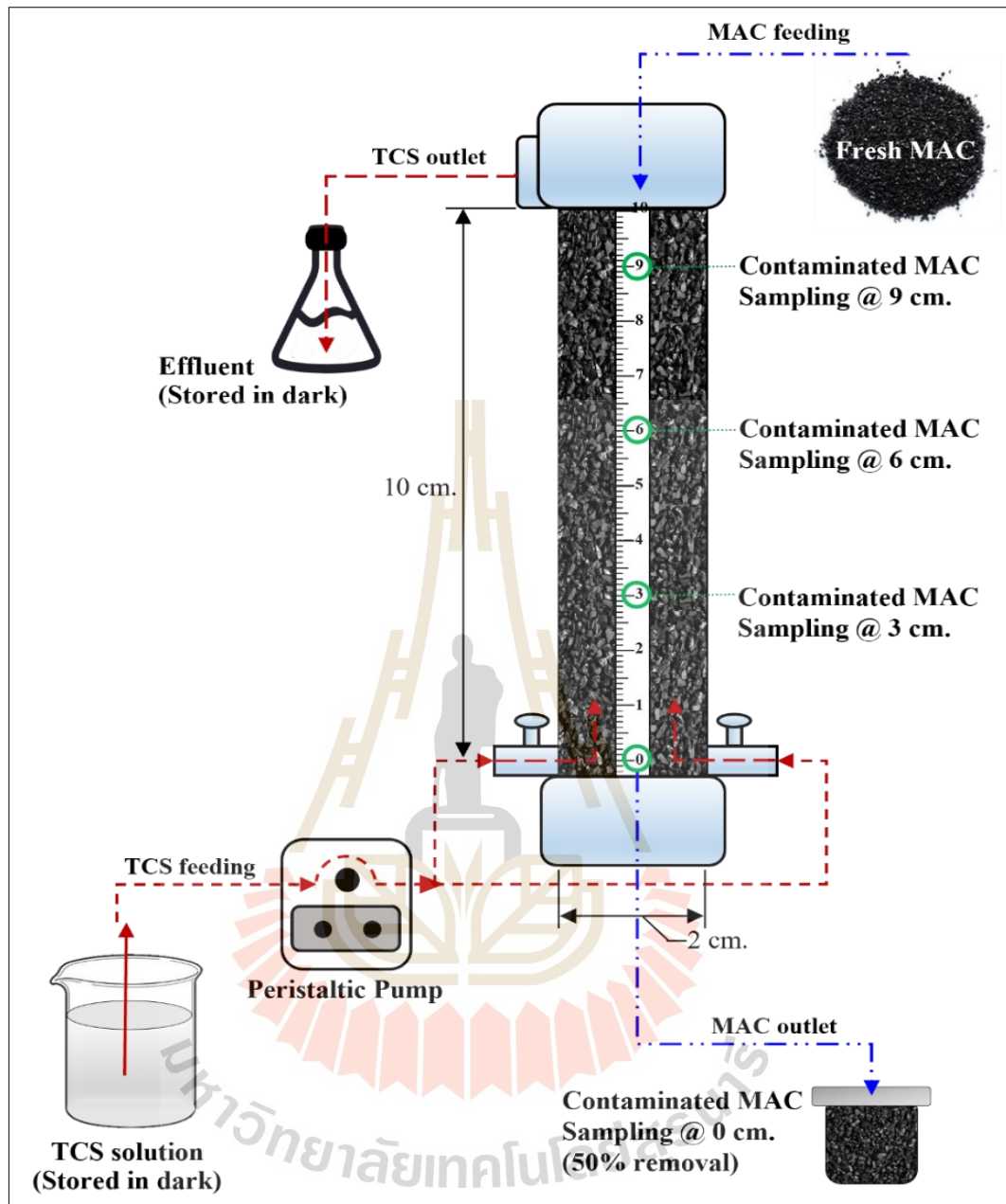
ตารางที่ 3.13 สภาวะที่ใช้เพื่อศึกษาผลของระยะความสูงการซັกกลับของถ่าน MAC ต่อการดูดซับสารไตรโคลซานแบบ Pulsed bed column

| ปัจจัย | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|------------------|-----------|
| อัตราการไหล | มิลลิลิตรต่อนาที | 10** |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น | มิลลิกรัมต่อลิตร | 60** |
| ความสูงชั้นสารดูดซับเริ่มต้น | เซนติเมตร | 10** |
| ระยะความสูงของการซັกกลับ | เซนติเมตร | 6, 8, 10 |
| อุณหภูมิ | องศาเซลเซียส | ห้อง* |
| ค่าพีเอช | - | 10.5±0.2* |

*หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.3.1; **หมายเหตุ: ได้จากผลการศึกษาหัวข้อ 3.4.4.1

3.5 การศึกษาสภาพการดูดซับของถ่าน MAC ที่ใช้ในการดูดซับแบบ Pulsed bed column

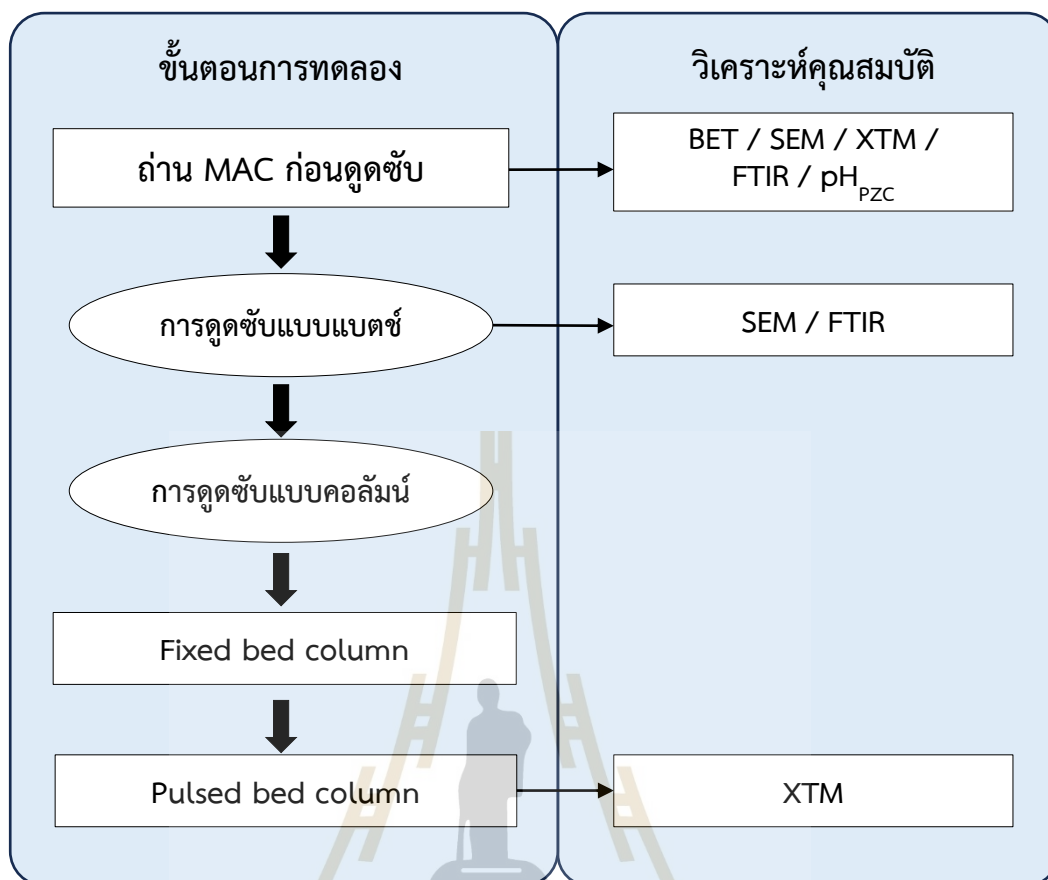
นำถ่าน MAC ก่อนการดูดซับและหลังผ่านการดูดซับที่ได้จากการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการซັกกลับ 2 เซนติเมตร ทำการเก็บตัวอย่างถ่าน MAC หลังเสร็จสิ้นการซັกกลับของ Cycle ที่ 1, 2, 3 และ 4 เพื่อศึกษาลักษณะรูพรุนของถ่าน MAC จากนั้นเก็บตัวอย่างถ่าน MAC หลังเสร็จสิ้นการดูดซับใน Cycle ที่ 4 ที่ระดับความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 เซนติเมตร เพื่อศึกษาปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC หลังจากการใช้งานในคอลัมน์แบบ Pulsed bed column มีรายละเอียดจุดเก็บถ่าน MAC หลังการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 3.11 ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM (BL1.2W: X-ray Tomographic Microscopy, Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), รุ่น TESCAN, ยี่ห้อ GENT, ประเทศเบลเยียม)



รูปที่ 3.11 รายละเอียดชุดการทดลอง Pulsed bed column และจุดเก็บตัวอย่าง

3.6 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่าน MAC

ทำการศึกษาโครงสร้างพื้นผิว และองค์ประกอบของถ่าน MAC ก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยทำการวิเคราะห์ค่าพื้นผิวประจุศูนย์บนผิวถ่าน MAC และลักษณะสมบัติอื่น ๆ ของถ่าน MAC โดยใช้เครื่องมือ BET, SEM, FTIR, และ XTM มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทดลองที่ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่าน MAC

3.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค BET analysis

นำตัวอย่างถ่าน MAC หลังผ่านการกระตุ้นแล้วมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.2 กรัม ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนก่อนดูดซับ ด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) method (เครื่อง BET รุ่น Bel Sorp mini II, ยี่ห้อ Bel-Japan, ประเทศญี่ปุ่น) ศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย เป็นต้น

3.6.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope)

นำตัวอย่างถ่าน MAC ก่อนและหลังการดูดซับในสภาวะการดูดซับแบบแบตช์ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดมาเข้าตู้อบเพื่อไล่ความชื้น ทำการศึกษาภาพการเปลี่ยนแปลงภายในรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่าน MAC เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการดูดซับด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 500-30,000 เท่า ที่สเกล 50 ไมโครเมตร (เครื่อง SEM รุ่น JEOL JSM-6010LV, ประเทศเยอรมนี)

3.6.3 การวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH of Point of Zero Charge: pH_{pzc})

เตรียมสารละลายเกลือ 0.1 โมลาร์ ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 2-12 ลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นป้อนตัวอย่างถ่าน MAC ก่อนการดูดซับปริมาณ 5 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 วัน เพื่อให้ถ่าน MAC ดูดซับสารละลายเกลือจนอิ่มตัว จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายมาวัดค่าพีเอชหลังการดูดซับ นำผลการศึกษามาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชก่อนและหลังการดูดซับ (Taylor and Soltani, 2023) กำหนดให้เส้นตรงของเส้นแนวโน้ม (Trend line) ลากผ่านจุด 0,0 ของแกน x และแกน y ตามลำดับ จะส่งผลให้เส้นตรงของเส้นแนวโน้มตัดกับเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งจุดที่ตัดกันจะมีประจุบวกของ H^+ และประจุลบของ OH^- ในปริมาณที่เท่ากัน ส่งผลทำให้ค่าพีเอชที่พบแสดงค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์

3.6.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FTIR (BL4.1: Infrared Spectroscopy and Imaging, Synchrotron Light Research Institute)

นำตัวอย่างถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และหลังดูดซับจากการทดลองผลของค่าพีเอชในสภาวะการดูดซับแบบแบตช์ที่ช่วงค่าพีเอชเท่ากับ 2-12 นำถ่าน MAC ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR (ยี่ห้อ Bruker, รุ่น Tensor 27) เนื่องจากถ่าน MAC ที่นำไปวิเคราะห์มีลักษณะทึบแสงและมีสีดำ จึงได้บดตัวอย่างผสมกับผงโพแทสเซียมไอโอไดน์ (KI powder) จากนั้นอัดไฮดรอลิกจนได้แผ่นตัวอย่างที่มีลักษณะบางที่ทำให้ลำแสงสามารถทะลุผ่านได้ ลักษณะแผ่นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.13 ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรด (Middle Infrared Region) ในช่วงความยาวคลื่น 4,000-400 cm^{-1} โมเลกุลภายในตัวอย่างจะดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดที่ความถี่แตกต่างกัน จากนั้นเครื่องมือจะตรวจวัดค่าความเข้มแสงต่อความยาวคลื่นของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่แสดงการยืดของหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน จากนั้นทำการอินทิเกรตพื้นที่ใต้จุดพีคของแต่ละหมู่ฟังก์ชันเพื่อประมวลผลปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พบ และนำผลการศึกษา FTIR ที่ได้มาจัดกลุ่มความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค Hierarchical Cluster Analysis (HCA)



รูปที่ 3.13 การเตรียมตัวอย่างถ่าน MAC ที่ใช้ในการวิเคราะห์ FTIR แบบส่องผ่าน

3.6.5 การวิเคราะห์การดูดซับบนพื้นผิวโดยเครื่อง XTM (BL1.2W: X-ray Tomographic Microscopy, Synchrotron Light Research Institute)

นำตัวอย่างถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และหลังดูดซับจากการทดลองในระบบ Pulsed bed column หลังเสร็จสิ้นการซีกกลับของ Cycle ที่ 1, 2, 3 และ 4 และถ่าน MAC ใน Cycle ที่ 4 ของความสูงระยะซีกกลับ 2 เซนติเมตร จำนวน 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ที่ระดับความสูงชั้นสารดูดซับ 0, 3, 6, และ 9 เซนติเมตร เริ่มจากด้านล่างสุดของคอลัมน์ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XTM (รุ่น TESCAN, ยี่ห้อ GENT, ประเทศเบลเยียม) โดยตัวอย่างถ่าน MAC ที่นำมาวิเคราะห์มีปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ 0.219 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ควบคุมและตั้งค่าระบบวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Noisak et al. (2023) ประมวลผลค่าความพรุนโดยซอฟต์แวร์ Octopus Reconstruction software เพื่อวิเคราะห์ค่าความพรุนของถ่าน MAC ทั้งในรูปของรูพรุนแบบเปิดและแบบปิด เปรียบเทียบสภาพการดูดซับของถ่าน MAC ในแต่ละระดับความสูงของชั้นสารดูดซับกับถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และแสดงผลออกมาเป็นภาพเอ็กซ์เรย์เสมือน 3 มิติ (Three-dimensional tomographic reconstruction) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Drishti software ซึ่งความแม่นยำของการวิเคราะห์นี้ได้รับการยืนยันผ่านความร่วมมือกับสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนในประเทศไทย

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการศึกษา

3.7.1 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซาน

จากผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารไตรโคลซาน ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซาน ความเร็วรอบการกวน อุณหภูมิของการดูดซับ และค่าความเป็นกรด-ด่าง นำข้อมูลความเข้มข้นไตรโคลซานที่ได้ทั้งก่อนและหลังของแต่ละการทดลองมาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ (q_e) ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t)V}{W \times 1000} \quad (3.1)$$

| | | |
|--------|-------|--|
| โดยที่ | q_e | คือ ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | C_0 | คือ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | C_t | คือ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่หลงเหลืออยู่หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | V | คือ ปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่ใช้ในการบำบัด (มิลลิลิตร) |
| | W | คือ น้ำหนักของถ่าน MAC ที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม) |

3.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics)

นำข้อมูลค่าความสามารถในการดูดซับของชุดการทดลองหาอุณหภูมิในการดูดซับ จำนวน 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 25, 30, 35, 40, และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มาคำนวณในสมการอุณหพลศาสตร์หรือสมการเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบและ

สิ่งแวดล้อมในรูปของความร้อนและงาน อีกทั้งสามารถบอกทิศทางของการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะหนึ่ง ๆ ได้ดังแสดงในสมการที่ 3.2 ซึ่งเป็นสมการสำหรับกระบวนการที่มีอุณหภูมิคงที่ และสมการที่ 3.3 แสดงค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.2)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (3.3)$$

| | | |
|--------|------------|---|
| โดยที่ | ΔG | คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (กิโลจูลต่อโมล) |
| | ΔH | คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง Enthalpy (กิโลจูลต่อโมล) |
| | ΔS | คือ ค่าการเปลี่ยนแปลง Entropy (จูลต่อโมลต่อเคลวิน) |
| | T | คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) |
| | K_c | คือ ค่าคงที่ของสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ |
| | R | คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อเคลวิน) |

3.7.3 การวิเคราะห์ข้อมูลผลของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic)

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารไตรโคลซานของชุดการทดลองในสภาวะแบบแบตช์ นำข้อมูลมาเข้าสมการเพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้เข้าใจกลไกการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับไตรโคลซานมากยิ่งขึ้น โดยพิจารณาจากสมการจลนพลศาสตร์ 2 สมการ ได้แก่ สมการการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ดังแสดงในสมการที่ 3.4 โดยเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t และสมการการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-secondary order) ดังแสดงในสมการที่ 3.5 โดยเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t ซึ่งจากทั้งสองสมการเมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้เป็นกราฟเส้นตรง เปรียบเทียบความเหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (3.4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3.5)$$

| | | |
|--------|-------|--|
| โดยที่ | q_e | คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | q_t | คือ ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |

- k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)
 k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที)
 t คือ ระยะเวลาสัมผัส (นาที)

3.7.4 การวิเคราะห์ผลของค่าความสามารถในการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich model

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซาน นำมาวิเคราะห์ค่าความสามารถในการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich model เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน โดยไอโซเทอร์มของ Langmuir ดังแสดงในสมการที่ 3.6 โดยเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e และไอโซเทอร์มของ Freundlich ดังแสดงในสมการที่ 3.7 โดยเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ เปรียบเทียบความเหมาะสมของไอโซเทอร์มได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_t} + \frac{1}{q_t k_L} \quad (3.6)$$

$$\ln q_e = \ln k_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3.7)$$

- โดยที่ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 k_L คือ ค่าคงที่การดูดซับของ Langmuir (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
 k_f คือ ค่าคงที่การดูดซับของ Freundlich (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 n คือ ความแรงของการดูดซับ
 t คือ ระยะเวลาสัมผัส (นาที)

3.7.5 การวิเคราะห์ข้อมูลผลศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบคอลัมน์

จากผลการศึกษาการดูดซับในระบบ Fixed bed column และ Pulsed bed column จะได้ Breakthrough curve วิเคราะห์ผลโดยการนำมาทดสอบปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough point และที่สภาวะเบดอิ่มตัว มีรายละเอียด ดังนี้

3.7.5.1 การหาค่าปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough point

การหาค่าปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough point สามารถทำได้โดยสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมพันธ์กับพื้นที่เหนือเส้นกราฟ ดังแสดงในสมการที่ 3.8 สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เวลาที่เกิด Breakthrough คือ เวลาที่เริ่มตรวจพบความเข้มข้นสารไตรโคลซานในระดับร้อยละ 5 ของความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ($C_e/C_0 = 0.05$) ดังนั้น จะได้ค่า $C_e = 0.05C_0$ แล้วแทนลงในสมการที่ 3.8 จะได้เป็นสมการที่ 3.9 ดังนี้

$$q_b = \left(\frac{QC_0}{1000W_{AC}} \right) A_1 = \frac{QC_0}{1000W_{AC}} \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.8)$$

$$q_b = \left(\frac{0.95}{1000} \right) \left(\frac{QC_0 t_b}{W_{AC}} \right) \quad (3.9)$$

| | | |
|--------|----------|---|
| โดยที่ | q_b | คือ ปริมาณการดูดซับที่ Breakthrough point (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | Q | คือ อัตราการไหลเข้าคอลัมน์ (มิลลิลิตรต่อนาที) |
| | C | คือ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่หลงเหลืออยู่ที่ระยะเวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | C_0 | คือ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | W_{AC} | คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ (กรัม) |
| | A_1 | คือ พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา $0 - t_b = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt$ |
| | t_b | คือ เวลาที่เกิด Breakthrough point (นาที) |

3.7.5.2 การหาค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัว

สภาวะเบดอิมตัวเป็นสภาวะที่วัสดุดูดซับเกิดการดูดซับจนถึงจุดที่ไม่สามารถดูดซับได้อีก สามารถหาค่าปริมาณการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัวได้ดังแสดงในสมการที่ 3.10 สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดสภาวะเบดอิมตัวของ Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานในระดับร้อยละ 95 ของความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ($C_e/C_0 = 0.95$) และสภาวะเบดอิมตัวของ Pulsed-bed column ที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานในระดับร้อยละ 50 ของความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ($C_e/C_0 = 0.50$) ซึ่งคอลัมน์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหลือเพียงร้อยละ 5 และ 50 ตามลำดับ

$$q_b = \left(\frac{QC_0}{1000W_{AC}} \right) (A_1 + A_2) = \frac{QC_0}{1000W_{AC}} \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (3.10)$$

เมื่อ $A_1 + A_2$ คือ พื้นที่เหนือกราฟช่วงเวลา $0 - t_e = \int_0^{t_e} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt$

| | | |
|--------|----------|--|
| โดยที่ | q_b | คือ ความสามารถในการดูดซับที่ Breakthrough point (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
| | Q | คือ อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที) |
| | C_0 | คือ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | C | คือ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่หลงเหลืออยู่ที่ระยะเวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) |
| | t_b | คือ เวลาที่ Breakthrough point (นาที) |
| | t_e | คือ เวลาที่สภาวะเบดอิ่มตัว (นาที) |
| | W_{AC} | คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ (กรัม) |

3.7.6 การทำนายเส้นโค้งการดูดซับของแบบจำลองโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model)

การทำนายเส้นโค้งการดูดซับของ Fixed bed column สามารถใช้แบบจำลองอย่างง่าย ได้แก่ แบบจำลองโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model) ในการทำนายระยะเวลาที่สารที่ถูกดูดซับเริ่มหลุดออกจากระบบ หรือที่จุดเบรกทรู (Ghribi et al., 2011) มีรายละเอียดดังนี้

3.7.6.1 แบบจำลองของโทมัส (Thomas model)

แบบจำลองของโทมัสเป็นแบบจำลองภายใต้สมมติฐานที่ว่าเกิดจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Langmuir อัตราการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ไม่เกิดการผสมตามแนวแกน ($D_L = 0$) และอุณหภูมิกิ่งที่ การคำนวณดังแสดงในสมการที่ 3.11-3.12 มีรายละเอียดดังนี้

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp \left[\frac{K_{TH} q_{TH} M}{Q} \right] - K_{TH} C_0 t} \quad (3.11)$$

| | | |
|-----|----------|--|
| โดย | C_t | คือ ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับ ที่เวลาใด ๆ (กรัมต่อลิตร) |
| | C_0 | คือ ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับ ที่เวลาเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร) |
| | K_{TH} | คือ ค่าคงที่ของ Thomas model (มิลลิลิตร/มิลลิกรัม-นาที) |

| | |
|----------|--|
| q_{TH} | คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดบนผิวตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
| M | คือ ปริมาณตัวดูดซับในคอลัมน์ (กรัม) |
| Q | คือ อัตราการไหล (มิลลิเมตรต่อนาที) |
| t | คือ เวลาการดูดซับ ที่เวลาใด ๆ (นาที) |

จากสมการที่ 3.11 นำมาจัดเรียงใหม่ในรูปสมการเชิงเส้น $y=b+ax$ ดังแสดงในสมการที่ 3.12

$$\ln \left[\frac{C_0}{C_t} - 1 \right] = \left[\frac{K_{TH} q_{TH} M}{Q} \right] - K_{TH} C_0 t \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.12 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{C_0}{C_t} - 1 \right]$ กับ t ทำให้สามารถคำนวณหาค่าคงที่ K_{TH} (mL/mg-min) และ q_{TH} (mg/g) ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y

3.7.6.2 แบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model)

แบบจำลองของยูน-เนลสัน เป็นแบบจำลองภายใต้สมมติฐานว่าอัตราการลดลงของความน่าจะเป็นในการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับความน่าจะเป็นในการดูดซับของตัวดูดซับ การคำนวณดังแสดงในสมการที่ 3.13 มีรายละเอียดดังนี้

$$\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right] = K_{YN} t - \frac{t_1}{2} K_{YN} \quad (3.13)$$

| | | |
|-----|-----------|---|
| โดย | C_t | คือ ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับ ที่เวลาใด ๆ (กรัมต่อลิตร) |
| | C_0 | คือ ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับ ที่เวลาเริ่มต้น (กรัมต่อลิตร) |
| | K_{YN} | คือ ค่าคงที่ของ Yoon-Nelson model (ต่อนาที) |
| | t | คือ เวลาการดูดซับ ที่เวลาใด ๆ (นาที) |
| | $t_{1/2}$ | คือ เวลาการดูดซับ ที่ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับเท่ากับร้อยละ 50 ของ Breakthrough curve (τ , นาที) |

จากสมการที่ 3.13 นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right]$ กับ t ทำให้สามารถ

คำนวณหาค่าคงที่ K_{YN} (min^{-1}) และเวลาที่ต้องการสำหรับการดูดซับของตัวที่ถูกดูดซับที่ร้อยละ 50 (τ , min) ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y

บทที่ 4

ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง โดยทำการศึกษาดูดซับสารไตรโคลซานด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย และปัจจัยที่เกี่ยวข้องในระบบการดูดซับแบบแบตช์ ทำการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค BET

ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลก๊าซ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 240 นาที พบว่า ถ่าน MAC หลังการกระตุ้นมีปริมาณร้อยละผลผลิตเฉลี่ย (%Yield) เท่ากับ 39.69 และเมื่อนำมาตัวอย่างถ่าน MAC ที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติด้วยเครื่อง BET ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่ามีปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume, V_{total}) เท่ากับ 0.427 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area, S_{BET}) เท่ากับ 985.40 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Pore diameter, D_p) เท่ากับ 2.15 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาการจำแนกขนาดรูพรุนตามมาตรฐานของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) พบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่าน MAC จัดเป็นรูพรุนขนาดกลางถึงเล็ก คือ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร (Yokoyama et al., 2019; Mubarak et al., 2021) และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนมาก โดยมีพื้นที่ผิวของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore surface area, S_{micro}) เท่ากับ 773.56 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore volume, V_{micro}) มีค่าเท่ากับ 0.40 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เมื่อเทียบสัดส่วนปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กกับรูพรุนทั้งหมด (V_{micro}/V_{total}) คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 93.44 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนมีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับสารละลาย ซึ่งตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากจะเกิดการดูดซับเฟสของเหลว และเฟสก๊าซได้ดี (Mubarak et al., 2021)

เมื่อนำผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ที่ได้กระตุ้นแล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของงานวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าถ่าน MAC ที่กระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ สามารถสรุปรายละเอียดได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค BET จะเห็นได้ว่าถ่าน MAC ของงานวิจัยนี้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 985.40 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 900-2547 ถ่านกัมมันต์สำหรับอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งจะต้องมีค่า

ไอโอดีนนัมเบอร์ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือเทียบเป็นพื้นที่ผิวไม่น้อยกว่า 600 ตารางเมตรต่อกรัม (เจือจันท์ เกตซา, 2556 ;ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์, 2562) แต่อย่างไรก็ตามค่าพื้นที่ผิวของถ่าน MAC ที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าที่พบในงานวิจัยของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) ซึ่งได้ใช้อ่างอิงวิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ จะเห็นได้ว่าถ่าน MAC ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าร้อยละผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่า แต่มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดน้อยกว่า ส่วนขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน อาจมีสาเหตุมาจากแหล่งที่มาของวัตถุดิบกะลาแมคคาเดเมียที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยนี้ได้กะลาแมคคาเดเมียมาจากอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ในขณะที่งานวิจัยของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) ได้มาจากโครงการแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย เมื่อวัตถุดิบมีคุณสมบัติก่อนกระตุ้นแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติถ่านกัมมันต์หลังกระตุ้นมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ในกรณีนี้ผู้วิจัย และ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) ซึ่วัตถุดิบในรูปของถ่านแมคคาเดเมียสำเร็จรูป จึงไม่อาจจะบรรยายละเอียดของวัตถุดิบได้

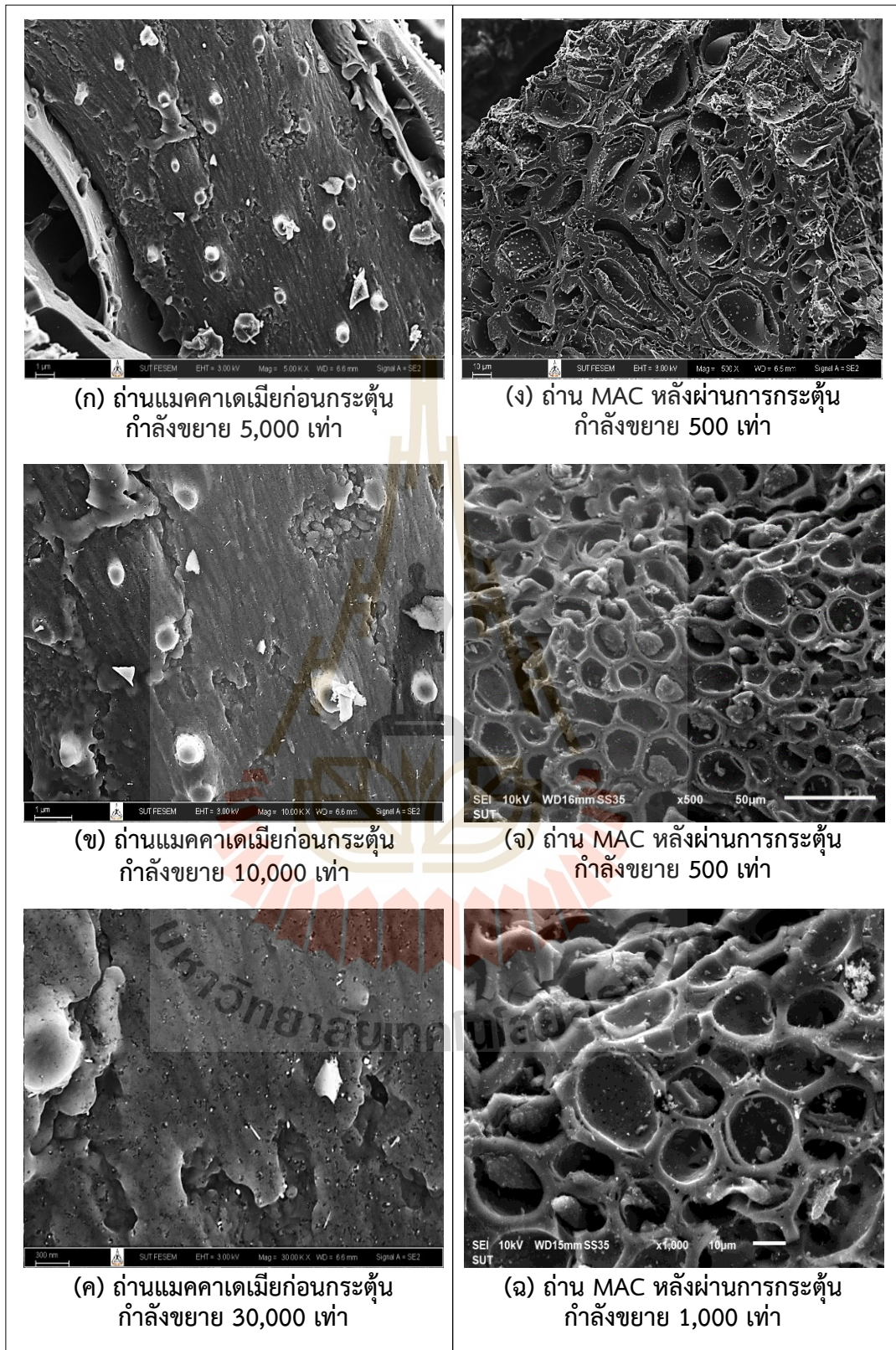
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่าน MAC หลังถูกกระตุ้น

| ลักษณะสมบัติ | | งานวิจัยนี้ | ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) | มอก. 900-2547** | ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์ (2562) | เจือจันท์ เกตซา (2556) |
|----------------------------------|---|-------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------|
| แหล่งที่มาของวัตถุดิบ | | เขาค้อ, เพชรบูรณ์ | แม่ฟ้าหลวง, เชียงราย | - | - | - |
| Yield (%) | | 39.69 | 31.33 | - | - | - |
| Iodine Number | | - | - | 600 | 600 | 600 |
| Surface area (m ² /g) | S _{BET} | 985.40 | 1,363.75 | - | 600 | 500-2,500 |
| | S _{micro} | 773.56 | NA* | - | - | - |
| Pore volume (cm ³ /g) | V _{total} | 0.427 | 0.69 | 0.50 | - | 0.5-2.5 |
| | V _{micro} | 0.399 | NA* | - | - | - |
| | V _{micro} / V _{Total} (%) | 93.44 | NA* | - | - | - |
| D _p (nm) | | 2.15 | 2.36 | 2-50 | 2-50 | 2-50 |

*หมายเหตุ: NA คือ ไม่ระบุข้อมูล; **หมายเหตุ: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด

4.1.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM

นำตัวอย่างถ่าน MAC มาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของถ่านแมคคาเดเมียซึ่งเป็นวัตถุดิบก่อนนำไปกระตุ้น (รูปที่ 4.1 ก-ค) กับถ่าน MAC หลังกระตุ้น (รูปที่ 4.1 ง-ฉ) จะเห็นได้ว่าสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังได้รับการกระตุ้น มีรายละเอียดดังนี้ ถ่านแมคคาเดเมียที่ใช้เป็นวัตถุดิบก่อนการกระตุ้นที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (รูปที่ 4.1 ก) พบว่าถ่านแมคคาเดเมียก่อนกระตุ้นมีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายที่ 10,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) ตามลำดับ พบว่า พื้นผิวถ่านแมคคาเดเมียมีลักษณะไม่เรียบ มีรอยแตกที่ผิวชิ้นงาน และมีร่องขนาดเล็กกระจายทั่วทั้งชิ้นงาน (รูปที่ 4.1 ค)



รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของ (ก)-(ค) ถ่านแมคคาเดเมียก่อนการกระตุ้น และ (ง)-(ฉ) ถ่าน MAC หลังผ่านการกระตุ้น

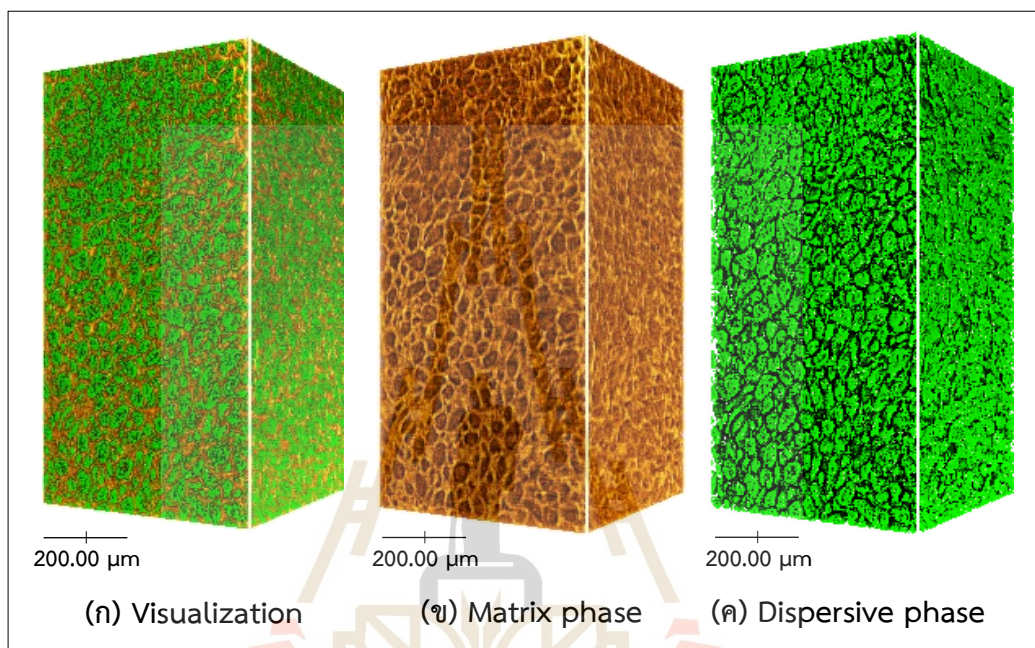
สัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC หลังผ่านการกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ง) และ (จ) แสดงภาพตัดขวางของถ่าน MAC หลังกระตุ้นที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าถ่าน MAC หลังผ่านการกระตุ้นมีลักษณะสัณฐานเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายทั่วพื้นผิว ซึ่งให้เห็นว่า ถ่าน MAC หลังกระตุ้น มีลักษณะผิวขรุขระ มีรูพรุนมากขึ้น และมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นจนเห็นได้ชัด เนื่องจากองค์ประกอบสัณฐาน เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนินบางส่วนถูกกำจัดไประหว่างขั้นตอนกระตุ้น ส่งผลให้ตัวดูดซับมีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น (Liu et al., 2022) นอกจากนี้ยังพบว่าผนังของรูพรุนบางส่วนมีรอยร้าวและแตก ทำให้รูพรุนเชื่อมต่อกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลต่อลักษณะของรูพรุนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนแตกต่างกัน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะกระจายทั่วทั้งพื้นผิวถ่าน MAC มีการจัดเรียงรูพรุนอย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกของรูพรุนไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายที่ 1,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ฉ) พบรูพรุนขนาดใหญ่ และรูพรุนขนาดเล็กกระจายทั่วพื้นผิวถ่าน MAC ส่งผลทำให้ถ่าน MAC หลังกระตุ้น มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จากผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของถ่าน MAC หลังกระตุ้นมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น และมีความสอดคล้องกับผลการตรวจวิเคราะห์ลักษณะรูพรุนด้วย BET analysis โดยขนาดรูพรุนและพื้นผิวของตัวดูดซับมีความสำคัญต่อการดูดซับ กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และมีพื้นที่ผิวสูง ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์ด้วยเช่นกัน (Wongcharee et al., 2018) จากการทบทวนงานวิจัยของ Xie et al. (2020) กล่าวว่า ขนาดรูพรุนเฉลี่ยส่งผลต่อความสามารถในการแพร่โมเลกุลสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ เมื่อรูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับเพียงเล็กน้อย จะส่งผลทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาบนพื้นผิวของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nan et al. (2020) ที่พบว่ารูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่า 2 นาโนเมตร มีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลสารไตรโคลซาน $4.34 \times 0.87 \times 5.55$ อังสตรอม ($1.42 \times 0.69 \times 0.75$ นาโนเมตร; Kaur et al., 2018) ทำให้สารที่ถูกดูดซับมีโอกาสแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับได้มากขึ้น และเกิดการดูดซับระหว่างผนังของรูพรุนขนาดเล็กกับโมเลกุลสารด้วยแรงการดูดซับที่แข็งแรงมากกว่ารูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ ดังนั้น ถ่าน MAC ของงานวิจัยนี้จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับสารไตรโคลซาน

4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค XTM

นำตัวอย่างถ่าน MAC มาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติด้วยเทคนิค XTM (BL1.2W: X-ray Tomographic Microscopy, Synchrotron Light Research Institute) แล้วประมวลผลเป็นภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติ โดยรูปที่ 4.2 (ก) แสดงภาพ Visualization ขององค์ประกอบ 2 ส่วนภายในตัวอย่างถ่าน MAC ประกอบด้วยพื้นผิวของแข็ง (พื้นที่สีน้ำตาล; Matrix phase) และช่องว่างอากาศ (พื้นที่สีเขียว; Dispersive phase) ส่วนรูปที่ 4.2 (ข) แสดงภาพ Matrix phase เป็นพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นผิวสัมผัสของถ่าน MAC มีลักษณะขรุขระ เนื่องจากรูพรุนมีรูปร่างไม่แน่นอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน และการจัดเรียงรูพรุนไม่เป็นระเบียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่าน MAC ด้วยเครื่อง SEM และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 (ค) แสดงภาพ Dispersive phase ซึ่งเป็นตัวแทนของรูพรุนภายในถ่าน MAC พบว่าพื้นที่ของรูพรุน

บริเวณพื้นผิวค่อนข้างใหญ่ รูพรุนกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งรูพรุนจะเจาะลึกเข้าไปในเนื้อถ่าน MAC อย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา BET ที่พบว่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กของถ่าน MAC มีสัดส่วนร้อยละ 93.44 ของรูพรุนทั้งหมด ส่งผลให้ส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก และพบว่ามึรูพรุนขนาดเล็กจำนวนหนึ่งที่มีการเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



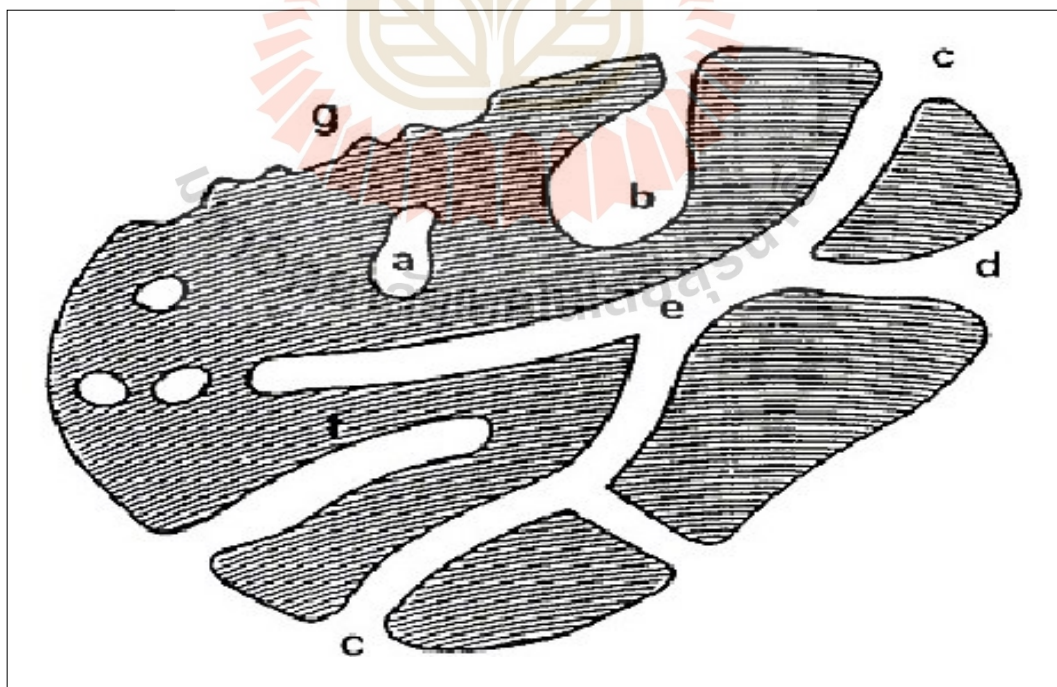
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของถ่าน MAC ก่อนดัดซึบด้วยเทคนิค XTM

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC ก่อนดัดซึบด้วยเทคนิค XTM

| ตัวอย่าง | ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ) | |
|---------------------|-----------------------|-----------|
| | รูพรุนเปิด | รูพรุนปิด |
| ถ่าน MAC ก่อนดัดซึบ | 74.74 | 25.26 |

“รูพรุน (Pore)” มีความหมายว่าทางผ่านสำหรับการเดินทางเข้า และออกของโมเลกุลระหว่างบริเวณภายนอกและภายในของตัวดูดซับ (ชัยยศ ตั้งสถิตยชัยกุล, 2554) จากผลการศึกษาภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค XTM ซึ่งให้เห็นว่าถ่าน MAC มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายทั่วทั้งพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM และเมื่อวิเคราะห์ลักษณะรูพรุนจากการศึกษาด้วยเทคนิค XTM สามารถจำแนกลักษณะรูพรุนออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ รูพรุนเปิด และรูพรุนปิด รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ถ่าน MAC ก่อนการดัดซึบมีรูพรุนเปิดร้อยละ 74.74 และรูพรุนปิดร้อยละ 25.26 ซึ่งลักษณะรูพรุนของถ่าน MAC ที่พบมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชัยยศ ตั้งสถิตยชัยกุล (2554)

สัมฤทธิ์ โหม้พวง (2566), Zdravkov et al. (2007) และ Sarna-Bo's et al. (2021) ที่ได้จำแนก ลักษณะรูพรุนตามความพร้อมในการใช้งานของสภาพแวดล้อม สามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะ คือ รูพรุนที่สามารถเชื่อมต่อกับพื้นผิวภายนอกหรือพื้นผิวสัมผัสอื่น ๆ ได้ (รูพรุนเปิด, Open pores) และรูพรุนที่ไม่เชื่อมต่อกับพื้นผิวภายนอก (รูพรุนปิด, Closed pores) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สามารถอธิบาย ได้ว่า “รูพรุนเปิด” ประกอบด้วย รูพรุน (b), (c), (d), (e), (f) และ (g) โดยรูพรุน (b) และ (f) เป็นรูพรุนที่มีทางเข้า-ออก เพียงทางเดียว ปากทางเข้าของรูพรุนเชื่อมต่อกับพื้นผิวภายนอก (External surface) แต่ที่สุดปลายทางของรูพรุนจะมีลักษณะคล้ายถุงกระสอบ ซึ่งเป็นทางตัน และไม่เชื่อมต่อกับรูพรุนอื่น ๆ ที่อยู่ภายในโครงสร้างของตัวดูดซับ ในขณะที่รูพรุน (c), (d), และ (e) เป็นรูพรุนที่มีทางเข้า-ออก สองทาง โดยปากทางเข้าของรูพรุนเชื่อมต่อกับพื้นผิวภายนอก และรูพรุนสามารถเชื่อมต่อกันได้ ส่งผลทำให้เกิดโครงข่ายของรูพรุนภายในโครงสร้างตัวดูดซับ และรูพรุน (g) จัดเป็นรูพรุนเปิดที่เชื่อมต่อกับพื้นผิวภายนอก แต่ไม่เชื่อมต่อกับรูพรุนอื่น ๆ มีความลึกของรูพรุนค่อนข้างน้อย ทำให้พื้นผิวตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระน้อยกว่ารูพรุนเปิดชนิดอื่น ๆ ส่วน “รูพรุนปิด” คือ รูพรุน (a) เป็นรูพรุนที่เกิดในบริเวณที่ได้รับความร้อนไม่เพียงพอต่อการทำลายองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นส่วนหนึ่งของผนังรูพรุน ส่งผลทำให้รูพรุนชนิดนี้ไม่สามารถเชื่อมต่อกับพื้นผิวภายนอก และรูพรุนอื่น ๆ ได้ หรือเป็นรูพรุนที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่าโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับ เช่น รูพรุน Ultramicropores ที่มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 0.7 นาโนเมตร (Jagiello et al., 2004; Yurduşen et al., 2020; Li et al., 2024)



รูปที่ 4.3 การจำแนกลักษณะของรูพรุนตามความพร้อมในการใช้งานของสภาพแวดล้อม โดยแก้ไข จาก IUPAC (Zdravkov et al., 2007)

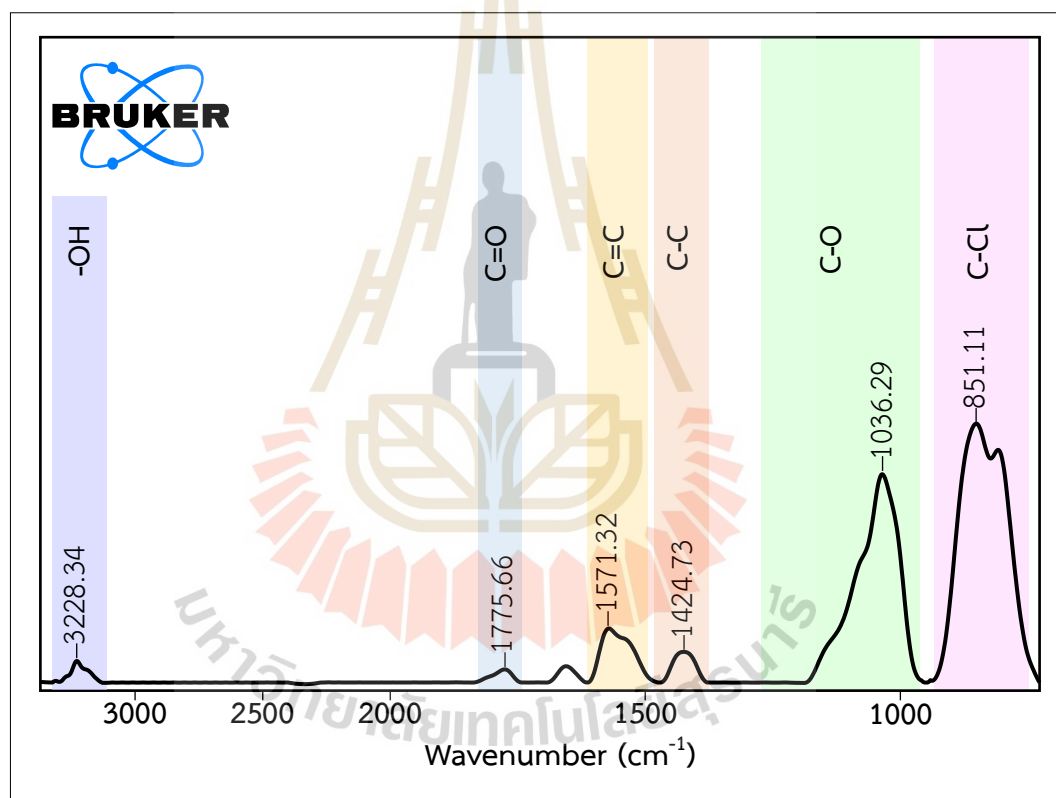
เมื่อพิจารณาผลการศึกษาลักษณะรูพรุนด้วยเทคนิค XTM แสดงให้เห็นว่า ถ่าน MAC ประกอบด้วยรูพรุนเปิดเป็นส่วนมากถึงร้อยละ 74.74 เป็นรูพรุนที่สามารถเชื่อมต่อกับพื้นผิวสัมผัสอื่น ๆ หรือเชื่อมต่อกับรูพรุนอื่น ๆ ได้ เป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับ ส่งผลทำให้มีพื้นผิวสูง ในขณะที่รูพรุนปิดมีปริมาณร้อยละ 25.26 จะไม่สามารถเกิดการดูดซับได้ เนื่องจากรูพรุนไม่ได้เชื่อมต่อกับพื้นผิวสัมผัสอื่น ๆ หรือเป็นรูพรุน Ultramicropores ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่าโมเลกุลสารไตรโคลซาน ($1.42 \times 0.69 \times 0.75$ นาโนเมตร; Kaur et al., 2018) ทำให้โมเลกุลของสารไตรโคลซานไม่สามารถเข้าไปยึดติดในบริเวณนี้ได้ จึงเป็นรูพรุนที่ไม่เกิดการดูดซับ เป็นอุปสรรคต่อการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับ

4.1.4 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค FTIR

นำตัวอย่างถ่าน MAC ก่อนการดูดซับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR รายละเอียดผลการศึกษามูลุฟังก์ชันดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการศึกษาพบว่าถ่าน MAC ก่อนดูดซับปรากฏพีกที่เลขคลื่น 3228.34 cm^{-1} เป็นเลขคลื่นที่แสดงการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และมีแนวโน้มเกิดการดูดซับทางเคมีได้ เช่น พันธะไฮโดรเจน และพันธะออกซิเจน (Xie et al., 2024) สำหรับพีกที่เลขคลื่น 1775.66 cm^{-1} แสดงการยืดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) เป็นส่วนหนึ่งหมู่คาร์บอกซิลิกที่ไม่เกิดการแตกตัวที่มีอยู่ในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Hussain et al., 2023) พีกที่เลขคลื่น 1571.32 cm^{-1} แสดงการยืดของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) ที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกของถ่านกัมมันต์ และพีกที่เลขคลื่น 1424.73 cm^{-1} แสดงการยืดของหมู่ฟังก์ชันแอลเคน (C-C) ที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกของถ่านกัมมันต์ (Charmas et al., 2023) พีกที่เลขคลื่น 1036.29 cm^{-1} แสดงการยืดของหมู่คาร์บอกซิลิก อีเทอร์ หรือหมู่ฟีนอล (C-O) ที่มีอยู่ในโครงสร้างของลิกนิน (Wongcharee et al., 2018; Xie et al., 2024) นอกจากนี้ยังปรากฏพีกที่เลขคลื่น 851.11 cm^{-1} ซึ่งแสดงการยืดของหมู่อัลคิลฮาไลด์ (C-Cl) ซึ่งอะตอมของคาร์บอนจับกับอะตอมของธาตุกลุ่มฮาโลเจน (Hussain et al., 2023) เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่าน MAC ก่อนการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 4.4 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อะตอมของออกซิเจนมีคุณสมบัติเป็นเฮเทอโรอะตอม (Hetero-atom) ซึ่งเกิดขึ้นในรูปของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่ฟังก์ชันควิโนนคาร์บอนิล (C=O) เมื่อหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลจับอยู่ที่อะตอมคาร์บอนเดียวกัน จะกลายเป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (COOH) ส่งผลให้เกิดสภาพการมีขั้วบนพื้นผิวดูดซับ และมีสภาพพื้นผิวเป็นกรด สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ (Wongcharee et al., 2018) นอกจากนี้ การศึกษาในงานวิจัยของ Sultana et al. (2022) และ Zhang et al. (2024) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ประกอบด้วยโครงสร้างผลึกคาร์บอนของวงแหวนเบนซีนที่ไม่อิ่มตัว สามารถทำปฏิกิริยากับวงแหวนเบนซีนในโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับด้วยพันธะ $\pi-\pi$ ได้ ซึ่งจากผลการตรวจวิเคราะห์พบว่า ถ่าน MAC พบหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และหมู่ฟังก์ชันแอลเคน (C-C) ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างผลึกคาร์บอนของวงแหวนอะโรมาติกที่ไม่อิ่มตัว

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน MAC ก่อนดูดซับด้วยเทคนิค FTIR

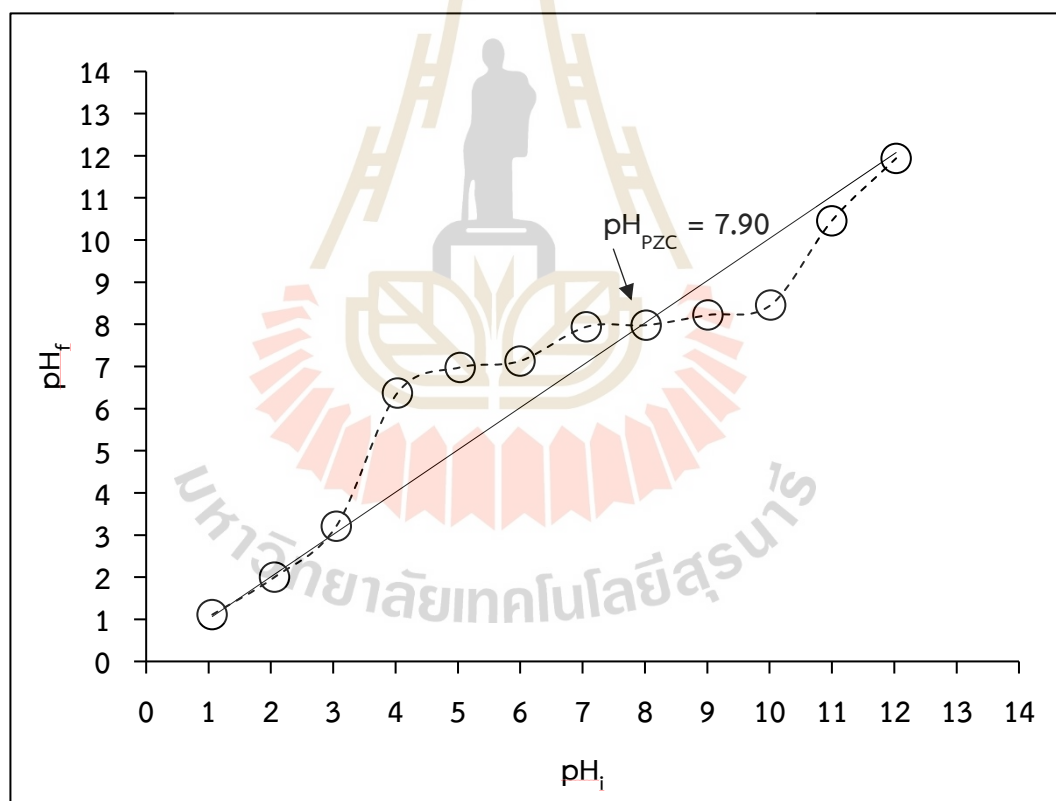
| หมู่ฟังก์ชัน | ประเภทของสารประกอบ | เลขคลื่นที่พบพีด (cm^{-1}) |
|--------------|---|---------------------------------------|
| -OH | Hydroxyl | 3228.34 |
| C=O | Carbonyl | 1775.66 |
| C=C | Aromatic compound | 1571.32 |
| C-C | Aromatic compound | 1424.73 |
| C-O | Carboxylic, Ether, Ester (Saturated aliphatic) | 1036.29 |
| C-Cl | Alkyl-Halide | 851.11 |



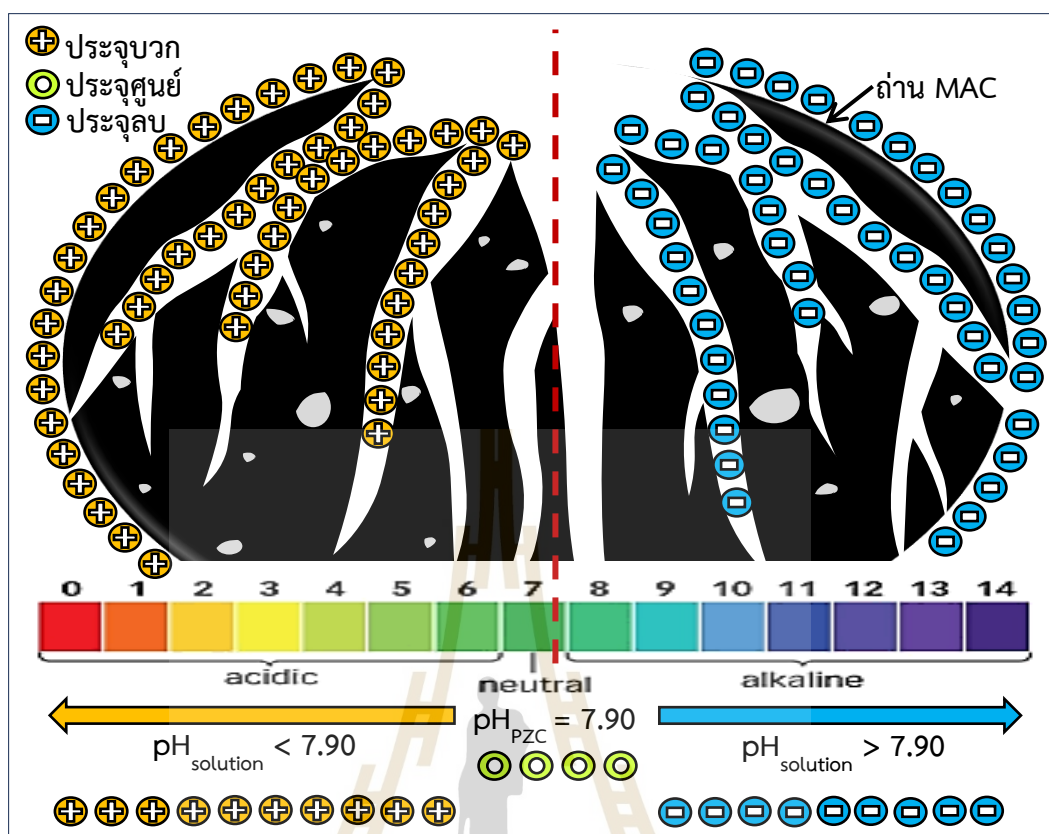
รูปที่ 4.4 ผลการศึกษา FTIR spectrum ของถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ

4.1.5 ผลการศึกษาค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH of Point of Zero Charge: pH_{PZC})

นำตัวอย่างถ่าน MAC ก่อนการดูดซับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มาวิเคราะห์ค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (pH_{PZC}) ของถ่าน MAC รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากผลการศึกษาพบว่าถ่าน MAC มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 7.9 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 7.9 ($\text{pH}_{\text{solution}} = \text{pH}_{\text{PZC}}$) จะส่งผลให้พื้นผิวของถ่าน MAC ไม่มีประจุหรือประจุเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แต่เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าน้อยกว่า 7.9 ($\text{pH}_{\text{solution}} < \text{pH}_{\text{PZC}}$) จะส่งผลให้พื้นผิวของถ่าน MAC มีประจุบวก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำจะแตกตัวให้ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) มากกว่าไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุบวกสุทธิมากกว่าประจุลบ แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชมากกว่า 7.9 ($\text{pH}_{\text{solution}} > \text{pH}_{\text{PZC}}$) จะส่งผลให้พื้นผิวของถ่าน MAC เป็นประจุลบ เพราะโมเลกุลของน้ำจะแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออนมากกว่าไฮโดรเนียมไอออน ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุลบสุทธิมากกว่าประจุบวก (Mojoudi et al., 2019; Iheanacho et al., 2023)



รูปที่ 4.5 ผลการศึกษาค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ของถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ



รูปที่ 4.6 แบบจำลองประจุที่พบบนพื้นผิวถ่าน MAC

4.2 การศึกษาการดูดซับแบบแบตช์

4.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานในระบบแบบแบตช์ เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารไตรโคลซาน ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นสารไตรโคลซาน เริ่มต้น ความเร็วรอบการกวน อุณหภูมิของการดูดซับ และค่าพีเอชเริ่มต้น รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

4.2.1.1 ผลของระยะเวลาสัมผัส

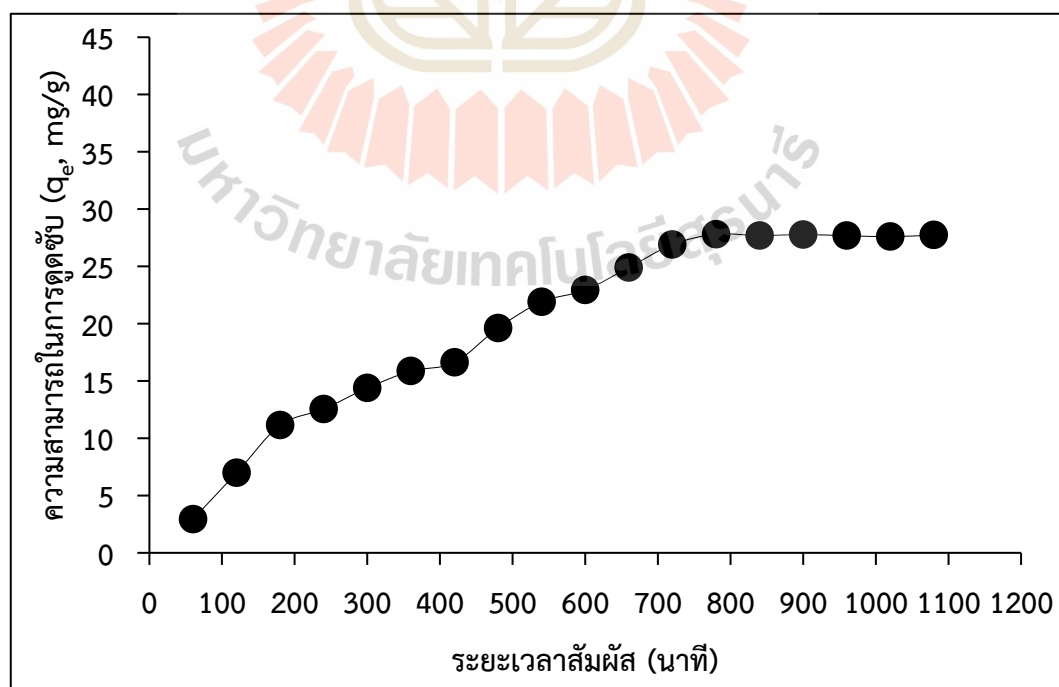
ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยศึกษาช่วงระยะเวลาสัมผัสตั้งแต่ 60 ถึง 1,080 นาที การศึกษาครั้งนี้ใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และค่าพีเอชของสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 10.5 ± 0.2 รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.4 และนำผลการศึกษาไปคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับระยะเวลาสัมผัส มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัส พบว่าเมื่อมีระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงระยะเวลาสัมผัส 300 นาทีแรก จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มจาก 2.94 เป็น 14.40 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 300 ถึง 780 นาที ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยจาก 14.40 เป็น 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงระยะเวลาสัมผัส 780 ถึง 1,080 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงจาก 27.80 เป็น 27.60 มิลลิกรัมต่อกรัม และพบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 780 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7 การดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 300 นาทีแรก เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับ (Concentration gradient) ในสารละลายกับบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ (Khader et al., 2023) เนื่องจากที่บริเวณพื้นผิวของถ่าน MAC ก่อนเกิดการดูดซับยังไม่มีโมเลกุลของสารไตรโคลซานมายึดติด จึงทำให้มีพื้นที่ว่างและความเข้มข้นของสารไตรโคลซานต่ำ ในขณะที่โมเลกุลของสารไตรโคลซานในสารละลายมีความเข้มข้นสูง ซึ่งความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่แตกต่างกันมากนี้จะส่งผลต่ออัตราการแพร่ของโมเลกุลสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงมายังบริเวณที่ความเข้มข้นต่ำได้ง่ายและรวดเร็ว (Triwiswara et al., 2020; Khader et al., 2023) แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสของการดูดซับ ส่งผลให้โมเลกุลของสารไตรโคลซานที่ยึดติดบนพื้นผิวถ่าน MAC มีปริมาณมากขึ้น และความแตกต่างของความเข้มข้นเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้โมเลกุลของสารไตรโคลซานแพร่เข้าสู่พื้นผิวของถ่าน MAC ได้ช้าลง ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ช้า และเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงผลักกัน (Repulsive forces) ระหว่างโมเลกุลของสารไตรโคลซานบนพื้นผิวตัวดูดซับและในสารละลาย (Khorihha et al., 2020; Triwiswara et al., 2020) จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า เมื่อการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่จะมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานสูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะเวลาสัมผัส 780 นาที และจะเห็นได้ว่าหลังจากเข้าสู่สภาวะคงที่แล้ว พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลสารไตรโคลซานบางส่วนเริ่มหลุดออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Khorihha et al. (2020)

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ระยะเวลาสัมผัส 780 นาที เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นระยะเวลาสัมผัสที่การดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด

ตารางที่ 4.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

| ระยะเวลาสัมผัส (minutes) | ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0 , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C_e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g) |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 60 | 20.03 | 18.56 | 2.94 |
| 120 | 20.03 | 16.54 | 6.98 |
| 180 | 20.03 | 14.46 | 11.13 |
| 240 | 20.03 | 13.75 | 12.55 |
| 300 | 20.03 | 12.82 | 14.40 |
| 360 | 20.03 | 12.08 | 15.86 |
| 420 | 20.03 | 11.7 | 16.61 |
| 480 | 20.03 | 10.19 | 19.63 |
| 540 | 20.03 | 9.07 | 21.90 |
| 600 | 20.03 | 8.53 | 22.94 |
| 660 | 20.03 | 7.53 | 24.90 |
| 720 | 20.03 | 6.54 | 26.90 |
| 780 | 20.03 | 6.09 | 27.80 |
| 840 | 20.03 | 6.09 | 27.70 |
| 900 | 20.03 | 6.09 | 27.77 |
| 960 | 20.03 | 6.06 | 27.68 |
| 1,020 | 20.03 | 6.03 | 27.60 |
| 1,080 | 20.03 | 6.03 | 27.74 |



รูปที่ 4.7 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

4.2.1.2 ผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น

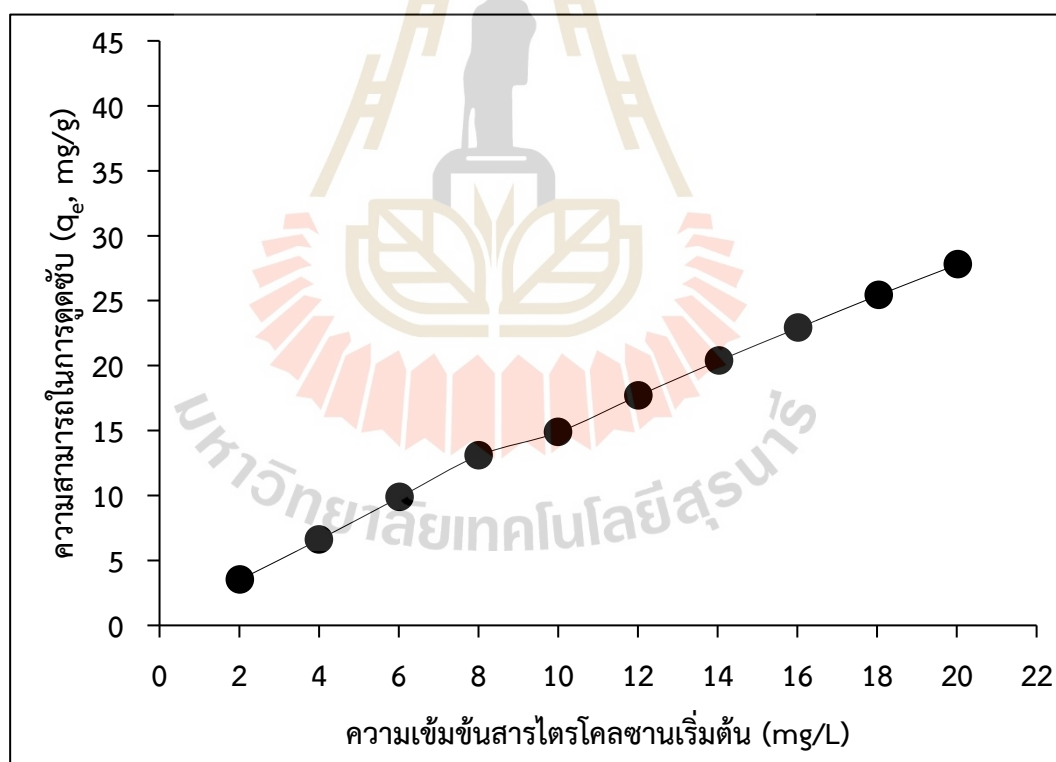
ผลการศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับของ ถ่าน MAC โดยศึกษาช่วงความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นตั้งแต่ 2.02 ถึง 20.03 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาครั้งนี้ใช้ระยะเวลาสัมผัส 780 นาที เขย่าที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และค่าพีเอชของสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 10.5 ± 0.2 รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.5 และนำผลการศึกษาไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ เพื่อศึกษาค่าความสัมพันธ์กับความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซานเพิ่มขึ้นจาก 2.02 ถึง 20.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 3.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ถึง 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยพบว่าที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20.03 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นจะส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับ เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นในสารละลายและความเข้มข้นที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ (Concentration gradient) ส่งผลให้เกิดแรงผลักดันโมเลกุลสารที่มากขึ้น เป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสารระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับทำให้เกิดการแพร่ของสารเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ (Machedi et al., 2019; Ho and Adnan, 2021) ทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yokoyama et al. (2019) ได้ศึกษาการกำจัดสารไตรโคลซานโดยใช้เศษหญ้าหวาน (Stevia residue) เป็นตัวดูดซับ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานจาก 50 ถึง 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 33.00 ถึง 94.10 มิลลิกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Khorihia et al. (2020) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานจาก 5 ถึง 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับได้มากขึ้น และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 70 ถึง 90 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการดูดซับเข้าสู่สมดุล ส่งผลให้อัตราการดูดซับลดลง

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุด

ตารางที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับของถ่าน MAC

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0 , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C_e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g) |
|--|--|--|
| 2.02 | 0.26 | 3.53 |
| 4.01 | 0.71 | 6.60 |
| 6.03 | 1.09 | 9.87 |
| 8.01 | 1.47 | 13.08 |
| 10.00 | 2.56 | 14.87 |
| 12.02 | 3.17 | 17.69 |
| 14.04 | 3.81 | 20.39 |
| 16.03 | 4.55 | 22.90 |
| 18.04 | 5.29 | 25.44 |
| 20.03 | 6.09 | 27.80 |



รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อการดูดซับของถ่าน MAC

4.2.1.3 ผลของความเร็วยรอบการกววน

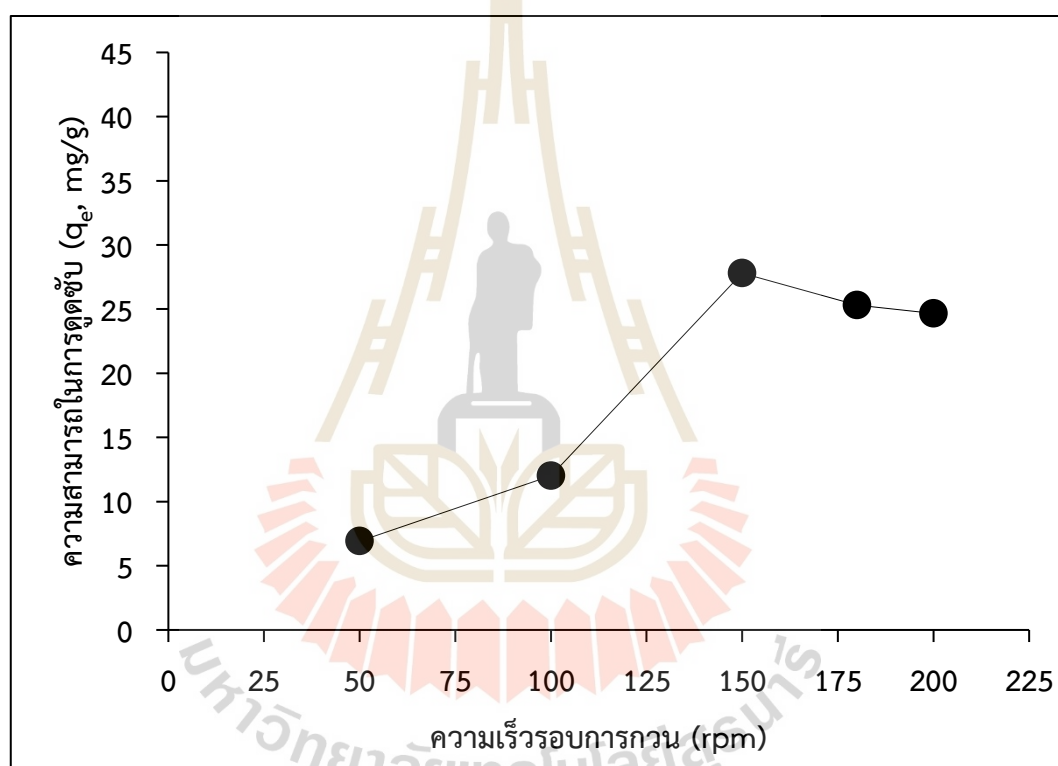
ผลการศึกษาคความเร็วยรอบการกววนที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของ ถ่าน MAC โดยศึกษาช่วงความเร็วยรอบการกววนตั้งแต่ 50 ถึง 200 รอบต่อนาที การศึกษาครั้งนี้ ใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 780 นาที เขย่าที่ อุณหภูมิห้อง และค่าพีเอชของสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 10.5 ± 0.2 รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.6 และนำผลการศึกษาไปคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับความเร็วยรอบการกววน มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาคความเร็วยรอบการกววน พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบการกววนจาก 50 ถึง 150 รอบต่อนาที ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 6.92 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบการกววนจาก 150 รอบต่อนาที เป็น 200 รอบต่อนาที กลับส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงจาก 27.80 เป็น 24.65 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยพบว่าที่ความเร็วยรอบการกววน 150 รอบต่อนาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วยรอบการกววนในช่วง 50 ถึง 100 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเร็วยรอบการกววนช้า และมีค่าความสามารถในการดูดซับน้อย เนื่องจากการสร้างความปั่นป่วนในระบบน้อยเกินไป โมเลกุลของสารไตรโคลซานจะชนกันอย่างช้า ๆ และชั้นของเหลวที่ปกคลุมพื้นผิวตัวดูดซับมีความหนามาก ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการแพร่เข้าสู่รูพรุนของโมเลกุลสาร ส่งผลให้มีปริมาณการดูดซับน้อยอยู่ในช่วงเท่ากับ 6.92 ถึง 12.02 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบการกววนจาก 100 รอบต่อนาที เป็น 150 รอบต่อนาที พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมาก จาก 12.02 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วยรอบการกววน จะส่งผลต่อความหนาของชั้นขอบเขตของเหลว (Liquid boundary layer) ที่ล้อมรอบพื้นผิวตัวดูดซับทำให้มีความหนาลดลง โมเลกุลของสารไตรโคลซานในสารละลายสามารถแพร่ผ่านชั้นขอบเขตของเหลวนั้นได้และถูกกักเก็บไว้ที่พื้นผิวตัวดูดซับ ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้มากขึ้นและมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น (Karthika and Vasuki, 2021; Shahawy et al., 2022) แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบการกววนในช่วง 150 ถึง 200 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเร็วยรอบการกววนเร็วมาก จะทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในระบบมาก ส่งผลทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเป็น 24.65 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากชั้นของเหลวที่ปกคลุมพื้นผิวตัวดูดซับจะถูกเฉือนด้วยพลังงานจลน์ของสารละลายทำให้มีลักษณะค่อนข้างบาง ทำให้โมเลกุลสารแยกออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่งผลให้มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง (Edokpayi et al., 2020)

ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเร็วยรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นความเร็วยรอบการเขย่าที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 4.6 ผลของความเร็วยรอบการกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

| ความเร็วยรอบการกวน (rpm) | ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0 , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C_e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g) |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 50 | 20.03 | 16.57 | 6.92 |
| 100 | 20.03 | 14.01 | 12.02 |
| 150 | 20.03 | 6.09 | 27.80 |
| 180 | 20.03 | 7.34 | 25.31 |
| 200 | 20.03 | 7.69 | 24.65 |



รูปที่ 4.9 ผลของความเร็วยรอบการกวนต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

4.2.1.4 ผลของอุณหภูมิของการดูดซับ

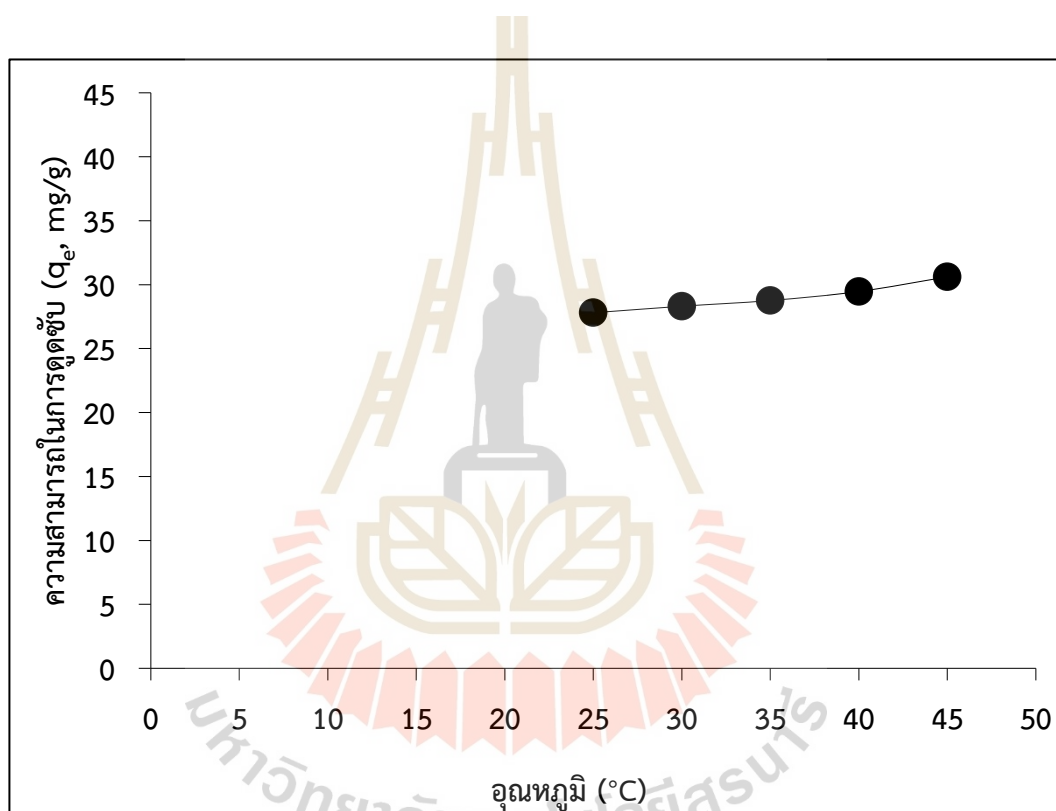
ผลการศึกษาอุณหภูมิของการดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยศึกษาช่วงอุณหภูมิของการดูดซับตั้งแต่ 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส การศึกษาครั้งนี้ใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 780 นาที เขย่าที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที และค่าพีเอชของสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 10.5 ± 0.2 รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.7 และนำผลการศึกษาไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ เพื่อศึกษาค่าความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของการดูดซับ มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาอุณหภูมิของการดูดซับ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 27.80 เป็น 30.61 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 30.61 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบ ทำให้มีค่าความร้อนในระบบเพิ่มขึ้น โดยความร้อนจะส่งผลให้สารละลายมีความหนืดลดลงและโมเลกุลสารไตรโคลซานมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น เกิดการเคลื่อนที่มากขึ้น และโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถแพร่ผ่านชั้นขอบของเหลวที่ปกคลุมพื้นผิวตัวดูดซับที่บางลง จึงทำให้เกิดการดูดซับได้มากยิ่งขึ้น (Edokpayi et al., 2020) พิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า การดูดซับในการทดลองนี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic adsorption process) เป็นการดูดพลังงานเข้าสู่ระบบเพื่อสลายพันธะ ช่วยเร่งการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสารกับพื้นผิวตัวดูดซับ เช่น ปฏิกิริยาไฟฟ้าสถิตย์ และเป็นการเพิ่มโอกาสการถ่ายเทมวลสารจากสารละลายเข้าสู่พื้นผิวตัวดูดซับทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Abdus-Salam and Magaji, 2016; Ndagijimana et al., 2019; Wei et al., 2019; Sazali et al., 2020) ดังนั้น เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ รวมถึงเพิ่มโอกาสในการแพร่โมเลกุลสารเข้าสู่รูพรุนมากขึ้น

จากผลการศึกษา พบว่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดเท่ากับ 30.61 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจะต้องให้ความร้อนกับสารละลายไตรโคลซาน เมื่อพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 45 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วง 27.80 ถึง 30.61 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้น หากเลือกใช้สภาวะการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 28.31 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นอุณหภูมิสภาพอากาศโดยทั่วไป และไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนเพิ่มเข้าสู่ระบบซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่าย จะเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดของอุตสาหกรรมได้ดีกว่า ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิการดูดซับที่ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และ 45 องศาเซลเซียส สำหรับนำไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป เพื่อการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความสามารถในการดูดซับต่อไป และเป็นข้อมูลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิของการดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

| อุณหภูมิการดูดซับ (°C) | ความเข้มข้นเริ่มต้น (C ₀ , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C _e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q _e , mg/g) |
|---------------------------|--|--|--|
| 25 | 20.03 | 6.09 | 27.80 |
| 30 | 20.03 | 5.83 | 28.31 |
| 35 | 20.03 | 5.61 | 28.76 |
| 40 | 20.03 | 5.26 | 29.46 |
| 45 | 20.03 | 4.71 | 30.61 |



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิของการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

4.2.1.5 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้น

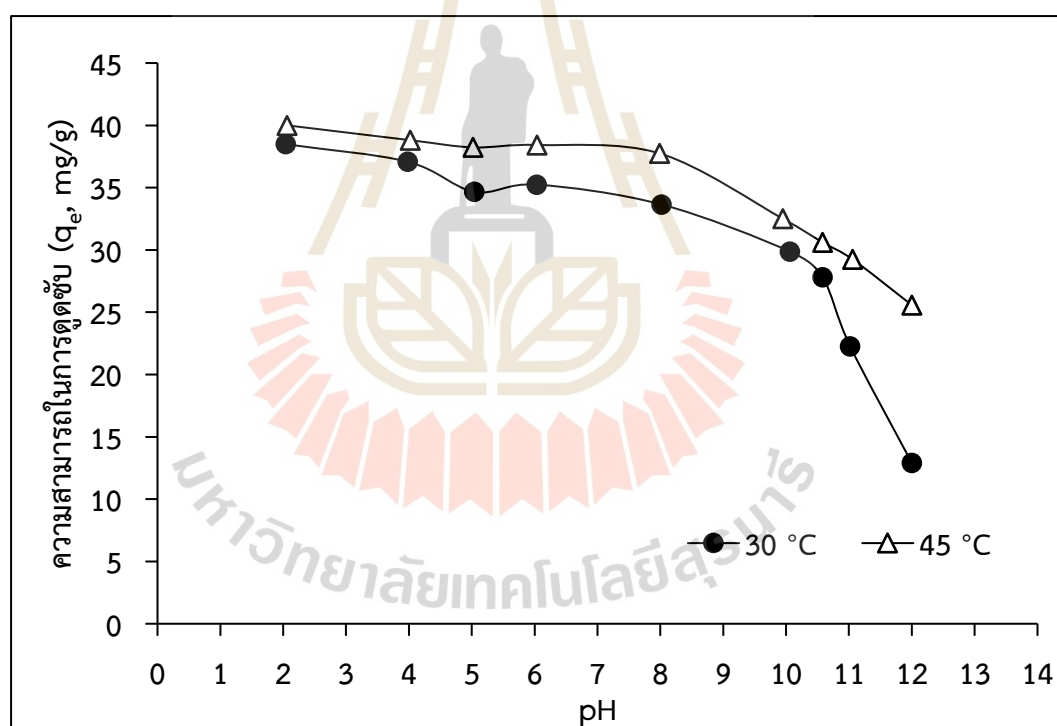
ผลการศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยศึกษาช่วงค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเริ่มต้นตั้งแต่ 2 ถึง 12 การศึกษาครั้งนี้ใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 780 นาที เขยาที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และ 45 องศาเซลเซียส รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.8 และนำผลการศึกษาไปคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับ เพื่อศึกษาค่าความสัมพันธ์กับค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเริ่มต้น มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไตรโคลซานพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 ถึง 12 มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงจาก 38.48 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 12.91 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 38.48 มิลลิกรัมต่อกรัม และที่สภาวะอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 12 ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงจาก 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 25.58 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษาของทั้งสองช่วงอุณหภูมิมีแนวโน้มสอดคล้องกัน จากผลการศึกษาในรูปแบบที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าสารละลายไตรโคลซานมีค่าพีเอชในช่วง 2 ถึง 8 (สารละลายไตรโคลซานมีสภาวะกรด) มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเล็กน้อยจาก 38.49 เป็น 33.65 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าลดลงจาก 40.00 เป็น 37.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานจาก 8 เป็น 12 (สารละลายไตรโคลซานมีสภาวะด่าง) พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งที่อุณหภูมิห้องมีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงจาก 33.65 เป็น 12.91 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงจาก 37.75 เป็น 25.58 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลค่าความสามารถในการดูดซับ เพราะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับ และประจุของสารที่ถูกดูดซับ โดยเมื่อค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงอย่างรวดเร็ว ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vidovix et al. (2022) ที่ได้ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสารไตรโคลซาน พบว่าโมเลกุลสารไตรโคลซานภายใต้สภาวะกรดจะอยู่ในรูปโปรตรอน (HA) สามารถเกิดการดูดซับได้ดี แต่เมื่ออยู่ในสภาวะด่างจะเกิดการดูดซับได้น้อย เนื่องจากสารไตรโคลซานอยู่ในรูปที่สูญเสียโปรตรอน (A⁻) ทำให้สารไตรโคลซานเป็นประจุลบและเกิดแรงไฟฟ้าสถิตย์แบบผลักกันกับพื้นผิวตัวดูดซับที่เป็นประจุบวก

จากการศึกษาในงานวิจัยของ Sonia et al. (2020) ได้นำเสนอกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารไตรโคลซานรูปปกติ (Phenolic-TCS) และสารไตรโคลซานรูปประจุลบ (Phenolate-TCS) ดังแสดงในรูปแบบที่ 4.12 สารไตรโคลซานมีค่า pK_a เท่ากับ 7.80 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อสารละลายไตรโคลซานมีค่า pH น้อยกว่า pK_a ส่งผลให้สารไตรโคลซานอยู่ในรูป Phenolic-TCS มากกว่ารูป Phenolate-TCS สามารถเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน และพันธะ $\pi-\pi$ ได้ ในขณะที่เมื่อสารละลายไตรโคลซานมีค่า pH มากกว่า pK_a ส่งผลให้สารไตรโคลซานจะอยู่ในรูป Phenolate-TCS มากกว่ารูป Phenolic-TCS ในสภาวะด่างจะส่งผลให้โมเลกุลสารไตรโคลซานเป็นประจุลบ โดยที่สภาวะด่างทำให้โมเลกุลสารไตรโคลซานเป็นประจุลบ และพื้นผิวตัวดูดซับมีประจุลบ ส่งผลทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตย์แบบผลักกัน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ และทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง (Hu et al., 2017; Triwiswara et al., 2020; Li et al., 2023)

ตารางที่ 4.8 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

| ค่าพีเอช | อุณหภูมิ 30 °C (อุณหภูมิห้อง) | | | อุณหภูมิ 45 °C | | |
|----------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | C ₀ (mg/L) | C _e (mg/L) | q _e (mg/g) | C ₀ (mg/L) | C _e (mg/L) | q _e (mg/g) |
| 2 | 20.10 | 0.83 | 38.49 | 20.03 | 0.03 | 40.00 |
| 4 | 20.10 | 1.54 | 37.08 | 20.03 | 0.61 | 38.81 |
| 5 | 20.10 | 2.69 | 34.67 | 20.03 | 0.90 | 38.23 |
| 6 | 20.10 | 2.40 | 35.24 | 20.03 | 0.80 | 38.42 |
| 8 | 20.10 | 3.21 | 33.65 | 20.03 | 1.12 | 37.75 |
| 10 | 20.10 | 5.16 | 29.87 | 20.03 | 3.78 | 32.50 |
| 10.5±0.2 | 20.10 | 6.09 | 27.80 | 20.03 | 4.71 | 30.61 |
| 11 | 20.10 | 8.94 | 22.26 | 20.03 | 5.38 | 29.24 |
| 12 | 20.10 | 13.62 | 12.91 | 20.03 | 7.18 | 25.58 |



รูปที่ 4.11 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

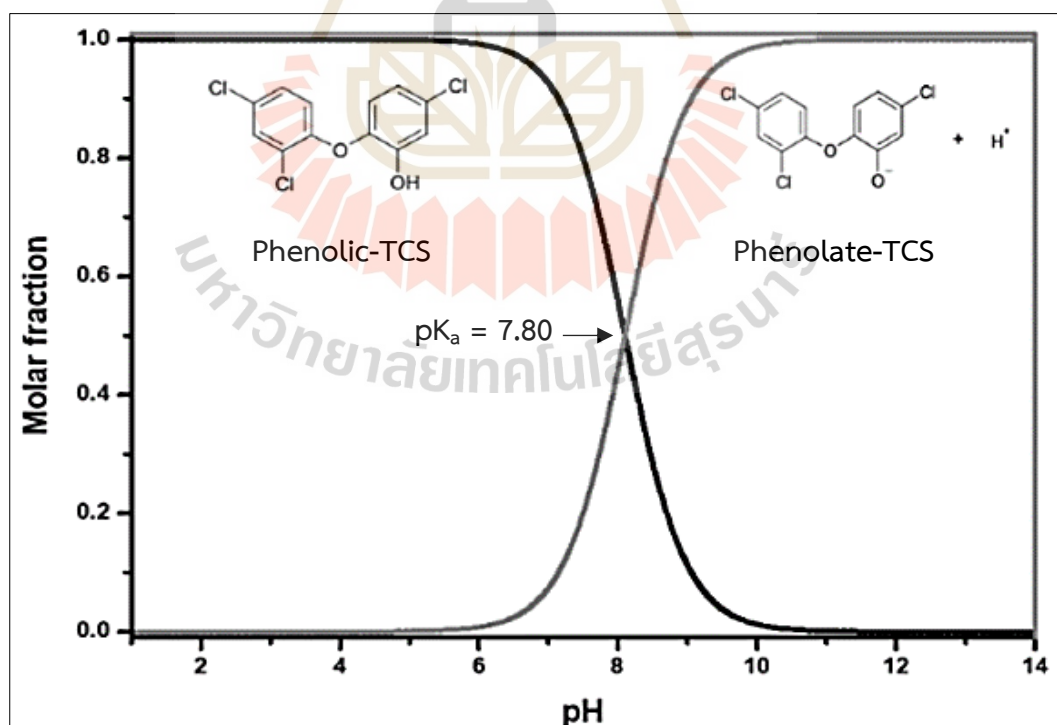
จากผลการศึกษาค่าพีเอชผิวประจุศูนย์ (pH_{PZC}) ของถ่าน MAC มีค่าเท่ากับ 7.90 ซึ่งผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องกับการศึกษาค่าพีเอชของสารไตรโคลซานเริ่มต้น พบว่าที่ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 2 มีความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC สูงที่สุดอยู่ในช่วง 38.49 และ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องมาจากค่าพีเอชของสารละลาย $pH(2) < pK_a(7.80) < pH_{PZC}(7.90)$ มีผลทำให้สาร

ไตรโคลซานอยู่ในรูป Phenolic-TCS ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และที่พื้นผิวถ่าน MAC เป็นประจุบวก ทำให้เกิดการดูดซับได้ด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ที่ดึงดูดกัน เกิดพันธะไฮโดรเจน พันธะ $\pi-\pi$ และการแพร่เข้าสู่รูพรุน ดังภาพจำลองการดูดซับระหว่างสารไตรโคลซานกับถ่าน MAC สรุปรายละเอียดในรูปที่ 4.13 ในขณะที่ค่าพีเอชในสภาวะต่าง (ช่วงค่าพีเอช 8 ถึง 12) มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง อยู่ในช่วง 12.91 และ 37.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานมีค่า pK_a (7.80) < pH_{PZC} (7.90) < pH (8-12) ซึ่งสารไตรโคลซานส่วนใหญ่อยู่ในรูป Phenolate-TCS ซึ่งเป็นประจุลบ และพื้นผิวถ่าน MAC เป็นประจุลบ ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตย์แบบผลักกัน และมีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC จึงได้นำตัวอย่างถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และหลังดูดซับที่ค่าพีเอชของสารละลายตั้งแต่ 2 ถึง 12 ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารไตรโคลซานโดยเทคนิค FTIR ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.14 พบว่าหลังการดูดซับมีการปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างสารไตรโคลซาน ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ที่ช่วงเลขคลื่น 3600-3100 cm^{-1} ซึ่งเป็นสารประกอบของฟีนอล ปรากฏพีคของหมู่แอลคีน (C=C) ที่ช่วงเลขคลื่น 1600-1580 cm^{-1} และหมู่แอลเคน (C-C) ที่ช่วงเลขคลื่น 1500-1400 cm^{-1} ซึ่งเป็นวงแหวนอะโรมาติกของถ่าน MAC และของสารไตรโคลซาน อีกทั้งเป็นการปรากฏตัวของกลุ่มลีนินิน (Wongcharee et al., 2018; Triwiswara et al., 2020) พบหมู่คาร์บอกซิลิก (C-O) ที่ช่วงเลขคลื่น 1300-1000 cm^{-1} เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง แสดงหมู่คาร์บอกซิลิก อีเทอร์ และเอสเทอร์ และพบหมู่อัลคิล-ฮาไลด์ (C-Cl) มีค่าใกล้เคียงกับช่วงเลขคลื่น 850-550 cm^{-1} และเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับผล FTIR ในงานวิจัยของ Kang et al. (2021) และ Vidovix et al. 2022 สามารถยืนยันได้ว่าถ่าน MAC สามารถดูดซับสารไตรโคลซานไว้ที่พื้นผิวได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะออกซิเจน และพันธะ $\pi-\pi$ นอกจากนี้ได้พบพีคของหมู่อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (CH, CH₂, CH₃) ที่เลขคลื่น 3000-2850 cm^{-1} ของถ่าน MAC หลังดูดซับ แต่ไม่พบในถ่าน MAC ก่อนดูดซับ รวมไปถึงพบหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ช่วงเลขคลื่น 1760-1665 cm^{-1} สำหรับถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และถ่าน MAC หลังดูดซับสารละลายไตรโคลซานที่ค่าพีเอชช่วง 8-12 แต่ไม่พบในถ่าน MAC หลังดูดซับที่ค่าพีเอชของสารไตรโคลซานช่วง 2-6 เนื่องจากตัวให้อิเล็กตรอน เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก และหมู่คาร์บอนิลเป็นหมู่ฟังก์ชันที่กรดอยู่บนพื้นผิวถ่าน MAC จะแตกตัวได้ดีในสภาวะกรด ได้หมู่ไฮโดรเจน (H⁺) หมู่คาร์บอกซิล (-COO⁻) และอะตอมของ O⁻ สามารถรวมตัวกับตัวรับอิเล็กตรอน เช่น วงแหวนอะโรมาติกของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน จึงส่งผลให้สภาวะกรดเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกว่าสภาวะต่าง (Xie et al., 2020; Zhang et al., 2024) และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Vidovix et al. (2022) ที่ไม่พบหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลหลังการดูดซับสารไตรโคลซาน เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลเกิดการแตกตัวและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอื่น ๆ จนหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่ากลไกการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เกิดขึ้นจากการดูดซับด้วยพันธะ $\pi-\pi$ พันธะไฮโดรเจน และการแพร่เข้าสู่รูพรุน นอกจากนี้พบว่าสารไตรโคลซานสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันเองเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Self-coupling) ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลกับอะตอมคาร์บอนในวงแหวนอะโรมาติก (Sun et al., 2018)

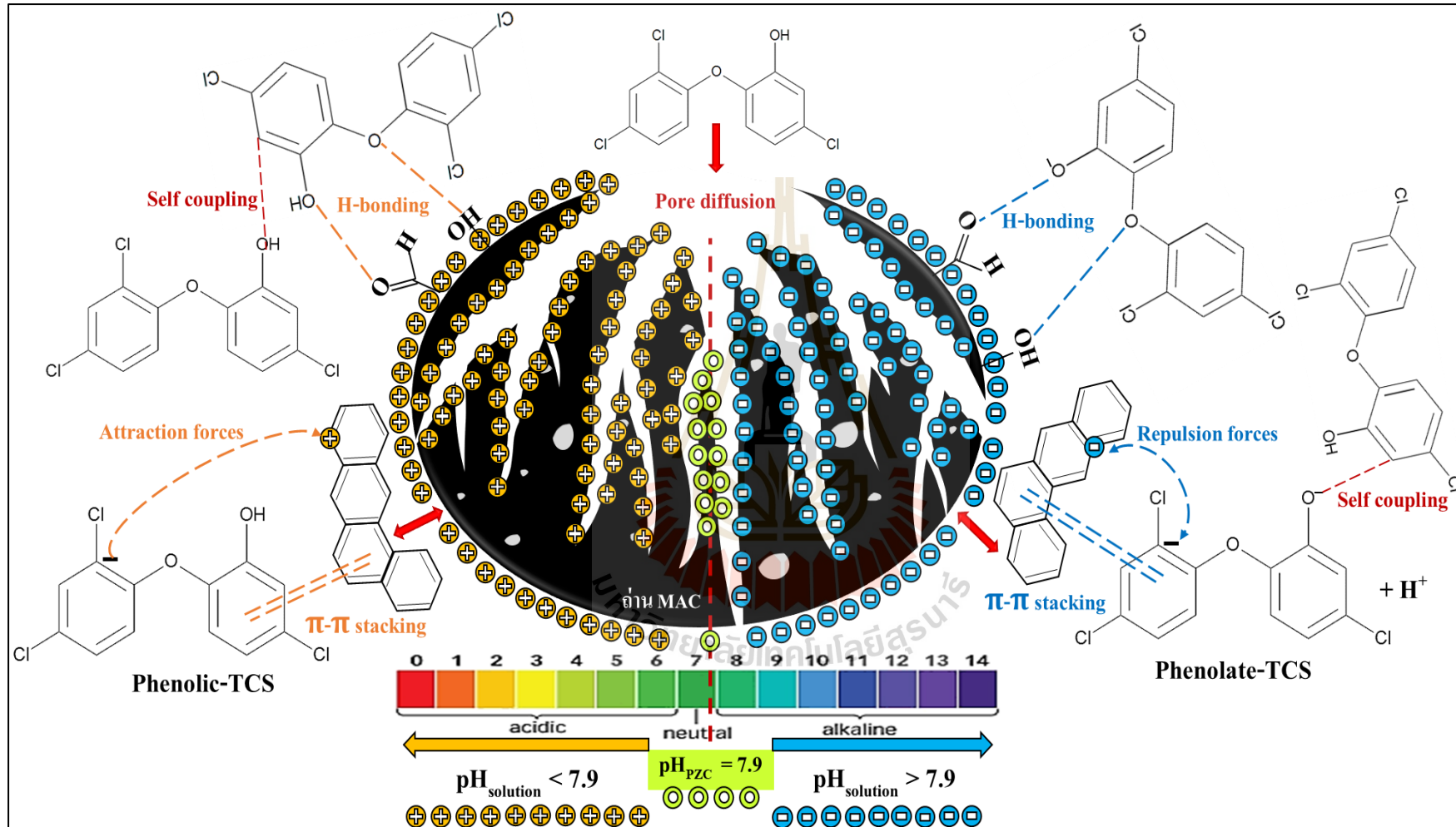
นอกจากนี้พบว่า การดูดซับในสภาวะกรด (ค่าพีเอชช่วง 2 ถึง 6) มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่าสภาวะต่าง เนื่องมาจากเกิดแรงไฟฟ้าสถิตย์แบบดึงดูดกันระหว่างประจุบวกบนพื้นผิวถ่าน MAC กับ Phenolic-TCS ในขณะที่สภาวะต่างเกิดแรงไฟฟ้าสถิตย์แบบผลักกัน (Sultana et al., 2022)

จากผลการศึกษาพบว่าค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซาน เท่ากับ 2 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 38.49 มิลลิกรัมต่อกรัม (อุณหภูมิต้อง) และ 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัม (อุณหภูมิต้อง) ซึ่งจะต้องใช้สารละลายกรดในการปรับค่าพีเอช เมื่อพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจะทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าพีเอช 10.5 ± 0.2 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 27.80 มิลลิกรัมต่อกรัม (อุณหภูมิต้อง) และ 30.61 มิลลิกรัมต่อกรัม (อุณหภูมิต้อง) ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่พบในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ด้านผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล ไม่ปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่าย เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมได้

ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกใช้ชุดข้อมูล 4 ชุดข้อมูล ได้แก่ ค่าพีเอช 2 ที่อุณหภูมิต้อง, ค่าพีเอช 2 ที่อุณหภูมิต้อง 45 องศาเซลเซียส, ค่าพีเอช 10.5 ± 0.2 ที่อุณหภูมิต้อง, ค่าพีเอช 10.5 ± 0.2 ที่อุณหภูมิต้อง 45 องศาเซลเซียส เป็นสภาวะที่ใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป เนื่องจาก ที่ค่าพีเอช 2 จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ที่ค่าพีเอช 10.5 ± 0.2 เป็นค่าพีเอชที่พบในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และที่อุณหภูมิต้อง และ 45 องศาเซลเซียส โดยทั้ง 2 อุณหภูมินี้มีค่าความสามารถในการดูดซับใกล้เคียงกัน



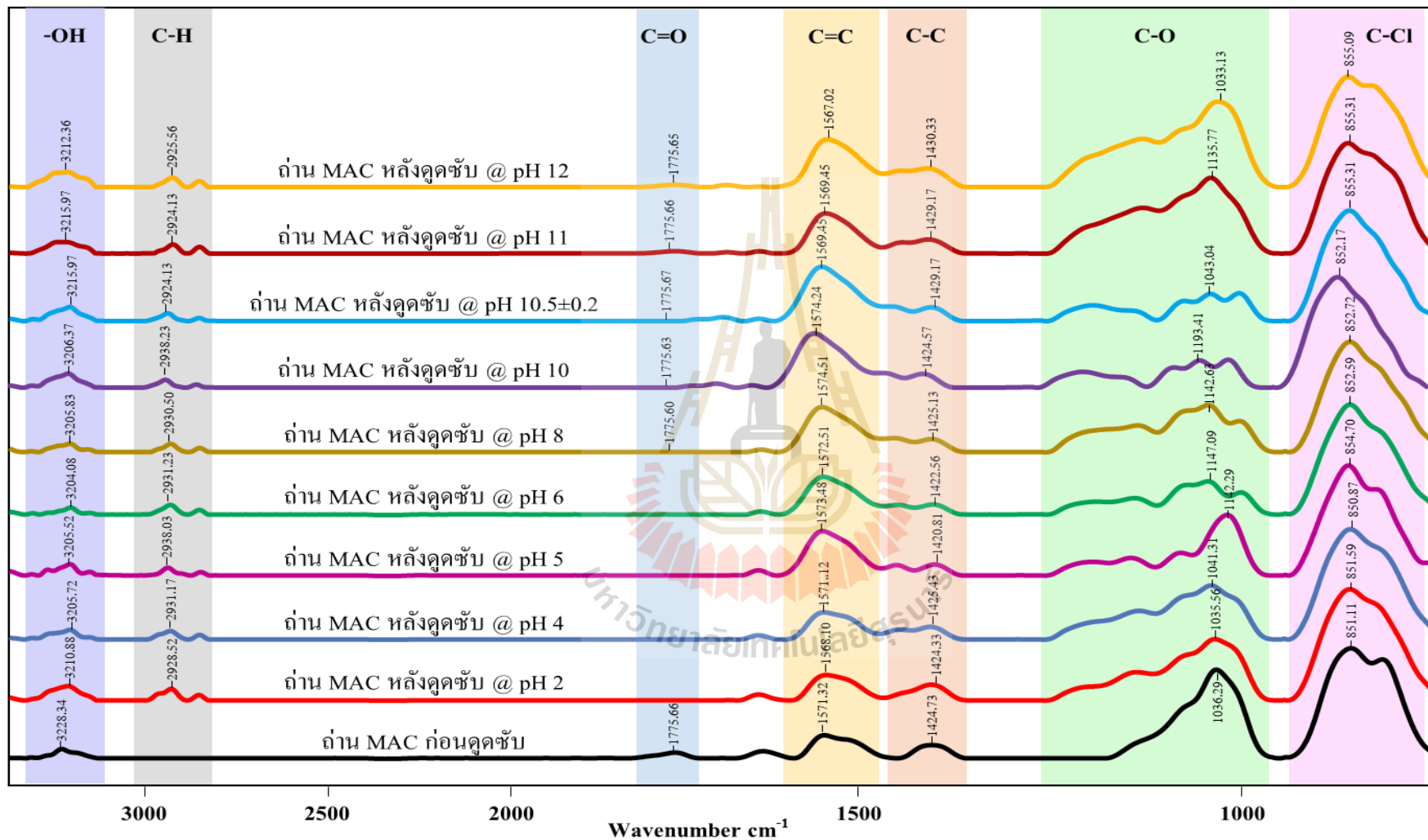
รูปที่ 4.12 สัดส่วนของ Phenolic-TCS และ Phenolate-TCS เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซาน (Sonia et al., 2020)



รูปที่ 4.13 แบบจำลองการดูดซับสารไตรโคลซานที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวถ่าน MAC

ตารางที่ 4.9 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน MAC ก่อนดูดซับและหลังดูดซับสารไตรโคลซานด้วยเทคนิค FTIR

| หมู่ฟังก์ชัน | ประเภทของสารประกอบ | เลขคลื่นที่พบพีคของสารไตรโคลซาน (cm ⁻¹) (Vidovix et al., 2022) | เลขคลื่นที่พบพีคของถ่าน MAC ก่อนดูดซับ (cm ⁻¹) | เลขคลื่นที่พบพีคของถ่าน MAC หลังดูดซับ (cm ⁻¹) | | | | | | | | |
|--|--------------------------|--|--|--|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| | | | | pH 2 | pH 4 | pH 5 | pH 6 | pH 8 | pH 10 | pH 10.5±0.2 | pH 11 | pH 12 |
| -OH | Hydroxyl | 3313 | 3228.34 | 3210.88 | 3205.72 | 3205.52 | 3204.08 | 3205.83 | 3206.37 | 3215.97 | 3215.97 | 3212.36 |
| CH CH ₂ CH ₃ | Aliphatic Hydrocarbon | 2949 | - | 2928.52 | 2931.17 | 2938.03 | 2931.23 | 2930.50 | 2938.23 | 2924.13 | 2924.13 | 2925.56 |
| C=O | Carbonyl | - | 1775.66 | - | - | - | - | 1775.60 | 1775.63 | 1775.67 | 1775.66 | 1775.65 |
| C=C | Aromatic compound | 1596 | 1571.32 | 1568.10 | 1571.12 | 1573.48 | 1572.51 | 1574.51 | 1574.24 | 1569.45 | 1569.45 | 1567.02 |
| C-C | Aromatic compound | 1500-1400 | 1424.73 | 1424.33 | 1425.43 | 1420.81 | 1422.56 | 1425.13 | 1424.57 | 1429.17 | 1429.17 | 1430.33 |
| C-O | Carboxylic, Ether, Ester | 1181 | 1036.29 | 1035.56 | 1041.31 | 1142.29 | 1147.09 | 1142.63 | 1193.41 | 1043.01 | 1135.77 | 1033.13 |
| C-Cl | Alkyl-Halide | 810 | 851.11 | 851.59 | 850.87 | 854.70 | 852.59 | 852.72 | 852.17 | 855.31 | 855.31 | 855.09 |



รูปที่ 4.14 หมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่าน MAC วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

4.2.2 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

จากผลการศึกษาอุณหภูมิจากการดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC นำมาวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ โดยนำผลการศึกษากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 298 ถึง 318 เคลวิน มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 สามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS , kJ/mol-K) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH , kJ/mol) ได้จากความชันและจุดตัดของสมการ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG , kJ/mol) ได้ ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.10 มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC จะเห็นได้ว่า มีค่า ΔH เท่ากับ 9.68 กิโลจูลต่อโมล ค่า ΔS เท่ากับ 0.04 กิโลจูลต่อโมล-เคลวิน และค่า ΔG อยู่ในช่วง -2.24 ถึง -3.04 กิโลจูลต่อโมล ดังแสดงในตารางที่ 4.10 จากผลการศึกษาสามารถอธิบายได้ว่า ค่า ΔH แสดงเครื่องหมายบวก แสดงว่าการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาอุณหภูมิจากการดูดซับ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่า ค่า ΔH เท่ากับ 9.68 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นกลไกทางกายภาพ (Edokpayi et al., 2020; Vidovix et al., 2019) ซึ่งการดูดซับเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Multilayer) สามารถเกิดการดูดซับได้ที่อุณหภูมิไม่สูง และไม่ต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยา (Aljamali et al., 2021; Mubarak et al., 2021) เมื่อพิจารณาว่า ΔS ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแบบสุ่ม จากการทบทวนงานวิจัยของ Sahmoune (2019) พบว่าค่า ΔS ที่แสดงเครื่องหมายบวก บ่งบอกถึงปฏิกิริยาการดูดซับแบบสุ่มที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณพื้นผิวของแข็ง-สารละลาย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ (Reversible processes) และจะเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีค่า ΔS ต่ำ จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่า ΔS มีค่าเท่ากับ 0.004 กิโลจูลต่อโมล-เคลวิน แสดงว่า ปฏิกิริยาการดูดซับสารไตรโคลซานที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณพื้นผิวหน้าของถ่าน MAC เกิดขึ้นแบบสุ่ม และสามารถผันกลับได้ และในส่วนของค่า ΔG ซึ่งแสดงเครื่องหมายลบ และค่า ΔG มีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ และเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง ๆ (Wongcharee et al., 2018; Heydari et al., 2022)

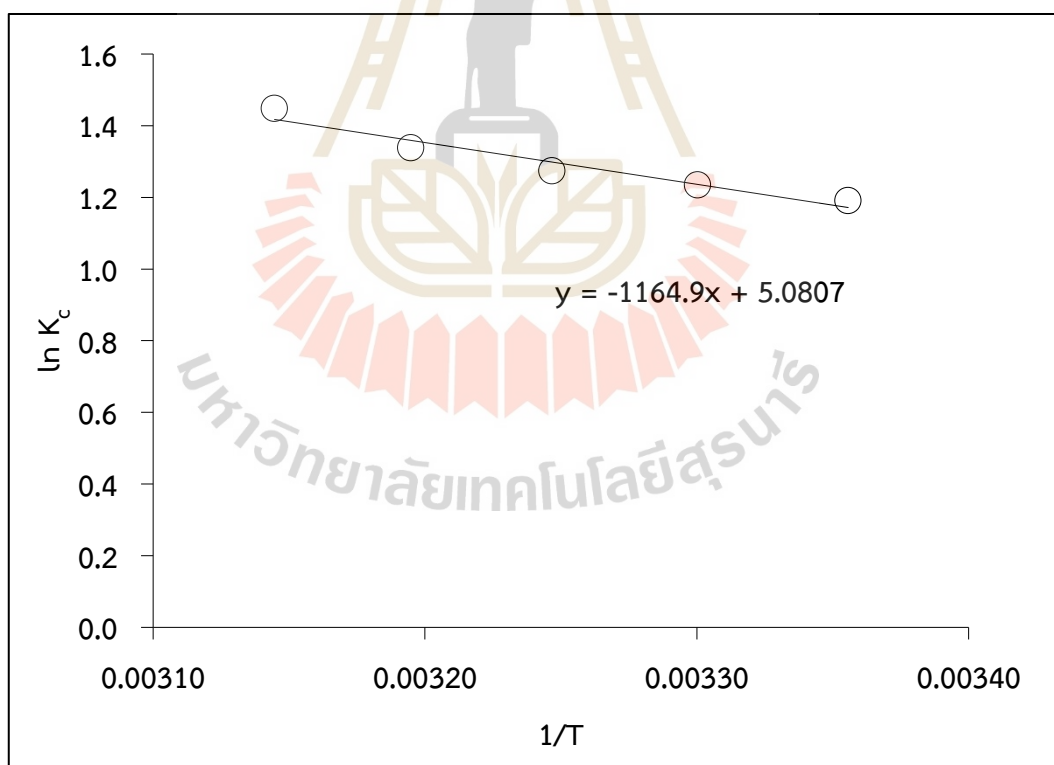
จากการทบทวนงานวิจัยของ Turco et al. (2019) ได้จำแนกกระบวนการดูดซับไว้ 2 ประเภท คือ เมื่อ ΔG มีค่ามากกว่า -20 กิโลจูลต่อโมล จัดเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และเมื่อค่า ΔG มีค่าน้อยกว่า -80 กิโลจูลต่อโมล จัดเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่า ΔG ทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง -2.90 ถึง -3.75 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าน้อยกว่า -20 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่ากระบวนการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ

จากผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับ ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอุณหภูมิจาก

การดูดซับ และเมื่อพิจารณากระบวนการดูดซับ พบว่าการดูดซับถูกควบคุมโดยกลไกทางกายภาพ ด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอร์วาลส์และแรงพันธะไฮโดรเจน ปฏิริยาการดูดซับเกิดขึ้นแบบสุ่ม สามารถผันกลับได้ และกระบวนการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vidovix et al. (2022) และ Triwiswara et al. (2020) ที่ได้ศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซาน พบว่าการดูดซับเกิดจากปฏิริยาดูดความร้อน เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเองได้โดยธรรมชาติ ปฏิริยาการดูดซับเกิดขึ้นแบบสุ่ม และสามารถผันกลับได้

ตารางที่ 4.10 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

| อุณหภูมิ (K) | ΔS (kJ/mol-K) | ΔH (kJ/mol) | ΔG (kJ/mol) |
|--------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 298 | 0.04 | 9.68 | -2.24 |
| 303 | 0.04 | 9.68 | -2.44 |
| 308 | 0.04 | 9.68 | -2.64 |
| 313 | 0.04 | 9.68 | -2.84 |
| 318 | 0.04 | 9.68 | -3.04 |



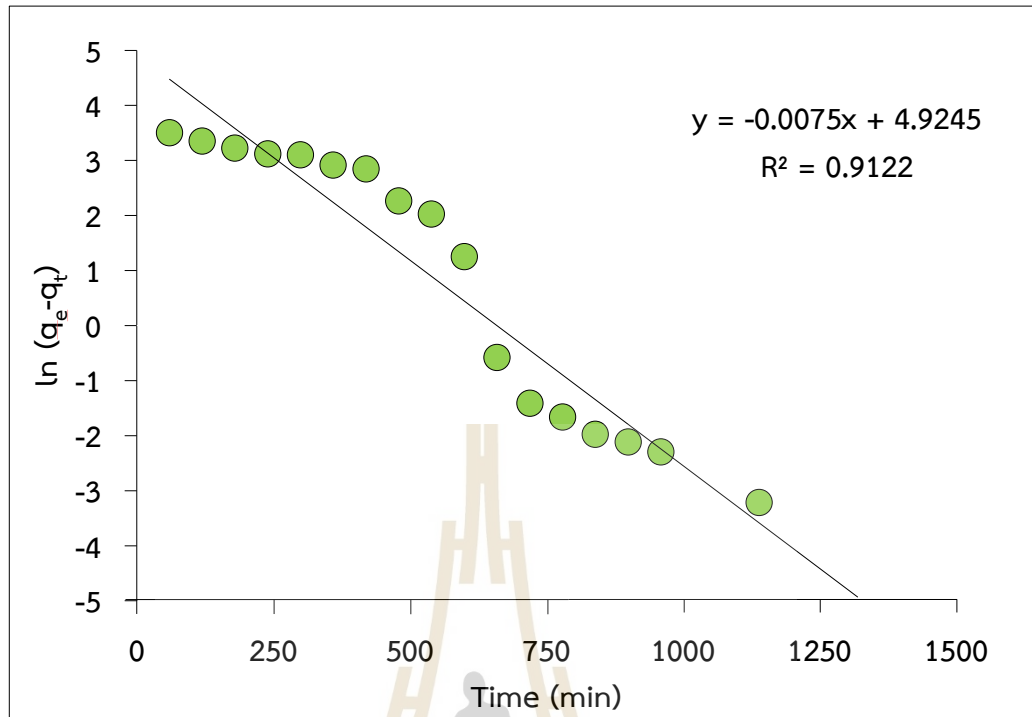
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

4.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

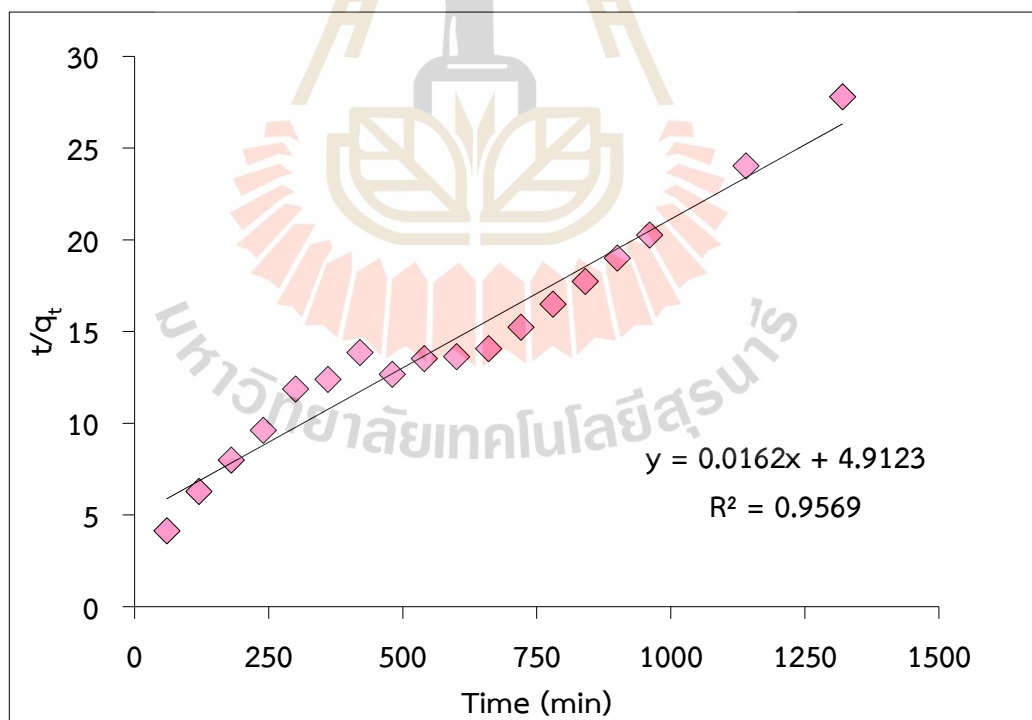
ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยการศึกษาที่ใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ค่าพีเอชสารไตรโคลซานเริ่มต้น 10.5 ± 0.2 นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ที่ระยะเวลาต่าง ๆ จนเข้าสู่สมดุล ในการศึกษาได้นำสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับมาทดสอบ 2 สมการ ได้แก่ สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order) และสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second-order) จากผลศึกษานำมาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - q_t)$ กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ k_1 (min^{-1}) และ q_e (mg/g) ได้จากจุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ และเมื่อนำผลการศึกษาวิเคราะห์ด้วยสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า t/q_t กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข) สามารถคำนวณหาค่าคงที่ k_2 (g/mg-min) และ q_e (mg/g) จุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression correlation, R^2) ของทั้งสองสมการ พบว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9569 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ($R^2=0.9122$) โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเท่ากับ 0.00005 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที่ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ ($q_{e,cal}$) กับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองแบบแบดช์ ($q_{e,exp}$) พบว่า ค่า $q_{e,cal}$ ของจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม ($q_{e,cal}=61.73$ มิลลิกรัมต่อกรัม) มีค่าใกล้เคียงกับค่า $q_{e,exp}$ (40.00 มิลลิกรัม) มากกว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับสารไตรโคลซานที่เกิดขึ้นมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC พบว่า เป็นการดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยที่เมื่อเวลาการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปจนเริ่มเข้าสู่สมดุล จะส่งผลให้จำนวนตำแหน่งเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวถ่าน MAC ลดลง เนื่องจากเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับและอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นผิวดูดซับ (Simiyu et al., 2023)

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ของอัตราเร็วการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

| $q_{e,exp}$ (mg/g) | Pseudo-first-order | | | Pseudo-second-order | | |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------|---------------------|-----------------------|--------|
| | k_1 (min^{-1}) | $q_{e,cal}$ (mg/g) | R^2 | k_2 (g/mg-min) | $q_{e,cal}$ (mg/g) | R^2 |
| 40 | 0.0173 | 137.62 | 0.9122 | 0.00005 | 61.73 | 0.9569 |



(ก) จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม



(ข) จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม

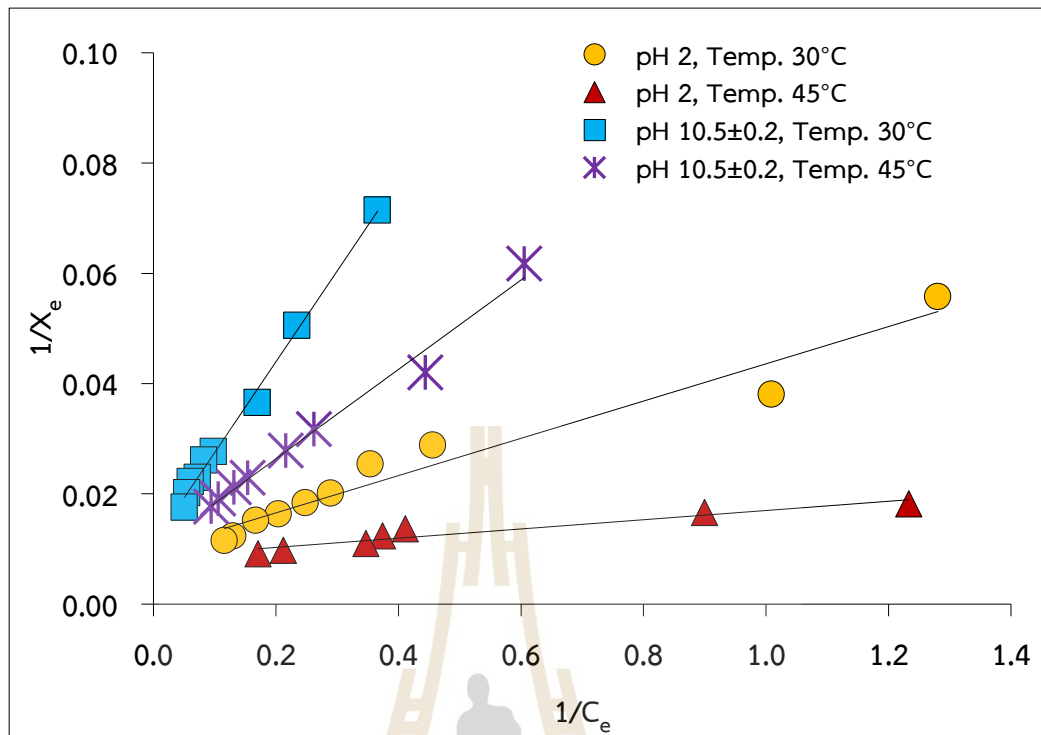
รูปที่ 4.16 ผลของจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC
(ก) อันดับหนึ่งเทียม และ (ข) อันดับสองเทียม

4.2.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

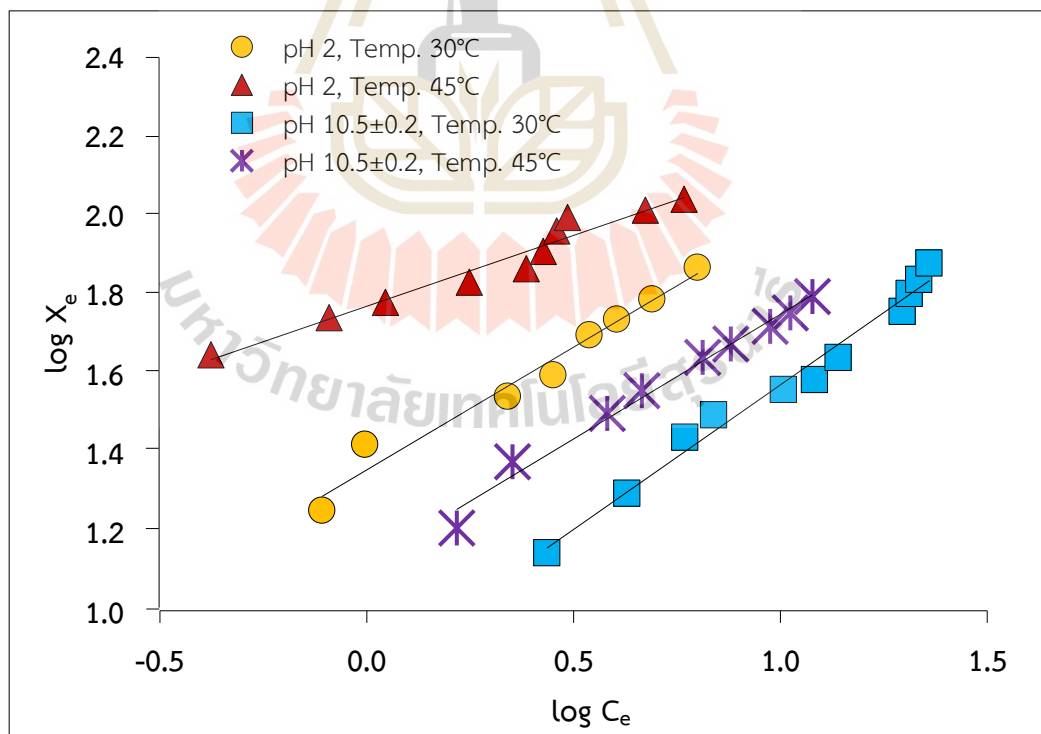
ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการศึกษาที่ใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นตั้งแต่ 5 ถึง 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 10.5 ± 0.2 นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) และ 45 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็วรอบการกวน 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 780 นาที โดยใช้ปริมาณถ่าน MAC 0.1 กรัม ในการศึกษาได้นำสมการไอโซเทอร์มการดูดซับมาทดสอบ 2 สมการ ได้แก่ สมการของแลงมัวร์ (Langmuir isotherm) และสมการของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการดูดซับ และคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยนำผลการศึกษามาวิเคราะห์หาค่าด้วยสมการไอโซเทอร์มแบบ Langmuir สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ก) ซึ่งจะได้สมการเส้นตรง สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ K_L (mg/g), q_m (mg/g) และ R_L ได้จากจุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ และเมื่อนำผลการศึกษามาวิเคราะห์หาค่าด้วยสมการไอโซเทอร์มแบบ Freundlich โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ข) ซึ่งสมการเส้นตรงที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_F ((mg/g)(L/mg) $^{1/n}$) ได้จากจุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.12 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่และค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

| ค่าพีเอช | 2 | | 10.5±0.2 | |
|-----------------------------|--------|--------|----------|--------|
| | ห้อง | 45 | ห้อง | 45 |
| $q_{e, \text{exp}}$ (mg/g) | 98.79 | 109.30 | 75.36 | 91.65 |
| Langmuir isotherm | | | | |
| $q_{m, \text{cal}}$ (mg/g) | 102.04 | 116.28 | 90.91 | 98.04 |
| K_L (mg/g) | 0.29 | 1.02 | 0.07 | 0.13 |
| R_L | 0.063 | 0.019 | 0.219 | 0.131 |
| R^2 | 0.9551 | 0.9245 | 0.9948 | 0.9846 |
| Freundlich isotherm | | | | |
| n | 1.61 | 2.80 | 1.37 | 1.59 |
| K_F (mg/g)(L/mg) $^{1/n}$ | 22.67 | 58.64 | 6.92 | 13.15 |
| R^2 | 0.9713 | 0.9582 | 0.9809 | 0.9848 |



(ก) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir



(ข) ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich

รูปที่ 4.17 ผลของไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบ (ก) Langmuir isotherm และ (ข) Freundlich isotherm

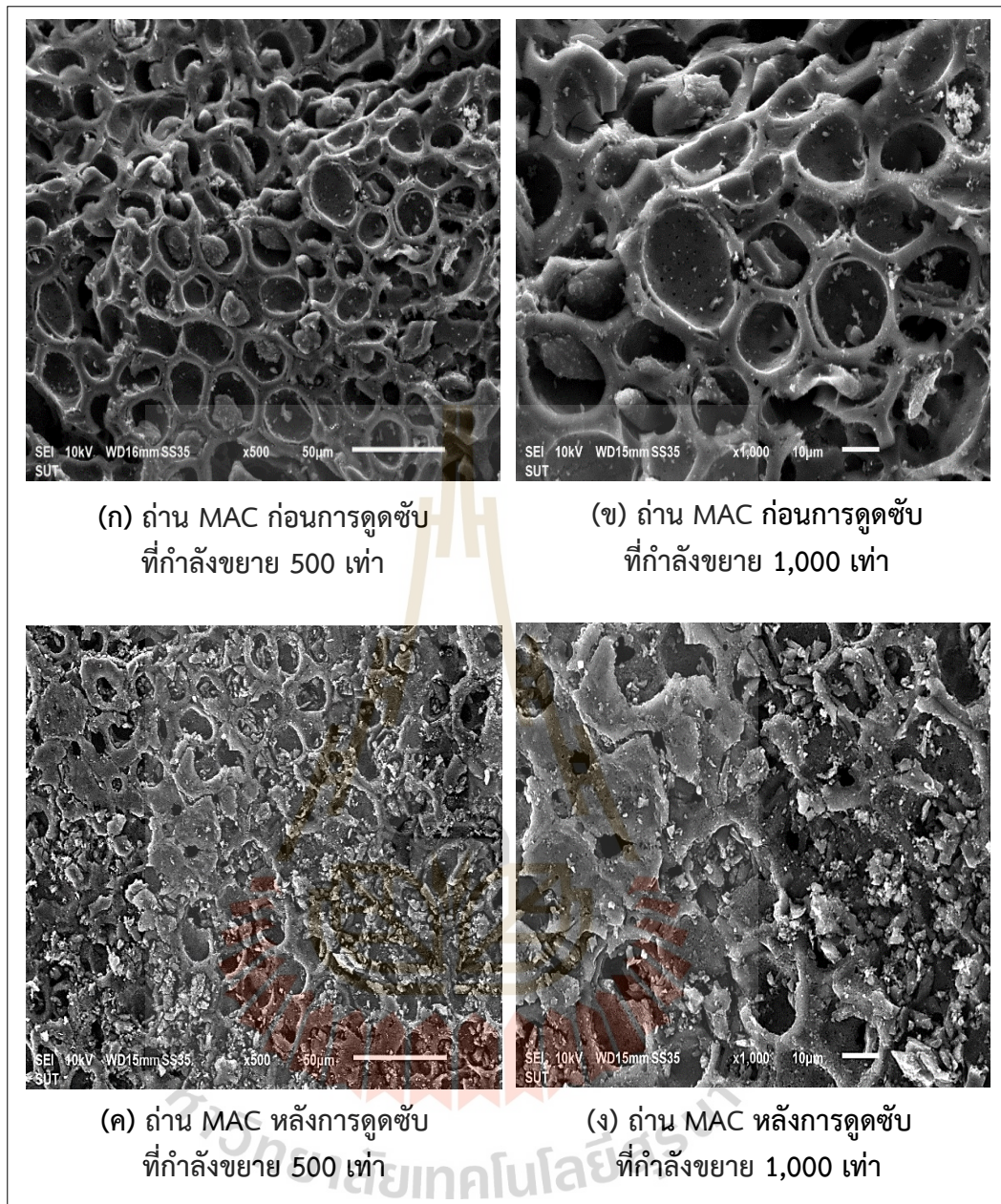
ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ดังแสดงในตารางที่ 4.12 เมื่อพิจารณาค่า R^2 พบว่า ทั้งสองไอโซเทอร์มมีค่า R^2 ใกล้เคียงกัน และมีค่าเข้าใกล้ 1 โดยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir มี R^2 อยู่ในช่วง 0.9245 ถึง 0.9948 และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9582 ถึง 0.9809 แสดงให้เห็นว่า การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC สอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich จากผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณสูงสุด ($q_{m, cal}$) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 90.91 ถึง 116.28 มิลลิกรัมต่อกรัม สามารถเรียงค่า $q_{m, cal}$ จากค่ามากไปค่าน้อยได้ดังนี้ $MAC_{pH=2, Temp.=45^\circ C} > MAC_{pH=2, Temp.=30^\circ C} > MAC_{pH=10.5\pm 0.2, Temp.=45^\circ C} > MAC_{pH=10.5\pm 0.2, Temp.=30^\circ C}$ ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับจากการทดลอง ($q_{e, exp}$) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 75.36 ถึง 109.30 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่าผลการศึกษาไอโซเทอร์มมีความสอดคล้องกับการศึกษาผลของอุณหภูมิและค่าพีเอชเริ่มต้น เนื่องมาจากการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และที่ค่าพีเอชในช่วงกรดจะส่งต่อรูปของสารไตรโคลซานเป็นรูป Phenolic-TCS และประจุบนพื้นผิวถ่าน MAC เป็นประจุลบ ส่งผลให้ $MAC_{pH=2, Temp.=45^\circ C}$ มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 116.28 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาค่าปัจจัยของการแยก (Separation factor or equilibrium parameter, R_L) ซึ่งแสดงถึงความชอบของการดูดซับ และสามารถเกิดการดูดซับได้ดี เมื่อมีค่า R_L อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 (Triwiswara et al., 2020) จากผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า R_L ที่คำนวณได้มีค่าอยู่ในช่วง 0.119 ถึง 0.219 แสดงว่าผลการศึกษาสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และสามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ได้ดี ภายใต้สมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว (Monolayer Sorption) ซึ่งในแต่ละตำแหน่ง active site บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะสามารถจับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียวเท่านั้น โดยโมเลกุลของสารเหล่านั้นจะไม่ทำปฏิกิริยาต่อกัน แรงดูดซับเป็นแบบแวนเดอร์วาลส์ นอกจากนี้พื้นผิวของตัวดูดซับยังมีลักษณะสม่ำเสมอ และเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous surface) (Wongcharee et al., 2018; Triwiswara et al., 2020)

จากผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich จะได้ค่าความหนาแน่นในการดูดซับ (n) อยู่ในช่วง 1.37 ถึง 2.80 สามารถเรียงค่า n จากค่ามากไปค่าน้อยได้ดังนี้ $MAC_{pH=2, Temp.=45^\circ C} > MAC_{pH=2, Temp.=30^\circ C} > MAC_{pH=10.5\pm 0.2, Temp.=45^\circ C} > MAC_{pH=10.5\pm 0.2, Temp.=30^\circ C}$ ตามลำดับ จากการทบทวนงานวิจัยของ Vidovix et al. (2019) พบว่าเมื่อ $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับที่สามารถเกิดการดูดซับได้นั้นมีปริมาณมาก ในขณะที่ค่า $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวของตัวดูดซับมีจำกัด สามารถเรียงค่า $1/n$ จากมากไปน้อยได้ ดังนี้ $MAC_{pH=10.5\pm 0.2, Temp.=30^\circ C} > MAC_{pH=10.5\pm 0.2, Temp.=45^\circ C} > MAC_{pH=2, Temp.=30^\circ C} > MAC_{pH=2, Temp.=45^\circ C}$ ตามลำดับ แสดงว่า ปริมาณพื้นผิวของถ่าน MAC ที่สามารถเกิดการดูดซับได้นั้นมีจำกัด โดย $MAC_{pH=10.5\pm 0.2, Temp.=30^\circ C}$ เหลือพื้นที่ในการดูดซับมากที่สุด เพราะได้ค่าความสามารถในการดูดซับน้อยที่สุด ($q_{e, exp} = 75.36$ มิลลิกรัมต่อกรัม) ในขณะที่ $MAC_{pH=2, Temp.=45^\circ C}$ เหลือพื้นที่ในการดูดซับน้อยที่สุด เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ($q_{e, exp} = 109.30$ มิลลิกรัมต่อกรัม)

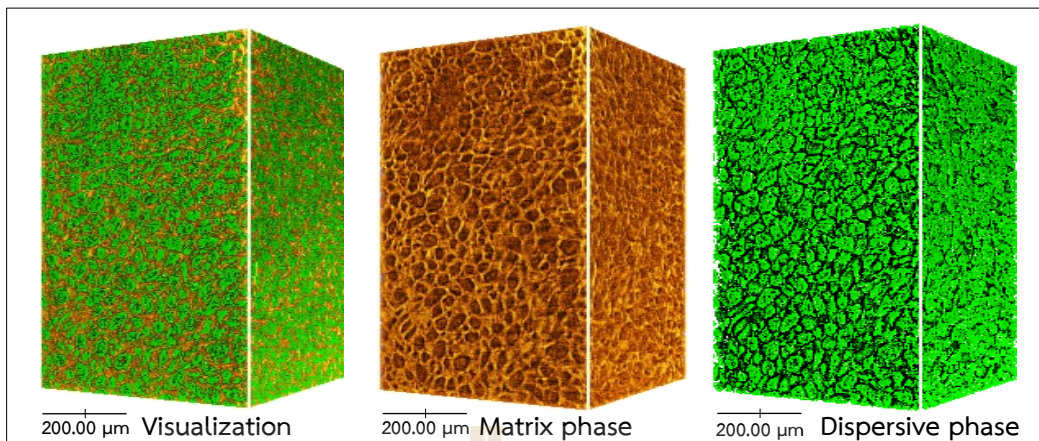
และเมื่อพิจารณาสมมติฐานของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Freundlich พบว่า กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Multilayer sorption) พื้นผิวของตัวดูดซับไม่สม่ำเสมอ และไม่ใช่น้ำเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) และโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ (Wongcharee et al., 2018; Triwiswara et al., 2020)

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับในการวิจัยครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun et al. (2018) ที่แสดงว่าสารไตรโคลซานสามารถจับคู่กันเอง และเชื่อมต่อกันเองให้กลายเป็นโครงสร้างหลายโมเลกุล (Oligomer) โดยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ที่สูญเสียโปรตรอน (H^+) จะส่งผลให้อะตอมของออกซิเจนในโครงสร้างสารไตรโคลซานไม่เสถียร และเป็นประจุลบ (O^-) ซึ่งสามารถจับกับคาร์บอนอะตอมในวงแหวนอะโรมาติกได้ แสดงว่าสารไตรโคลซานสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น จากผลการศึกษาพบว่า ค่า R^2 ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich มีค่ามากกว่า 0.9000 ซึ่งสามารถยอมรับได้ ส่งผลให้การอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC นั้นมีความแตกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัติของถ่าน MAC มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซาน เช่น ลักษณะ ขนาด การกระจายตัวของรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยากับพื้นผิวถ่าน MAC ซึ่งทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเป็นไปได้ทั้งการทำปฏิกิริยาระหว่างประจุกับการแพร่เข้าสู่รูพรุนของถ่าน MAC จากผลการศึกษา BET analysis พบว่าถ่าน MAC ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 93 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 นาโนเมตร และจากการทบทวนงานวิจัยของ Kaur et al. (2018) พบว่าสารไตรโคลซานมีขนาดโมเลกุลเท่ากับ $1.42 \times 0.69 \times 0.75$ นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าสารไตรโคลซานมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของถ่าน MAC จึงมีความเป็นไปได้ในการแพร่กระจายโมเลกุลสารไตรโคลซานเข้าสู่รูพรุนของถ่าน MAC ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ค)-(ง) ที่พบว่าพื้นผิวของถ่าน MAC หลังดูดซับเกิดการอุดตันของสารไตรโคลซานเมื่อเปรียบเทียบกับถ่าน MAC ก่อนดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก)-(ข) เนื่องจากเกิดการดูดซับสารไตรโคลซานที่บริเวณพื้นผิวของถ่าน MAC

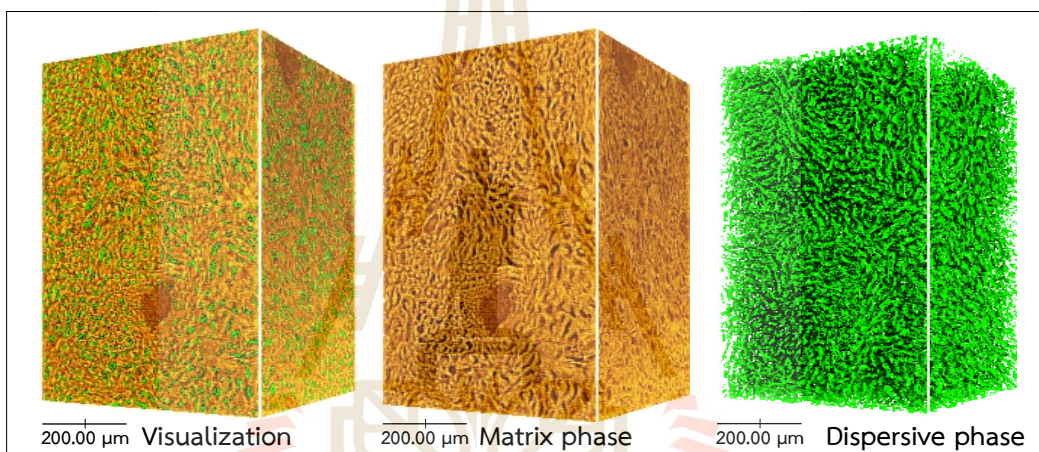
ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค SEM สอดคล้องกับผลการศึกษาภาพเสมือนสามมิติของ XTM ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าถ่าน MAC ก่อนดูดซับ (รูปที่ 4.19 ก) มีพื้นที่สี่เหลี่ยมเป็นบริเวณกว้างแสดงถึงรูพรุนที่มีปริมาณมาก เนื่องจากยังไม่เกิดการดูดซับ โดยมีปริมาณรูพรุนเปิดร้อยละ 74.74 และปริมาณรูพรุนปิดร้อยละ 25.26 หลังการดูดซับพบว่าสารไตรโคลซานสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ โดยลักษณะสมบัติของถ่าน MAC หลังผ่านการดูดซับที่มีระยะเวลาการดูดซับ 870 นาที (รูปที่ 4.19 ข) มีบริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยมลดลง แต่บริเวณสี่เหลี่ยมที่เป็นตัวแทนของแข็ง (พื้นผิวถ่าน MAC และสารไตรโคลซาน) มีพื้นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้รูพรุนเปิดมีปริมาณลดลงเหลือร้อยละ 70.59 เนื่องจากเกิดการดูดซับสารไตรโคลซาน และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการดูดซับเป็น 1,770 นาที (รูปที่ 4.19 ค) พบว่ามีบริเวณพื้นที่สี่เหลี่ยมน้อยที่สุด ส่งผลทำให้รูพรุนเปิดมีปริมาณลดลงเหลือเพียงร้อยละ 12.84 เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่าน MAC สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้เพิ่มขึ้น



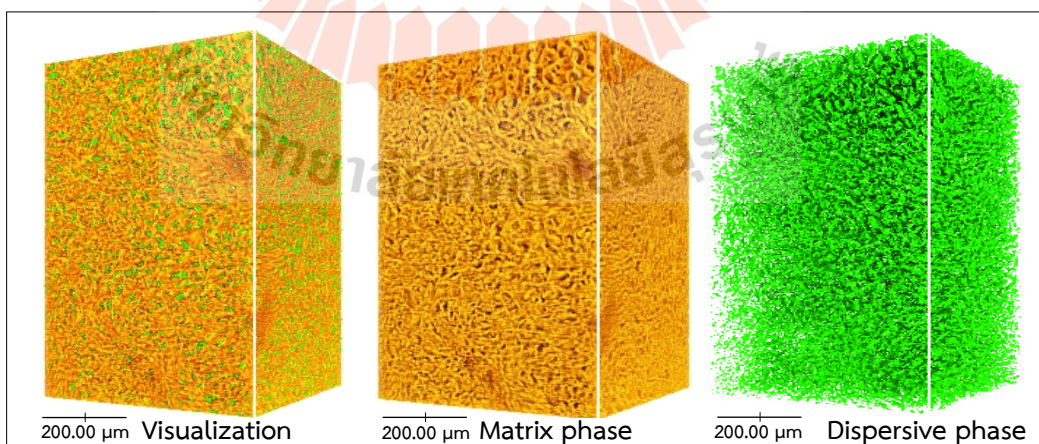
รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของถ่าน MAC ก่อนดูดซับที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 1,000 เท่า และ ถ่าน MAC หลังดูดซับที่กำลังขยาย (ค) 500 เท่า (ง) 1,000 เท่า



(ก) ถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ

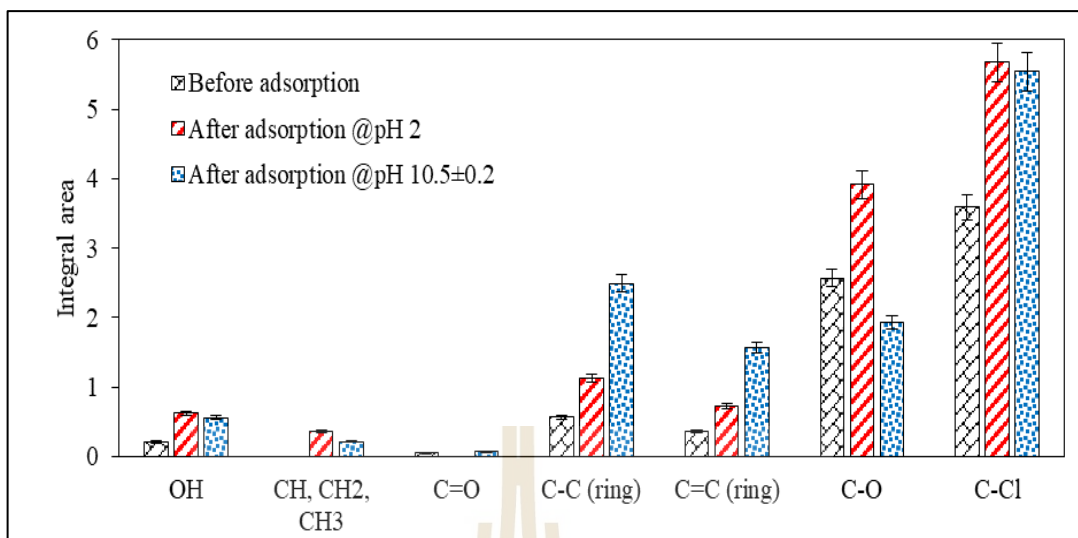


(ข) ถ่าน MAC หลังการดูดซับ ที่ระยะเวลาการดูดซับ 870 นาที



(ค) ถ่าน MAC หลังการดูดซับ ที่ระยะเวลาการดูดซับ 1,770 นาที

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของ (ก) ถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และหลังดูดซับ ที่ระยะเวลาการดูดซับ (ข) 870 นาที และ (ค) 1,770 นาที



รูปที่ 4.20 ผลการอินทิเกรตพื้นที่ได้พีคของหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่าน MAC

จากผลการศึกษา XTM และ SEM ซึ่งให้เห็นว่าสารไตรโคลซานถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค FTIR โดยทำการวิเคราะห์พื้นที่ได้พีคของแต่ละเลขคลื่น เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่พบ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าหมู่ฟังก์ชันที่พบบนถ่าน MAC หลังดูดซับมีปริมาณเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ ถ่าน MAC หลังดูดซับสารละลายไตรโคลซานที่พีเอชเท่ากับ 2 พบหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) หมู่อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (CH, CH₂, CH₃) หมู่คาร์บอกซิลิก (C=O), หมู่คาร์บอนิล (C-O) และหมู่อัลคิล-ฮาไลด์ (C-Cl) มีปริมาณมากกว่าถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และถ่าน MAC หลังดูดซับสารละลายไตรโคลซานที่พีเอชเท่ากับ 10.5±0.2 เนื่องจากที่พีเอช 2 มีความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดอยู่ในช่วง 90.91 ถึง 102.04 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยอะตอมออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันของ -OH และ C-O มีคุณสมบัติเป็นประจุลบ (Li et al., 2023) แสดงว่าพื้นผิวถ่าน MAC ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 ประกอบด้วยประจุลบเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา pH_{PZC} ที่เมื่อค่า pH_{Solution} (2) มีค่าน้อยกว่า pH_{PZC} (7.9) จะส่งผลให้พื้นผิวถ่าน MAC เป็นประจุบวก ส่วนสารไตรโคลซานเมื่อมีค่า pH_{Solution} (2) มีค่าน้อยกว่า pK_a (8.14) จะอยู่ในรูป Phenolic-TCS ซึ่งสามารถเกิดการดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC ได้ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ และพันธะไฮโดรเจน (Triwiswara et al., 2020; Vidovix et al., 2020) ในขณะที่ถ่าน MAC หลังดูดซับสารละลายไตรโคลซานที่พีเอชเท่ากับ 10.5±0.2 พบหมู่ฟังก์ชันแอลเคน (C-C) และแอลคีน (C=C) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของวงแหวนอะโรมาติก มีปริมาณมากกว่าถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และถ่าน MAC หลังดูดซับสารละลายไตรโคลซานที่พีเอช 2 สามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเกิดจากพันธะ $\pi-\pi$ เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากที่สภาวะต่างค่า pH_{Solution} (10.5±0.2) มีค่ามากกว่า pH_{PZC} (7.9) ส่งผลให้พื้นผิวถ่าน MAC เกิดการสูญเสียโปรตรอน ทำให้พื้นผิวมีประจุลบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนสารไตรโคลซานจะเปลี่ยนรูปไปเป็น Phenolate-TCS ซึ่งมีความเป็นประจุลบ (OH⁻) มากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตย์แบบผลักกัน (Repulsive forces) ระหว่างสารไตรโคลซานและพื้นผิวถ่าน MAC ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้มีค่า

ความสามารถในการดูดซับน้อยกว่าสภาวะกรด แต่ยังสามารถเกิดการดูดซับได้ เนื่องจากพันธะ π - π และพันธะไฮโดรเจน (Triwiswara et al., 2020) และการเชื่อมต่อโมเลกุลสารไตรโคลซานด้วยตัวเอง โดยพันธะออกซิเจน (Sun et al., 2018)

จากผลการทดลองกลไกการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าสารไตรโคลซานถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC ได้ทั้งการดูดซับทางภาพภาพ และทางเคมี เช่น การสร้างแรงยึดเหนี่ยวโดยแรงวนเดอวาลส์ พันธะไฮโดรเจน พันธะออกซิเจน พันธะ π - π และการแพร่เข้าสู่รูพรุนของถ่าน MAC ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

4.2.5 การจัดกลุ่มความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ด้วยเทคนิค HCA (Hierarchical Cluster Analysis)

นำผลการศึกษา FTIR ของถ่าน MAC ก่อนดูดซับ และหลังดูดซับสารไตรโคลซานที่มีค่าพีเอชแตกต่างกันในช่วง 2 ถึง 12 ที่สภาวะการดูดซับความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 780 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (สภาวะจากการทดลองแบบแบตช์) มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กันของตัวแปรด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบขั้นตอน (Hierarchical Cluster Analysis) ผลการศึกษาการจัดกลุ่มต่อความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ดังแสดงในตารางที่ 4.13 มีรายละเอียดดังนี้

การจัดกลุ่มด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบขั้นตอนมีลักษณะการจำแนกกลุ่มตามความสัมพันธ์กันคล้ายต้นไม้ สามารถเป็นตัวแทนในการอธิบายว่าตัวแปรที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน หรือมีความสัมพันธ์กัน จะมีระยะทางของเส้นความแปรปรวนใกล้เคียงกัน (Abdulhafedh, 2021) ผลการจำแนกกลุ่มด้วยเทคนิคการจัดกลุ่มแบบขั้นตอนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายสารไตรโคลซาน พบว่า สามารถจัดกลุ่มได้ 4 กลุ่ม รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.21 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 คือ ถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ จัดเป็นตัวแทนในการอธิบายว่าไม่เกิดการดูดซับ และไม่พบโมเลกุลสารไตรโคลซานบนพื้นผิวถ่าน MAC

- กลุ่มที่ 2 คือ ถ่าน MAC หลังดูดซับสารไตรโคลซานในช่วงค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 11 ถึง 12 จัดเป็นตัวแทนของสภาวะการดูดซับที่เกิดการดูดซับได้น้อย ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับอยู่ในช่วง 12.91 ถึง 22.26 มิลลิกรัมต่อกรัม

- กลุ่มที่ 3 คือ ถ่าน MAC หลังดูดซับสารไตรโคลซานที่ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 2 จัดเป็นตัวแทนของสภาวะการดูดซับที่เกิดการดูดซับได้มาก มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 38.49 มิลลิกรัมต่อกรัม

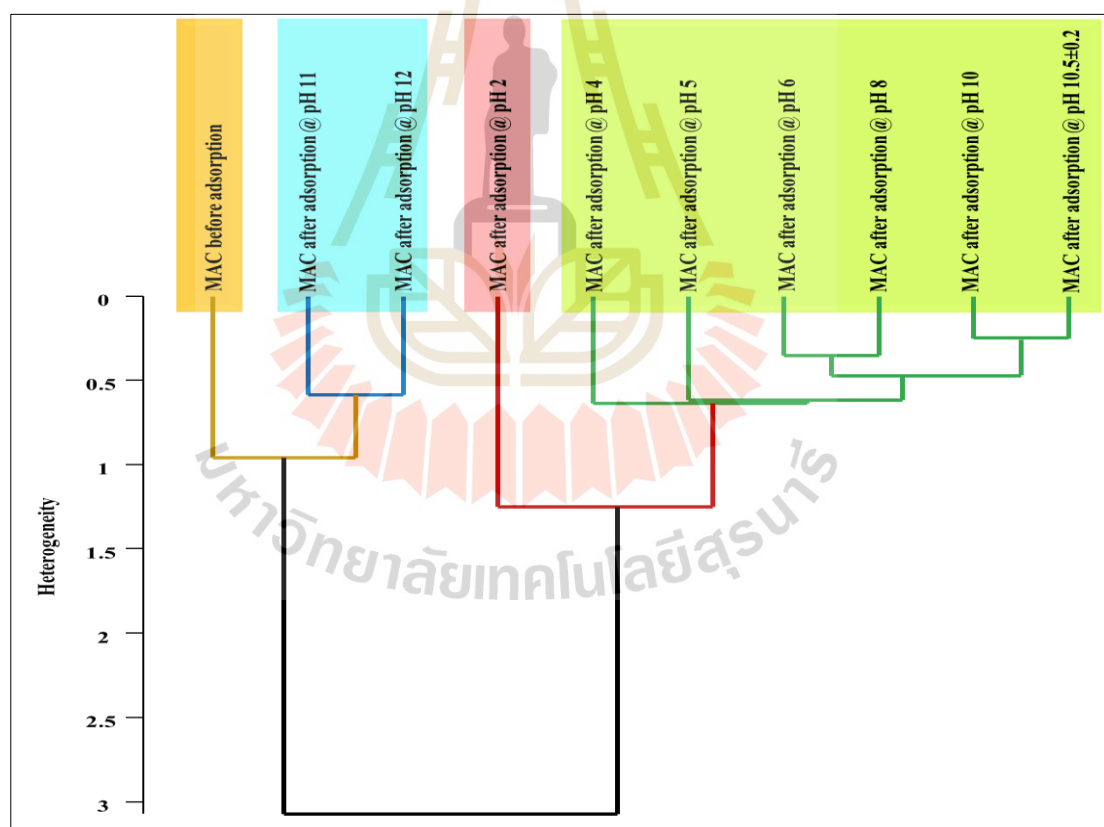
- กลุ่มที่ 4 คือ ถ่าน MAC หลังดูดซับสารไตรโคลซานในช่วงค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 ถึง 10.5 ± 0.2 เป็นตัวแทนของสภาวะการดูดซับที่มีค่าความสามารถในการดูดซับอยู่ในช่วง 27.80 ถึง 37.08 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่า กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน อาจมีเหตุผลมาจากในสภาวะต่างแ่มีค่าความสามารถในการดูดซับน้อยมาก ผลการจัดกลุ่มของตัวแปร (Variable) จึงมีความใกล้เคียงกับถ่าน MAC ก่อนดูดซับ ส่งผลทำให้ถูกจัดกลุ่มที่มีความสัมพันธ์สูงกับกลุ่มที่ 1 แต่มีความสัมพันธ์กับกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 4 น้อยที่สุด เมื่อพิจารณาจากกลุ่มที่ 4 พบว่าข้อมูลในกลุ่มประกอบด้วยค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4 ถึง 10.5 ± 0.2 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของถ่าน MAC หลังดูดซับที่ค่าพีเอชของสารไตรโคลซานเท่ากับ 10 และ 10.5 ± 0.2 มีความสัมพันธ์กันมากที่สุด ความสัมพันธ์รองลงมา คือ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 และ 8 ซึ่งจากผลการศึกษาจะพบว่าค่าพีเอชในช่วง 6 ถึง 10.5 ± 0.2 ถูกจัดให้เป็นกลุ่มข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันมากที่สุด อาจเนื่องมาจากสารละลายไตรโคลซานอยู่ในช่วงสภาวะกรดอ่อนและด่างอ่อน ส่งผลทำให้สปีชีส์ของสารไตรโคลซานมีแนวโน้มอยู่ในรูป Phenolate-TCS เป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้กลุ่มข้อมูลนี้มีการดูดซับใกล้เคียงกันและมีความสัมพันธ์กันสูง นอกจากนั้นพบว่าค่าพีเอชในช่วง 6 ถึง 10.5 ± 0.2 มีความสัมพันธ์กับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และ 5 เนื่องมาจากที่สภาวะกรดแ่ก่ ส่งผลทำให้สารไตรโคลซานอยู่ในรูป Phenolic-TCS และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่าสภาวะต่าง จึงทำให้กลุ่มข้อมูลของค่าพีเอชในช่วง 6 ถึง 10.5 ± 0.2 กับค่าพีเอชในช่วง 4 ถึง 5 มีความสัมพันธ์กันลดลง แต่เมื่อพิจารณาผลการจัดกลุ่มแล้วพบว่ากลุ่มที่ 4 มีความสัมพันธ์กับกลุ่มที่ 3 มากที่สุด และมีความสัมพันธ์กับกลุ่มที่ 1 และ 2 น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าลักษณะการดูดซับในกลุ่มที่ 4 มีความใกล้เคียงกับการดูดซับในกลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นตัวแทนของสภาวะที่เกิดการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 38.49 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากผลการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์ และการจัดกลุ่มแบบขั้นตอนสามารถพิสูจน์ได้ว่าค่าพีเอชของสารไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 มีความสัมพันธ์การดูดซับใกล้เคียงกับค่าพีเอชเท่ากับ 2 ดังนั้น สภาวะที่ได้ถูกนำมาใช้ออกแบบการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column กำหนดสภาวะที่ใช้ในการเดินระบบ ดังนี้ กำหนดอุณหภูมิของการดูดซับเท่ากับอุณหภูมิห้อง (30 ± 5 องศาเซลเซียส) เพื่อลดต้นทุนของความต้องการใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ และค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 จากการทบทวนงานวิจัย พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 เป็นค่าพีเอชที่พบในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น น้ำเสียอุตสาหกรรมสารลดแรงตึงผิว เช่น ผงซักฟอก และสบู่ มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.4 ถึง 12.68 (Aygün, 2011; Allah et al., 2016; Ayangunna et al., 2016) และน้ำเสียอุตสาหกรรมซักรีด มีค่าพีเอชในช่วง 7.0 ถึง 12.5 (Watiniasih et al., 2019; Jayanto et al., 2021; Procházková et al., 2022) และเพื่อลดต้นทุนค่าสารเคมีในการปรับค่าพีเอช เหมาะกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

ตารางที่ 4.13 ผลการจำแนกกลุ่มถ่าน MAC ก่อนและหลังดูดซับสารไตรโคลซานด้วยเทคนิค HCA

| กลุ่มที่ | ถ่าน MAC | ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) |
|----------|------------------------------------|------------------------------|
| 1 | MAC before adsorption | 0 |
| 2 | MAC after adsorption @ pH 11 | 22.26 |
| | MAC after adsorption @ pH 12 | 12.91 |
| 3 | MAC after adsorption @ pH 2 | 38.49 |
| 4 | MAC after adsorption @ pH 4 | 37.08 |
| | MAC after adsorption @ pH 5 | 34.67 |
| | MAC after adsorption @ pH 6 | 35.24 |
| | MAC after adsorption @ pH 8 | 33.65 |
| | MAC after adsorption @ pH 10 | 29.87 |
| | MAC after adsorption @ pH 10.5±0.2 | 27.80 |



รูปที่ 4.21 การจำแนกกลุ่มของค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานด้วยเทคนิค HCA

4.3 การศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์

จากผลการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบแบดซ์ นำมาใช้ในการออกแบบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป โดยทำการศึกษาดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในระบบคอลัมน์ 2 แบบ ได้แก่ ระบบคอลัมน์แบบไม่เคลื่อนที่ (Fixed bed column) และระบบคอลัมน์แบบพัลส์ (Pulsed bed column) กำหนดให้มีรูปแบบการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับแบบคอลัมน์ โดยใช้วิธีการศึกษาค่า Breakthrough curve ได้แก่ อัตราการไหล ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น ความสูงชั้นสารดูดซับ และระยะชักกลับ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column

กำหนดรูปแบบการไหลผ่านคอลัมน์เป็นแบบ Up-flow ซึ่งจะมีถ่าน MAC 14.02 กรัม ถูกบรรจุอยู่ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร ทำการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคอลัมน์แบบ Fixed bed column ได้แก่ อัตราการไหล (6, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที) ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น (20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร) และความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC (6, 8 และ 10 เซนติเมตร) รายละเอียดผลการศึกษามีดังนี้

4.3.1.1 ผลการศึกษาอัตราการไหล

ผลการศึกษาอัตราการไหลที่มีต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับคอลัมน์แบบ Fixed bed column โดยศึกษาช่วงอัตราการไหล 6, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที การศึกษารังนี้ใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 ที่ความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร ผลการศึกษาอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ดังแสดงในตารางที่ 4.14 มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาอัตราการไหลของสารไตรโคลซาน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารไตรโคลซานจาก 6, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่า ระยะเวลาที่จุดเบรคทูร์ (Breakthrough time, t_b) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่การดูดซับเริ่มหมดสภาพมีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 180, 150 และ 120 นาทีแรกของการดูดซับ ตามลำดับ เช่นเดียวกับระยะเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับ (Exhaustion time, t_e) ก็มีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 4,590, 3,990 และ 3,510 นาทีตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลส่งผลต่อการดูดซับ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลสูงขึ้น ส่งผลให้สารละลายไตรโคลซานเคลื่อนที่ผ่านชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC ได้ดีขึ้น โมเลกุลสารไตรโคลซานเกิดการสัมผัสกับพื้นผิวของถ่าน MAC เป็นบริเวณกว้าง ทำให้เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้มีระยะเวลาที่จุดเบรคทูร์และระยะเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่สั้นลง (Ho and Adnan, 2021) จากผลการศึกษาในกราฟรูปที่ 4.22 พบว่าที่อัตราการไหลสูงมีเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะค่อนข้างชันมากกว่าที่อัตราการไหลต่ำ เรียงลำดับได้ดังนี้ อัตราการไหล 10, 8 และ 6 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำ เช่น 6 มิลลิลิตรต่อนาที มีระยะเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับนานกว่า ส่งผลให้การดูดซับเข้า

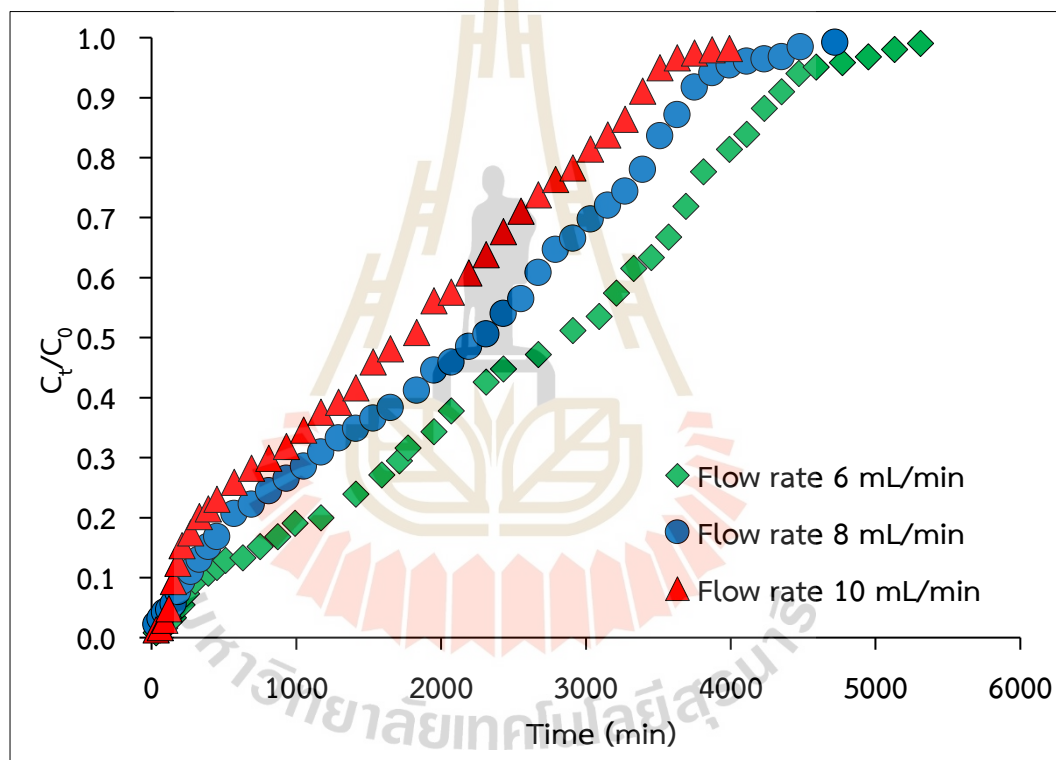
สู่สภาวะเบตอิมตัวได้ช้า ส่งผลให้เส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะแบน แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะความชันเพิ่มขึ้นและเลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายในระยะเวลาอันสั้นส่งผลทำให้ระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัวลดลง (Jang and Lee et al., 2016; ปณพร เล็กประเสริฐ และคณะ, 2018; Ho and Adnan, 2021) เมื่อพิจารณาปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่ใช้ในการดูดซับ (Volume of effluent, V_{eff}) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 6, 8 เป็น 10 มิลลิลิตรต่อนาที ส่งผลให้ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 27.54, 31.92 เป็น 35.10 ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากมีอัตราการไหลสูงจึงมีปริมาณสารละลายไตรโคลซานเข้าสู่คอลัมน์เพิ่มขึ้น (Machedi et al., 2019; Patel, 2019) ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่อัตราการไหลสารไตรโคลซานเท่ากับ 6, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทู (q_b) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.51, 1.62 และ 1.65 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะเบตอิมตัว (q_e) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เท่ากับ 21.60, 23.36 และ 23.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารละลายสามารถสัมผัสกับตัวดูดซับได้อย่างทั่วถึง และมีแรงผลักดันโมเลกุลสารไตรโคลซานที่เพียงพอต่อการเอาชนะความต้านทานการถ่ายโอนมวล (Mass transfer resistance) (Arroyo and Silva, 2013) ดังนั้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลสารไตรโคลซานเข้าสู่คอลัมน์เท่ากับ 6, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ส่งผลทำให้ความสูงของชั้นขอบเขตการถ่ายโอนมวล (L_{MTZ}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเท่ากับ 9.61, 9.62 และ 9.62 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีบริเวณที่เกิดการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง และมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีระยะเวลาสัมผัสเพียงพอสำหรับการดูดซับ (Futalan and Wan, 2022; Plangklang and Sookkummerd, 2023) จากผลการศึกษาในครั้งนี้จึงพบว่า ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 23.60 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 3,510 นาที ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้อัตราการไหลของสารไตรโคลซานเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

4.3.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น

ผลการศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับคอลัมน์แบบ Fixed bed column โดยศึกษาช่วงความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 ที่ความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร ผลการศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ดังแสดงในตารางที่ 4.15 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในการดูดซับแบบ Fixed bed column

| สภาวะที่ศึกษา | | | ค่าคงที่ Breakthrough curve | | | | | |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Q (mL/min) | C ₀ (mg/L) | H (cm) | t _b (min) | t _s (min) | V _{eff} (L) | q _b (mg/g) | q _e (mg/g) | L _{MTZ} (cm) |
| 6 | 20 | 10 | 180 | 4,590 | 27.54 | 1.51 | 21.60 | 9.61 |
| 8 | 20 | 10 | 150 | 3,990 | 31.92 | 1.62 | 23.36 | 9.62 |
| 10 | 20 | 10 | 120 | 3,510 | 35.10 | 1.65 | 23.60 | 9.66 |



รูปที่ 4.22 ผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

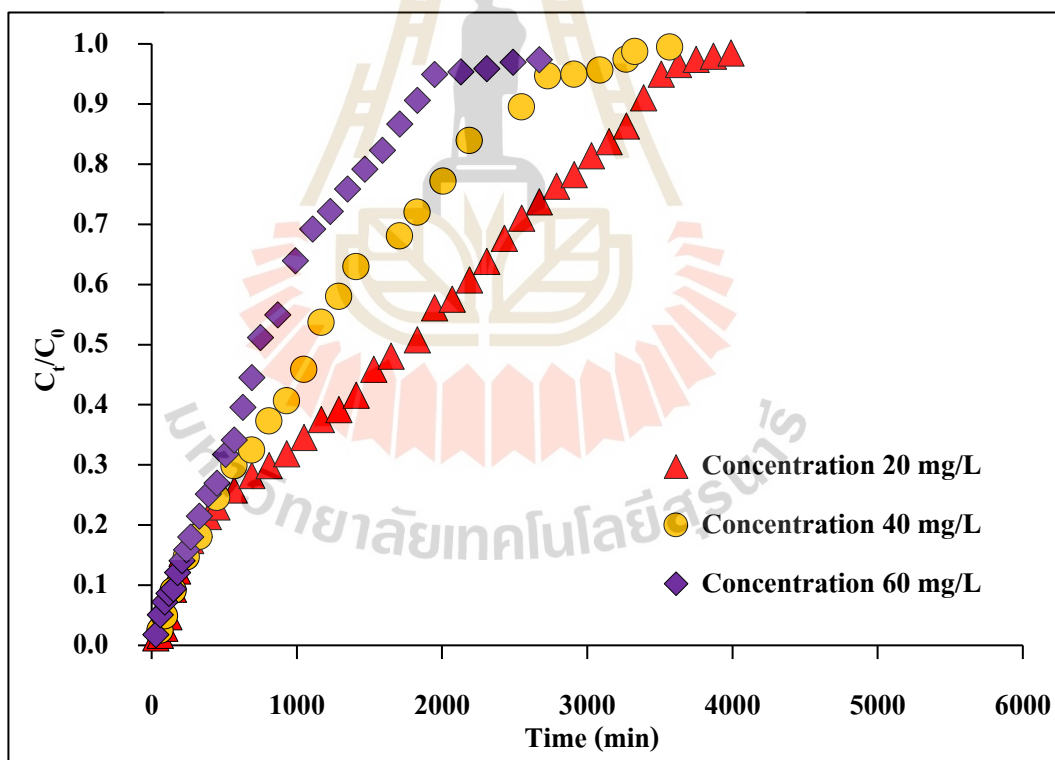
จากผลการศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นจาก 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ พบว่าระยะเวลาที่จุดเบรคทรูมีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 120, 90 และ 60 นาทีแรกของการดูดซับ ตามลำดับ โดยถ่าน MAC สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น และระยะเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 3,510, 2,910 และ 1,950 นาที ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นส่งผลต่อการดูดซับ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น ส่งผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเร็วขึ้น มีระยะเวลาที่จุดเบรคทรูและ

ระยะเวลาสมดุผลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่สั้นลง เนื่องมาจากความเข้มข้นสารละลายส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลสาร โดยความดันออสโมติกจะขับเคลื่อนให้โมเลกุลสารไตรโคลซานในสารละลายแพร่เข้าสู่พื้นผิวของถ่าน MAC และเกิดการอิมตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซับสั้นลง (พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี และคณะ, 2557; รัตนากร ยวงสวัสดิ์ และคณะ, 2564) จากผลการศึกษาในกราฟรูปที่ 4.23 พบว่าที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นสูง ลักษณะกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะค่อนข้างชันมากกว่าที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่ำ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60, 40 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากที่ความเข้มข้นต่ำมีการดูดซับเข้าสู่สถานะเบตอิมตัวได้ช้า จึงใช้ระยะเวลาในการดูดซับนาน ส่งผลให้เส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะแบน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเป็น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะความชันเพิ่มขึ้นและเลื่อนมาทางซ้ายมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงใช้ระยะเวลาสั้นในการดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สถานะเบตอิมตัว (Ho and Adnan, 2021) เมื่อพิจารณาปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานจาก 20, 40 เป็น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงจาก 35.10, 29.10 เป็น 19.50 ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานสูง จึงส่งผลให้การดูดซับเข้าสู่สถานะเบตอิมตัวเร็วขึ้น จึงมีระยะเวลาในการป้อนสารละลายไตรโคลซานเข้าสู่คอลัมน์ลดลง (Vidovix et al., 2022) เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เท่ากับ 1.65, 2.50 และ 2.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สถานะเบตอิมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เท่ากับ 23.60, 33.34 และ 34.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารไตรโคลซานจะทำให้มีความแตกต่างของความเข้มข้นสูง โดยความเข้มข้นสารไตรโคลซานในสารละลายจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC แรงผลักดันที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดพลังงานจลน์ที่สามารถเอาชนะความต้านทานการถ่ายโอนมวล (Mass transfer resistance) ทำให้มีอัตราการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น (Arroyo and Silva, 2013) จนกระทั่งความเข้มข้นสารไตรโคลซานในสารละลายและที่บริเวณพื้นผิวถ่าน MAC มีค่าแตกต่างกันน้อย จะส่งผลทำให้มีอัตราการดูดซับลดลง และเข้าสู่สถานะเบตอิมตัว (Machide et al., 2019; Futalan and Wan, 2022) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลทำให้ความสูงของชั้นขอบเขตการถ่ายโอนมวลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 9.66, 9.69 และ 9.69 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีบริเวณที่เกิดการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้นเป็นบริเวณกว้าง และมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น (Futalan and Wan, 2022; Plangklang and Sookkummerd, 2023) จากผลการศึกษาในครั้งนี้จึงพบว่า ที่ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 35.94 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 1,950 นาที เนื่องมาจากมีความแตกต่างของความเข้มข้นสารไตรโคลซานในสารละลายและ

บริเวณผิวถ่าน MAC มาก ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน ส่งผลให้การดูดซับเกิดเร็วขึ้น และเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.15 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นในการดูดซับแบบ Fixed bed column

| สถานะที่ศึกษา | | | ค่าคงที่ Breakthrough curve | | | | | |
|-----------------|---------------|-----------|-----------------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| C_0 (mg/L) | Q (mL/min) | H (cm) | t_b (min) | t_s (min) | V_{eff} (L) | q_b (mg/g) | q_e (mg/g) | L_{MTZ} (cm) |
| 20 | 10 | 10 | 120 | 3,510 | 35.10 | 1.65 | 23.60 | 9.66 |
| 40 | 10 | 10 | 90 | 2,910 | 29.10 | 2.50 | 33.34 | 6.69 |
| 60 | 10 | 10 | 60 | 1,950 | 19.50 | 2.53 | 34.94 | 9.69 |



รูปที่ 4.23 ผลของความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่าน MAC

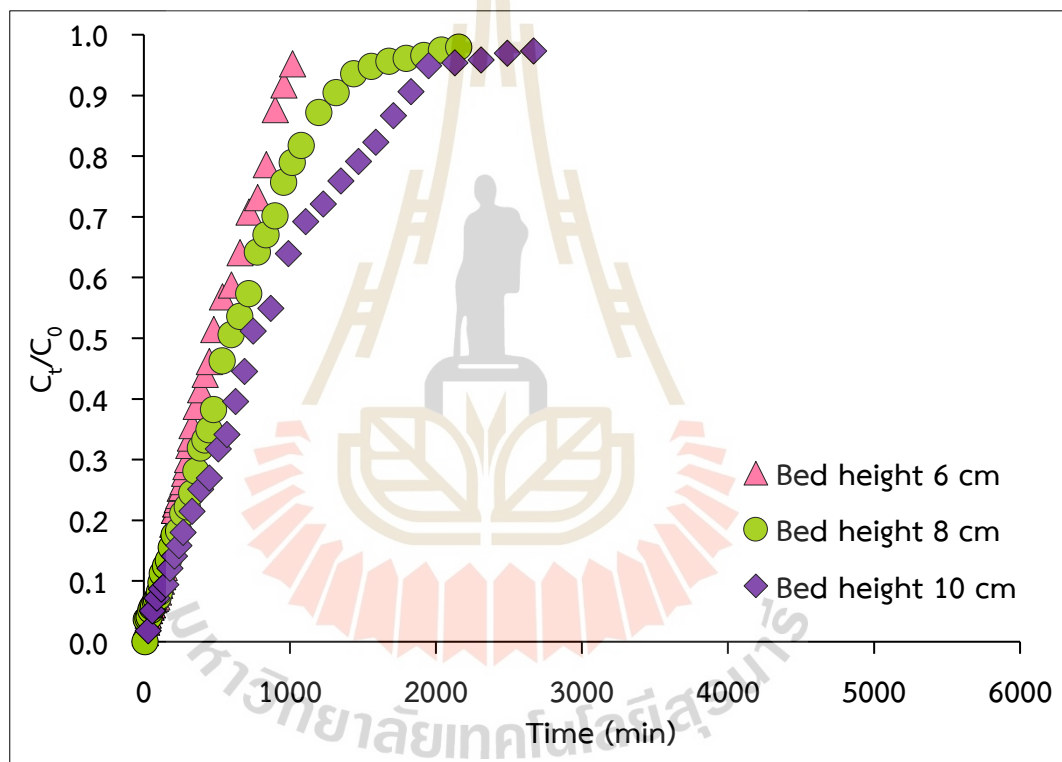
4.3.1.3 ผลการศึกษาความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC

ผลการศึกษาความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC ที่มีต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับคอลัมน์แบบ Fixed bed column โดยศึกษาช่วงความสูงชั้นสารดูดซับ 6, 8 และ 10 เซนติเมตร (มีน้ำหนักถ่าน MAC เท่ากับ 8.42, 11.22 และ 14.02 กรัม ตามลำดับ) การศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 10.5 ± 0.2 ผลการศึกษาความสูงชั้นสารดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ดังแสดงในตารางที่ 4.16 มีรายละเอียดดังนี้

จากผลการศึกษาความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC พบว่าเมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC จาก 6, 8 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่า ระยะเวลาที่จุดเบรกทรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 40, 50 และ 60 นาทีแรกของการดูดซับ ตามลำดับ และระยะเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1,020, 1,560 และ 1,950 นาที ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความสูงชั้นสารดูดซับส่งผลต่อการดูดซับ โดยเมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและตำแหน่งว่างของถ่าน MAC สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพช้าลง และระยะเวลาสมดุลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่ยาวนานมากขึ้น เป็นผลทำให้มีระยะเวลาที่จุดเบรกทรมีและระยะเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่เพิ่มมากขึ้น (Jang and Lee, 2016; Patel, 2019) จากผลการศึกษาในกราฟรูปที่ 4.23 พบว่าที่ความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC สูง ลักษณะกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะความชันน้อยกว่าที่ความสูงชั้นสารดูดซับต่ำ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC เท่ากับ 10, 8 และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากที่ความสูงชั้นสารดูดซับต่ำ เช่น 6 และ 8 เซนติเมตร ตามลำดับ มีระยะเวลาที่เกิดสมดุลการดูดซับน้อยกว่า เนื่องจากมีปริมาณถ่าน MAC น้อย มีพื้นที่ผิวการดูดซับน้อยกว่า เท่ากับ 8.42 และ 11.22 กรัม ตามลำดับ ส่งผลให้การดูดซับเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัวได้เร็วขึ้น เส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve จึงมีลักษณะค่อนข้างชัน แต่เมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับเป็น 10 เซนติเมตร พบว่าเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะความชันลดลง แบน และเลื่อนมาทางขวามากขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณถ่าน MAC มากขึ้นเป็น 14.02 กรัม ทำให้มีพื้นที่ผิวมากยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัวนานขึ้น (Vidovix et al., 2022; Subair et al., 2024) นอกจากนั้นยังส่งผลให้มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลของสารไตรโคลซานไปตามแกนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้การแพร่ของสารไตรโคลซานเข้าสู่พื้นผิวถ่าน MAC เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง ส่งผลให้มีระยะเวลาในการดูดซับยาวนานขึ้น (ปณพร เล็กประเสริฐ และคณะ, 2018) ดังแสดงในรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.16 ผลการศึกษาค่าคงที่ Breakthrough curve สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column

| สถานะที่ศึกษา | | | ค่าคงที่ Breakthrough curve | | | | | |
|---------------|--------------|------------|-----------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|----------------|
| H (cm) | C_0 (mg/L) | Q (mL/min) | t_b (min) | t_s (min) | V_{eff} (L) | q_b (mg/g) | q_e (mg/g) | L_{MTZ} (cm) |
| 6 | 60 | 10 | 40 | 1,020 | 10.20 | 1.67 | 21.29 | 5.76 |
| 8 | 60 | 10 | 50 | 1,560 | 15.60 | 2.10 | 27.60 | 7.74 |
| 10 | 60 | 10 | 60 | 1,950 | 19.50 | 2.53 | 34.94 | 9.69 |



รูปที่ 4.24 ผลของความสูงชั้นสารดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

เมื่อพิจารณาปริมาณสารละลายไตรโคลซานที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าเมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC จาก 6, 8 เป็น 10 เซนติเมตร ส่งผลให้ปริมาณสารละลายไตรโคลซานที่ใช้ในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 10.20, 15.60 เป็น 19.50 ลิตร ตามลำดับ เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณถ่าน MAC จะส่งผลให้มีระยะเวลาในการป้อนสารละลายไตรโคลซานเข้าสู่คอลัมน์เพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้สารละลายไตรโคลซานในปริมาณมากเพื่อให้เพียงพอต่อการดูดซับ จนกว่าการดูดซับจะเข้าสู่สภาวะเบตอิมิตัว (Jang and Lee, 2016) ส่งผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่ความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC เท่ากับ 6, 8 และ 10

เซนติเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่เวลาเบรกทรูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.67, 2.10 และ 2.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะเบดอิมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 21.29, 27.60 และ 34.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC จาก 6, 8 เป็น 10 เซนติเมตร ส่งผลทำให้ความสูงของชั้นขอบเขตการถ่ายโอนมวลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงชั้นสารดูดซับเท่ากับ 5.76, 7.74 และ 9.69 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ทำให้มีพื้นที่ผิวดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีบริเวณที่เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น บริเวณที่เกิดการดูดซับเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง ส่งผลทำให้การดูดซับต้องใช้ระยะเวลายาวนานขึ้นจนกว่าจะเข้าสู่สภาวะเบดอิมตัว (Futalan and Wan, 2022; Subair et al., 2024)

จากผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ที่ความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC เท่ากับ 10 เซนติเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด 35.94 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 1,950 นาที ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC เท่ากับ 10 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นถัดไป

4.3.1.4 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column เพื่อทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model) ผลจากการทดสอบหา Breakthrough curve เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลสารไตรโคลซาน ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น และความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC มีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัส

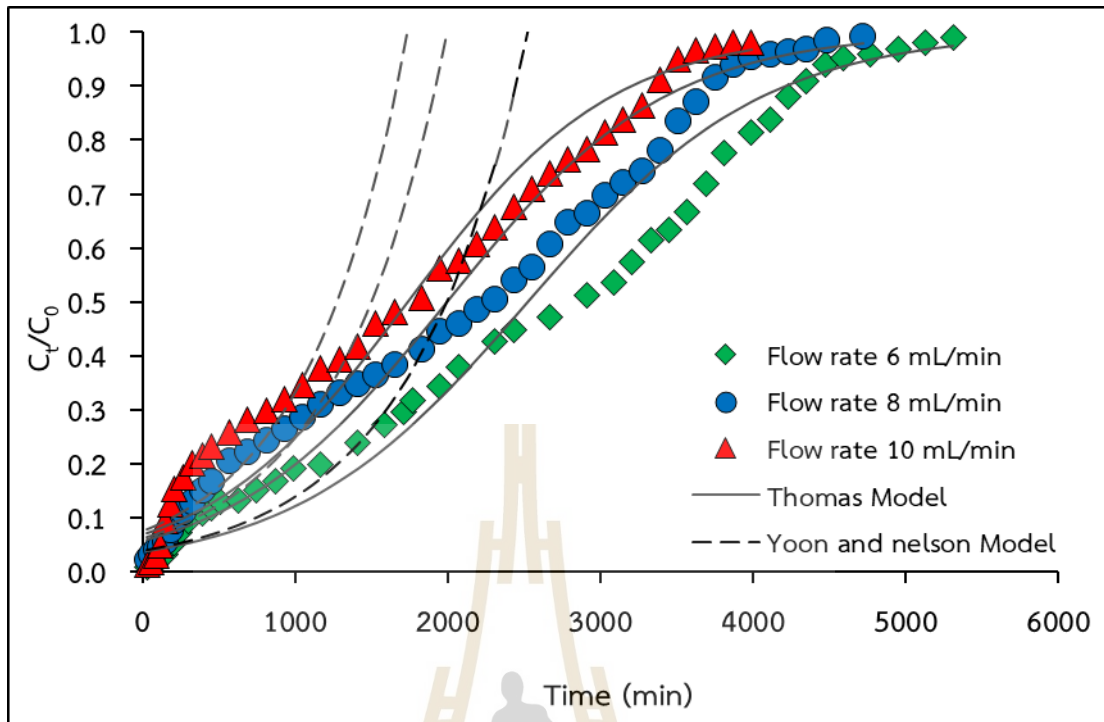
จากผลการศึกษาดูดซับที่มีผลการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column การทำนาย Breakthrough curve การดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัส สามารถหาค่าคงที่ได้จากการสร้างสมการเส้นตรงเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln((C_t/C_0)-1)$ กับเวลา เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ k_{TH} (mL/mg-min) และ q_{TH} (mg/g) ได้จากความชันและจุดตัดแกน y รายละเอียดค่าคงที่ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ผลการศึกษาการทำนายเส้นโค้งการดูดซับ Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองของโทมัส พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ในช่วง 0.9602-0.9827 เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 6, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ส่งผลให้ค่าคงที่อัตราเร็วโทมัส (k_{TH}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.065, 0.069 และ 0.076 มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที และค่าความสามารถในการดูดซับของโทมัส (q_{TH}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 21.70, 22.95 และ 23.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นจาก 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ส่งผลให้ค่าคงที่ k_{TH} มีแนวโน้มลดลงจาก 0.076, 0.052 และ 0.043 มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที และค่า q_{TH} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 23.32, 36.51 และ 40.35 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับจาก 6, 8 และ 10 เซนติเมตร ดังแสดง

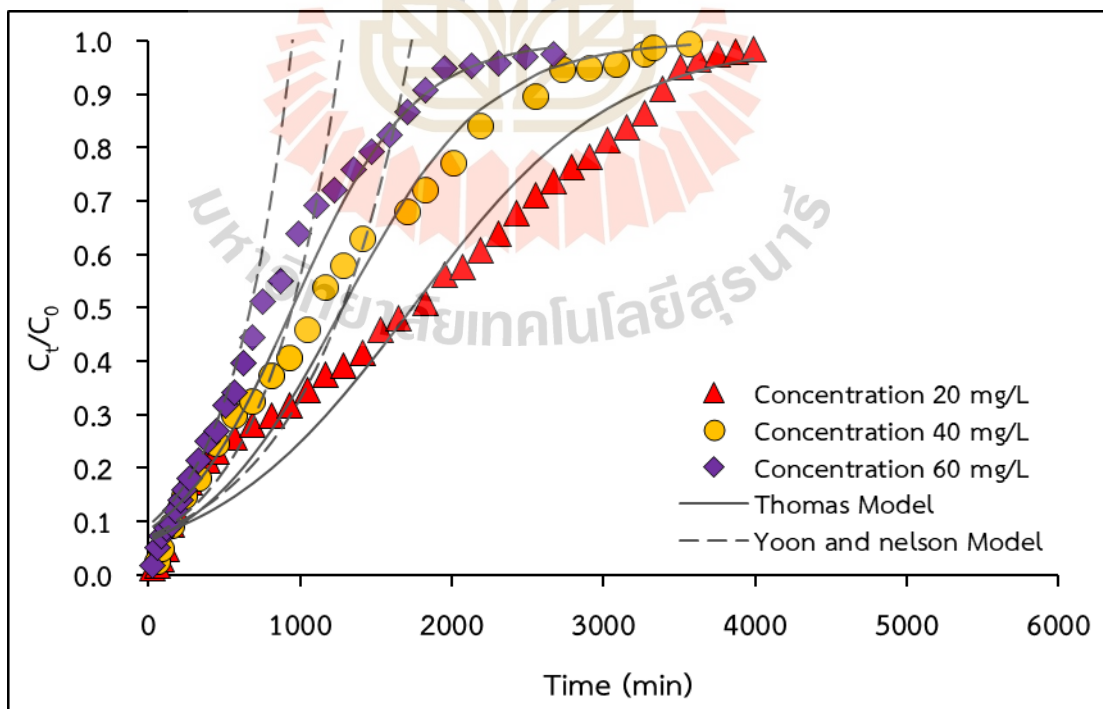
ในรูปที่ 4.27 ส่งผลทำให้ค่าคงที่ k_{TH} มีแนวโน้มลดลงจาก 0.092, 0.056 และ 0.043 มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม-นาที่ และค่า q_{TH} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 36.15, 39.76 และ 40.35 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าค่า q_{TH} ที่ได้จากการคำนวณตามสมการแบบจำลองของโทมัสมีค่าอยู่ในช่วง 21.70 ถึง 40.35 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองในการดูดซับแบบ Fixed bed column ($q_{s, exp}$) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 21.29 ถึง 34.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Ho and Adnan, 2021) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น และความสูงชั้นสารดูดซับ ก็ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากความแตกต่างความเข้มข้นสารไตรโคลซานในสารละลายและบริเวณพื้นผิวถ่าน MAC ส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนโมเลกุลสารไตรโคลซานแพร่เข้าสู่พื้นผิวของถ่าน MAC ได้มากขึ้น ทำให้มีอัตราการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น (Futalan and Wan, 2022) และเมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับ ส่งผลให้มีปริมาณพื้นผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น การดูดซับจึงมีระยะเวลาในการดูดซับสารไตรโคลซานจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลนานขึ้น (Subair et al., 2024) นอกจากนี้การที่ค่าคงที่ k_{TH} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากอัตราการถ่ายโอนมวลเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ ซึ่งขึ้นกับปัจจัยอัตราการไหล ความเข้มข้นสารไตรโคลซาน และความสูงชั้นสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น (Dias et al., 2022; Fulazzaky et al., 2022) รวมถึงกลไกการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบ Langmuir และอัตราการดูดซับอยู่ในรูปของสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม (Marzbali and Edmaieli, 2017; Wongcharee et al., 2018) จากผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัสซึ่งมีค่า R^2 สูงอยู่ในช่วง 0.9602 ถึง 0.9827 สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบคอลัมน์นี้ได้

ตารางที่ 4.17 ค่าคงที่การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC จากการดูดซับแบบ Fixed bed column ด้วยแบบจำลองของโทมัส

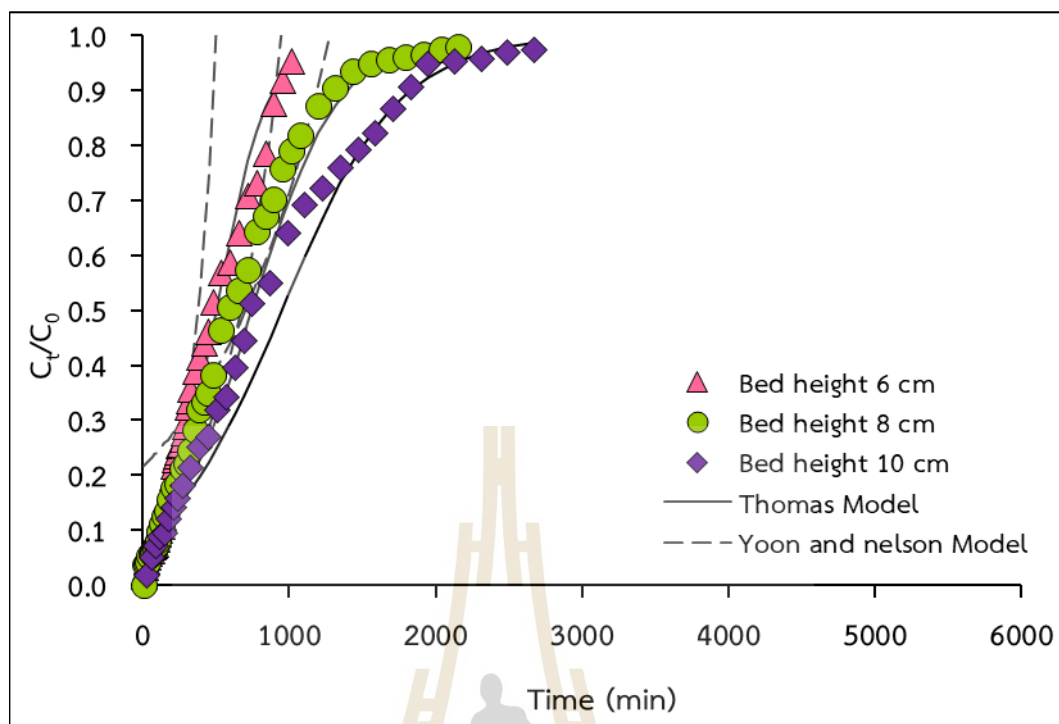
| สภาวะการดูดซับแบบ Fixed bed column | | | | ค่าคงที่การดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัส | | |
|------------------------------------|-----------------|-----------|------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------|
| Q (mL/min) | C_0 (mg/L) | H (cm) | $q_{s, exp}$ (mg/g) | k_{TH} (mL/mg-min) | q_{TH} (mg/g) | R^2 |
| 6 | 20 | 10 | 21.60 | 0.065 | 21.70 | 0.9784 |
| 8 | 20 | 10 | 23.36 | 0.069 | 22.95 | 0.9777 |
| 10 | 20 | 10 | 23.60 | 0.076 | 23.32 | 0.9827 |
| 10 | 40 | 10 | 33.34 | 0.052 | 36.51 | 0.9545 |
| 10 | 60 | 10 | 34.94 | 0.043 | 40.35 | 0.9627 |
| 10 | 60 | 8 | 27.60 | 0.056 | 39.76 | 0.9602 |
| 10 | 60 | 6 | 21.29 | 0.092 | 36.15 | 0.9813 |



รูปที่ 4.25 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล



รูปที่ 4.26 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น



รูปที่ 4.27 ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงชั้นสารดูดซับ

2) ผลการทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน

จากผลการศึกษาการดูดซับที่มีผลการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column การทำนาย Breakthrough curve การดูดซับด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน สามารถหาค่าคงที่ได้จากการสร้างสมการเส้นตรงเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_t/(C_0-C_t))$ กับเวลา เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ k_{YN} (min^{-1}) และเวลาที่ต้องการสำหรับการดูดซับของตัวที่ถูกดูดซับที่ร้อยละ 50 (τ , min) ได้จากความชัน และจุดตัดแกน y รายละเอียดค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ผลการศึกษาการทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ในช่วง 0.5806 ถึง 0.6710 เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 6, 8 และ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ส่งผลให้ค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสัน (k_{YN}) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.0013, 0.0014 และ 0.0015 ต่อนาที และเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของตัวถูกดูดซับ (τ) มีแนวโน้มลดลงจาก 2,527.23, 1,995.36 และ 1,648.67 นาที ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นจาก 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ส่งผลทำให้ค่าคงที่ k_{YN} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 0.0015, 0.0020 และ 0.0025 ต่อนาที และค่า τ มีแนวโน้มลดลงจาก 1,648.67, 1,277.19 และ 948.68 นาที ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC จาก 6, 8 และ 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ส่งผลทำให้ค่าคงที่ k_{YN}

มีแนวโน้มลดลงจาก 0.0056, 0.0034 และ 0.0025 ต่อนาที และค่า τ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 501.39, 746.24 และ 948.68 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลและความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น พบว่าอัตราการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้เวลาดำเนินการ 50 สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC มีระยะเวลาลดลง เนื่องมาจากแรงขับเคลื่อนโมเลกุลสารไตรโคลซานเข้าสู่พื้นผิวถ่าน MAC มีมาก จึงมีอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การดูดซับเข้าสู่สภาวะคงที่อย่างรวดเร็ว (Girish and Murty, 2015; Jang and Lee, 2016) แต่เมื่อเพิ่มความสูงชั้นสารดูดซับของถ่าน MAC พบว่าอัตราการดูดซับของค่าคงที่ k_{YN} มีแนวโน้มลดลง และเวลาดำเนินการ 50 สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณถ่าน MAC เป็นการเพิ่มปริมาณพื้นผิวสัมผัส ส่งผลทำให้การดูดซับแบบคอลัมน์สามารถดูดซับปริมาณสารไตรโคลซานได้เพิ่มขึ้น และมีค่าความสูงของชั้นขอบเขตการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้ระยะเวลาการดูดซับจนเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัว มีระยะเวลายาวนานขึ้น (Marzbali and Esmaili, 2017; Juela et al., 2021) จากผลการทำนายการดูดซับด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน พบว่า มีค่า $R^2 < 0.9$ และมีความแตกต่างกับเส้นโค้งการดูดซับจากการทดลองแบบ Fixed bed column เนื่องจากสมการของยูน-เนลสัน ไม่ได้นำข้อมูลสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของตัวที่ถูกดูดซับมาร่วมพิจารณาด้วย ส่งผลให้ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ทำนายอัตราเร็วการแพร่โมเลกุลสารไตรโคลซานเข้าสู่รูพรุนของถ่าน MAC ทำให้การทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน ไม่ใกล้เคียงกับผลการศึกษาที่พบ

ตารางที่ 4.18 ค่าคงที่การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC จากการดูดซับแบบ Fixed bed column ด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน

| สภาวะการดูดซับแบบ Fixed bed column | | | | ค่าคงที่การดูดซับด้วยแบบจำลองของยูน-เนลสัน | | |
|------------------------------------|--------------|--------|---------------------|--|--------------|--------|
| Q (mL/min) | C_0 (mg/L) | H (cm) | $q_{s, exp}$ (mg/g) | k_{YN} (min ⁻¹) | τ (min) | R^2 |
| 6 | 20 | 10 | 21.60 | 0.0013 | 2527.23 | 0.5806 |
| 8 | 20 | 10 | 23.36 | 0.0014 | 1995.36 | 0.5978 |
| 10 | 20 | 10 | 23.60 | 0.0015 | 1648.67 | 0.6538 |
| 10 | 40 | 10 | 33.34 | 0.0020 | 1277.19 | 0.6036 |
| 10 | 60 | 10 | 34.94 | 0.0025 | 948.68 | 0.5822 |
| 10 | 60 | 8 | 27.60 | 0.0034 | 746.24 | 0.5822 |
| 10 | 60 | 6 | 21.29 | 0.0056 | 501.39 | 0.6710 |

4.3.1.4 สรุปผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed-bed column

จากผลการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในระบบการดูดซับแบบ Fixed bed column พบว่า สภาวะในการเดินระบบแบบคอลัมน์ที่อัตราการไหลที่ 10 มิลลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ

ของถ่าน MAC เท่ากับ 10 เซนติเมตร ส่งผลให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 34.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ภายในระยะเวลาการดูดซับ 1,950 นาที เนื่องจากมีอัตราการถ่ายโอนมวลสูง และมีตำแหน่งว่างบนพื้นผิว MAC เพิ่มขึ้น จึงทำให้การดูดซับสารไตรโคลซานเกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น และจากผลการทำนายกราฟ Breakthrough curve พบว่า การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบคอลัมน์ มีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของ โทมัสได้ โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9602 ถึง 0.9827 สามารถทำนายค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซาน (q_{TH}) ได้สูงสุดเท่ากับ 40.35 มิลลิกรัมต่อกรัม

ดังนั้น ในการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Pulsed bed column จึงเลือกใช้อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับถ่าน MAC เริ่มต้น 10 เซนติเมตร เนื่องจากมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 34.94 มิลลิกรัมต่อกรัม

4.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulsed bed column

การศึกษาดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในระบบการดูดซับแบบ Pulsed bed column โดยอ้างอิงสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการศึกษาการดูดซับคอลัมน์แบบ Fixed bed column ที่สภาวะอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับถ่าน MAC เท่ากับ 10 เซนติเมตร เพื่อศึกษาผลของระยะความสูงของการซັกกลับที่มีต่อการดูดซับ ซึ่งถ่าน MAC ถูกบรรจุอยู่ในคอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร โดยการดูดซับเป็นแบบต่อเนื่องมีรูปแบบการไหลผ่านคอลัมน์แบบ Up-flow ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของระยะความสูงของการซັกกลับจำนวน 3 ระยะ ได้แก่ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยแต่ละระยะความสูงของการซັกกลับจะทำการศึกษาทั้งหมด 4 Cycle และศึกษารูปแบบการดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.28, 4.29 และ 4.20 ตามลำดับ มีรายละเอียดดังนี้

4.3.2.1 ผลการศึกษาความสูงของระยะซັกกลับ

ผลการศึกษาความสูงของระยะซັกกลับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในระบบคอลัมน์แบบ Pulsed bed column โดยศึกษาช่วงระยะซັกกลับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร การศึกษาครั้งนี้จะซັกกลับชั้นสารดูดซับถ่าน MAC ภายในคอลัมน์ เมื่อความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น (C_t/C_0) เท่ากับ 0.50 หรือมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 และถ่าน MAC ชุดใหม่จะถูกบรรจุทางด้านบนของคอลัมน์ในปริมาณที่เท่ากับถ่าน MAC ที่ถูกซັกออก ทำการทดลองทั้งหมด 4 Cycles รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.19 และนำผลการศึกษาไปคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ เพื่อศึกษาค่าความสัมพันธ์กับระยะความสูงของการซັกกลับ มีรายละเอียดดังนี้

1) ผลของระยะความสูงของการซັกกลับ 2 เซนติเมตร

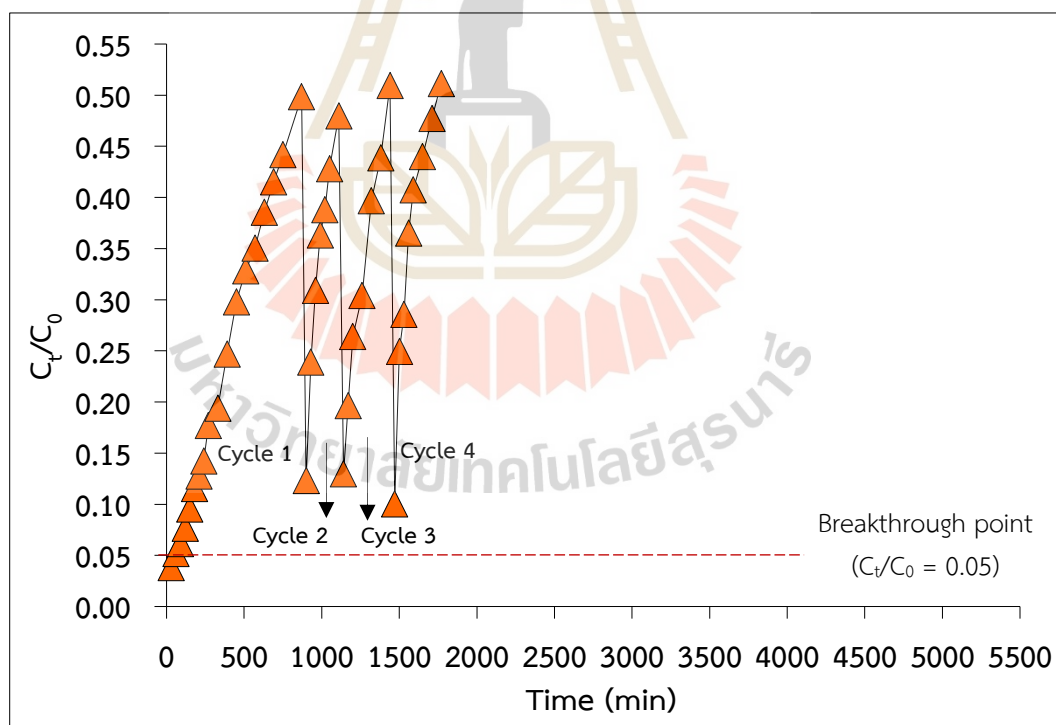
ผลการศึกษาความสูงของระยะซັกกลับ 2 เซนติเมตร พบว่าเมื่อเดินระบบครบจำนวน 4 Cycle ส่งผลให้ระยะเวลาอิ่มตัวในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเดินระบบใน Cycle ที่ 1 พบว่า ระยะเวลาที่จุดเบรคทูร์ (Breakthrough time, t_b) เท่ากับ 60 นาทีแรกของ

การดูดซับ โดยถ่าน MAC สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้ดีในช่วงเริ่มต้น และหลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงจนกระทั่ง C_t/C_0 เท่ากับ 0.50 มีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 ($t_{0.5}$) เท่ากับ 870 นาที จากนั้นทำการชกกลับที่ระยะความสูง 2 เซนติเมตร และเริ่มเดินระบบใน Cycle ที่ 2 พบว่าระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1,110 นาที เส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve เลื่อนไปทางขวา เนื่องจากมีระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถัดมาทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่า มีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1,440 นาที และ 1,770 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.19 จากผลการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่ามีเพียง Cycle ที่ 1 เท่านั้นที่การดูดซับเกิดขึ้นจนถึงจุดเบรกทูล ส่วน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 ไม่เกิดการดูดซับที่จุดเบรกทูล แสดงให้เห็นว่าการชกกลับ 2 เซนติเมตร ไม่เพียงพอให้เกิดระยะเวลาที่จุดเบรกทูล แต่อย่างไรก็ตามพบว่าสามารถเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับของคอลัมน์ได้สูงสุดเท่ากับ 1,770 นาที และมีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับยาวนานกว่าแบบ Fixed bed column (870 นาที) ดังนั้น ระบบการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชกกลับ 2 เซนติเมตร จึงสามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ได้มากกว่าแบบ Fixed bed column ถึง 2 เท่า จากผลการศึกษาในกราฟรูปที่ 4.28 พบว่า เมื่อเริ่มเดินระบบการดูดซับสารไตรโคลซานของแต่ละ Cycle แสดงเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะค่อนข้างชัน ชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สภาวะประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มจำนวน Cycle ที่ 1 ถึง 4 ส่งผลทำให้เส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve เลื่อนไปทางขวามากขึ้น เนื่องจากปริมาณถ่าน MAC ที่เพิ่มเข้าคอลัมน์จาก 14.02 เป็น 22.44 กรัม ตามลำดับ ส่งผลทำให้การดูดซับเข้าสู่สภาวะประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 ได้นานมากขึ้น จึงมีระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น และมีปริมาตรสารละลายไตรโคลซานเข้าสู่คอลัมน์เพิ่มขึ้นจาก 8.7 เป็น 17.7 ลิตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากระยะความสูงของการชกกลับ 2 เซนติเมตร พบว่า เมื่อเดินระบบครบจำนวน 4 Cycle ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวน Cycle ที่ทำการศึกษา โดย Cycle ที่ 1 มีค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดเบรกทูล (q_b) เท่ากับ 2.45 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 ($q_{0.5}$) เท่ากับ 26.72 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นทำการชกกลับถ่าน MAC และเริ่มเดินระบบใน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 27.83, 30.41 และ 31.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าระยะความสูงของการชกกลับ 2 เซนติเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 31.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่จุด $C_t/C_0=0.50$ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานได้มากกว่าการดูดซับแบบ Fixed bed column ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.63 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณถ่าน MAC ส่งผลทำให้มีบริเวณที่เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น และมีระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัวมากขึ้น และมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Ho and Adnan, 2021; Dias et al., 2022; Verma and Singh, 2022) จากผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าระยะความสูงของการชกกลับ 2 เซนติเมตร สามารถยืดอายุการใช้งานคอลัมน์ได้เป็น 1,770 นาที และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของคอลัมน์จากการดูดซับแบบ Fixed bed column ได้ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 31.99 มิลลิกรัมต่อกรัม

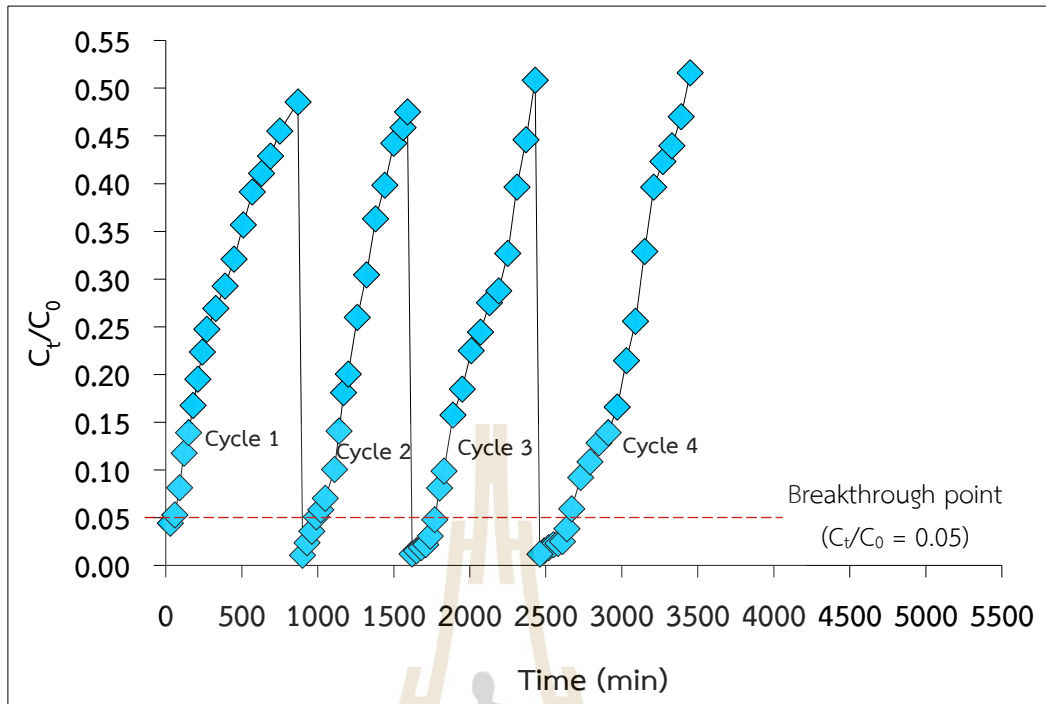
ตารางที่ 4.19 ผลของระยะความสูงของการซ้กกลับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร

| ระยะความสูงของการซ้กกลับ (cm) | Cycle | ปริมาณถ่าน MAC (g) | t_b (min) | $t_{0.5}$ (min) | V_{eff} (L) | q_b (mg/g) | $q_{0.5}$ (mg/g) |
|-------------------------------|-------|--------------------|-------------|-----------------|---------------|--------------|------------------|
| 0 cm.* | 1 | 14.02 | 60 | 870 | 8.7 | 2.43 | 25.63 |
| 2 cm. | 1 | 14.02 | 60 | 870 | 8.7 | 2.45 | 26.72 |
| | 2 | 16.83 | - | 1,110 | 11.1 | - | 27.83 |
| | 3 | 19.64 | - | 1,440 | 14.4 | - | 30.41 |
| | 4 | 22.44 | - | 1,770 | 17.7 | - | 31.99 |
| 4 cm. | 1 | 14.02 | 60 | 870 | 8.7 | 2.47 | 25.87 |
| | 2 | 19.63 | 990 | 1,560 | 15.6 | 22.07 | 34.76 |
| | 3 | 25.24 | 1,770 | 2,430 | 24.3 | 31.64 | 42.97 |
| | 4 | 30.84 | 2,670 | 3,450 | 34.5 | 39.76 | 50.76 |
| 6 cm. | 1 | 14.02 | 60 | 870 | 8.7 | 2.50 | 25.30 |
| | 2 | 22.44 | 1,200 | 2,160 | 21.6 | 24.50 | 42.80 |
| | 3 | 30.85 | 2,700 | 3,540 | 35.4 | 41.50 | 53.50 |
| | 4 | 39.26 | 4,320 | 5,280 | 52.8 | 53.40 | 62.60 |

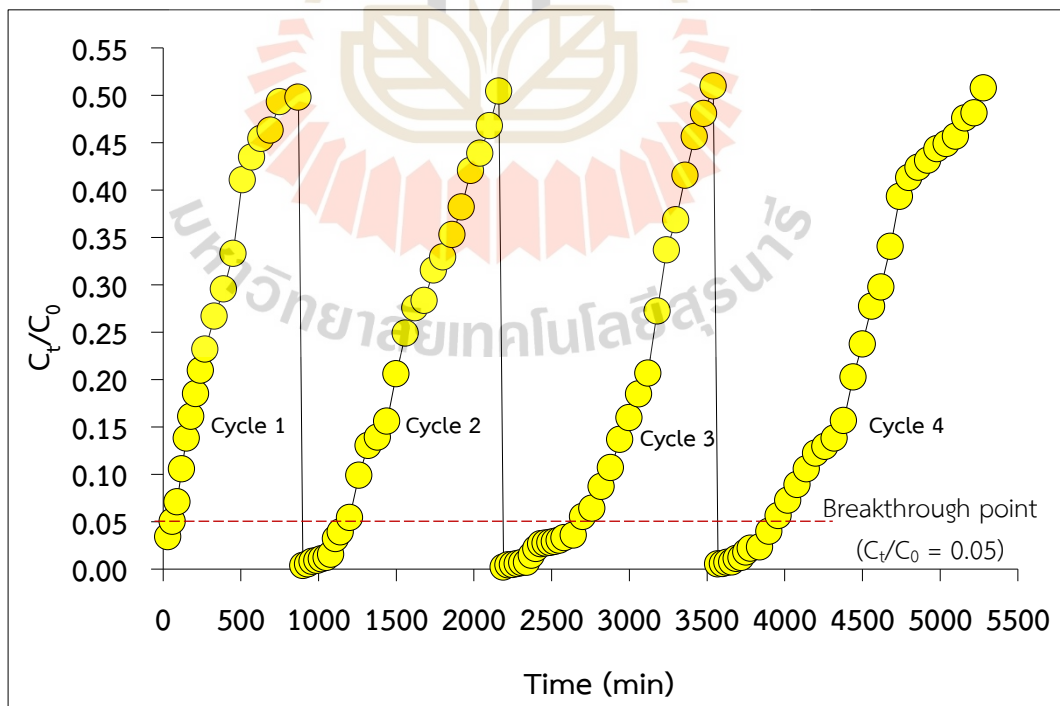
*หมายเหตุ: ค่าการดูดซับที่จุด $C_t/C_0 = 0.50$ ในระบบการดูดซับแบบ Fixed bed column



รูปที่ 4.28 ผลของระยะความสูงของการซ้กกลับ 2 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC



รูปที่ 4.29 ผลของระยะความสูงของการซັกกลับ 4 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC



รูปที่ 4.30 ผลของระยะความสูงของการซັกกลับ 6 เซนติเมตร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

2) ผลของระยะความสูงของการซັกกลับ 4 เซนติเมตร

ผลการศึกษาระยะความสูงของการซັกกลับ 4 เซนติเมตร พบว่าเมื่อเดินระบบครบจำนวน 4 Cycle ส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเดินระบบใน Cycle ที่ 1 พบว่า มีระยะเวลาที่จุดเบรกทรูเท่ากับ 60 นาทีแรกของการดูดซับ และมีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 870 นาที จากนั้นทำการซັกกลับที่ระยะความสูง 4 เซนติเมตร และเริ่มเดินระบบใน Cycle ที่ 2 พบว่า มีระยะเวลาที่จุดเบรกทรูเท่ากับ 990 นาที และเกิดการดูดซับต่อเนื่องจนถึงระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 1,560 นาที ถัดมาทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่า มีระยะเวลาที่จุดเบรกทรูเท่ากับ 1,770 และ 2,670 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 2,430 และ 3,450 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.19 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการดูดซับของระยะความสูงของการซັกกลับ 4 เซนติเมตร ทุก ๆ Cycles สามารถเกิดการดูดซับที่จุดเบรกทรู และสามารถเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับของคอลัมน์ได้นานสูงสุดเท่ากับ 3,450 นาที ซึ่งมีระยะเวลาในการดูดซับยาวนานมากกว่าระยะความสูงของการซັกกลับ 2 เซนติเมตร (1,770 นาที) และแบบ Fixed bed column (870 นาที) จากผลการศึกษาในกราฟรูปที่ 4.29 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อเริ่มเดินระบบการดูดซับในคอลัมน์ของแต่ละ Cycle พบว่าเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะค่อนข้างชันในช่วงแรกของการดูดซับในแต่ละ Cycle แสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แต่จะพบว่าเส้นกราฟ Breakthrough curve ของระยะความสูงของการซັกกลับ 4 เซนติเมตร มีความชันน้อยกว่าเส้นกราฟ Breakthrough curve ของระยะความสูงของการซັกกลับ 2 เซนติเมตร ทำให้มีระยะเวลาการดูดซับเข้าสู่สภาวะประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 ยาวนานกว่า ส่งผลทำให้เส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีแนวโน้มเลื่อนไปทางขวามากขึ้น สามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ได้มากกว่าการดูดซับแบบ Fixed bed column ได้ถึง 4 เท่า และมากกว่าที่ระยะความสูงของการซັกกลับ 2 เซนติเมตร ประมาณ 2 เท่า เนื่องจากปริมาณที่ MAC ที่เพิ่มเข้าคอลัมน์เป็น 30.84 กรัม มีปริมาณมากกว่าที่ระยะความสูงของการซັกกลับ 2 เซนติเมตร (22.44 กรัม) และแบบ Fixed bed column (14.02 กรัม) ส่งผลทำให้การดูดซับของระยะความสูงของการซັกกลับ 4 เซนติเมตร มีระยะเวลาการดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 ได้นานมากขึ้น ส่งผลทำให้มีระยะเวลาการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 870, 1,770 และ 3,450 นาที ตามลำดับ และมีปริมาตรสารละลายไตรโคลซานเข้าสู่คอลัมน์เพิ่มขึ้นจาก 8.7, 17.7, และ 34.5 ลิตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับที่ระยะความสูงของการซັกกลับ 4 เซนติเมตร พบว่าเมื่อเดินระบบครบจำนวน 4 Cycle ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดย Cycle ที่ 1 มีค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดเบรกทรูเท่ากับ 2.47 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 25.87 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 พบว่า การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้ผ่านจุดเบรกทรูได้ และค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดเบรกทรูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 2.47 เป็น 22.07, 31.64 และ 39.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ รวมถึงมีค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 25.87 เป็น 34.76, 42.97 และ 50.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าระยะความสูงของการ

ซ้กลับ 4 เซนติเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 50.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานได้มากกว่าแบบ Fixed bed column และระยะความสูงของการซ้กลับ 2 เซนติเมตร เนื่องมาจากปริมาณถ่าน MAC ที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีพื้นผิวสูง และมีตำแหน่งว่างของถ่าน MAC ที่ใช้ในการดูดซับสารไตรโคลซานเพิ่มมากขึ้น จึงสามารถรองรับปริมาณสารละลายไตรโคลซานได้สูง ส่งผลให้มีระยะเวลาในการดูดซับยาวจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะเบตอิมตัวนานขึ้น และมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Girish and Murty, 2015; Verma and Singh, 2022) จากผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าระยะความสูงของการซ้กลับ 4 เซนติเมตร สามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 3,450 นาที และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคอลัมน์ให้มากกว่าการดูดซับแบบ Fixed bed column ได้ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 50.76 มิลลิกรัมต่อกรัม

3) ผลของระยะความสูงของการซ้กลับ 6 เซนติเมตร

ผลการศึกษาระยะความสูงของการซ้กลับ 6 เซนติเมตร พบว่าเมื่อเดินระบบครบจำนวน 4 Cycle ส่งผลให้ระยะเวลาการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเดินระบบใน Cycle ที่ 1 พบว่า มีระยะเวลาที่จุดเบรททรูเท่ากับ 60 นาทีแรกของการดูดซับ และมีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 870 นาที จากนั้นทำการซ้กลับที่ระยะความสูง 6 เซนติเมตร และเริ่มเดินระบบใน Cycle ที่ 2 พบว่า มีระยะเวลาที่จุดเบรททรูเท่ากับ 1,200 นาที และเกิดการดูดซับต่อเนื่องจนถึงระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 2,160 นาที ถัดมาทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่า มีระยะเวลาที่จุดเบรททรูเท่ากับ 2,770 และ 4,320 นาที ตามลำดับ และมีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 3,540 และ 5,280 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.19 จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการดูดซับของระยะความสูงของการซ้กลับ 6 เซนติเมตร จำนวน 4 Cycles สามารถเกิดการดูดซับที่จุดเบรททรู และสามารถเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับของคอลัมน์ได้นานสูงสุดเท่ากับ 5,280 นาที ซึ่งมีระยะเวลาในการดูดซับยาวนานมากกว่าระยะความสูงของการซ้กลับ 4 เซนติเมตร (3,450 นาที) ระยะความสูงของการซ้กลับ 2 เซนติเมตร (1,770 นาที) และแบบ Fixed bed column (870 นาที) จากผลการศึกษาในกราฟรูปที่ 4.30 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อเริ่มเดินระบบการดูดซับในคอลัมน์ของแต่ละ Cycle พบว่าเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีลักษณะค่อนข้างชันในช่วงแรกของการดูดซับของแต่ละ Cycle แสดงให้เห็นถึงการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่จะพบว่าเส้นกราฟ Breakthrough curve ของระยะความสูงของการซ้กลับ 6 เซนติเมตร มีความชันน้อยกว่าเส้นกราฟ Breakthrough curve ของระยะความสูงของการซ้กลับ 2 และ 4 เซนติเมตร ทำให้มีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 ยาวนานกว่า ส่งผลทำเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve มีแนวโน้มเลื่อนไปทางขวามากที่สุด สามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ได้มากกว่าที่ระยะความสูงของการซ้กลับ 4 และ 2 เซนติเมตร และแบบ Fixed bed column ได้ถึง 1.5, 3 และ 6 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากระยะความสูงของการซ้กลับ 6 เซนติเมตร มีปริมาณถ่าน MAC ที่เพิ่มเข้าคอลัมน์เป็น 39.26 กรัม ส่วนที่ระยะความสูงของการซ้กลับ 4 และ 2 เซนติเมตร มีปริมาณถ่าน MAC ลดลงเท่ากับ 30.84 และ 22.44 กรัม และแบบ Fixed bed column มีปริมาณถ่าน MAC ในคอลัมน์น้อยที่สุดเท่ากับ 14.02 กรัม ส่งผลทำให้มีระยะเวลาการดูดซับลดลงจาก 5,280, 3,450, 1,770 และ 870 นาที

ตามลำดับ จึงส่งผลให้มีการบ่อนสารละลายไตรโคลซานเข้าสู่คอลัมน์ลดลงจาก 52.8, 34.5, 17.7 และ 8.7 ลิตร ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงว่าที่ระยะความสูงของการซັกกกลับ 6 เซนติเมตร มีระยะเวลาการดูดซับยาวนานที่สุด เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับที่ระยะความสูงของการซັกกกลับ 6 เซนติเมตร พบว่าเมื่อเดินระบบครบจำนวน 4 Cycle ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดย Cycle ที่ 1 มีค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดเบรกทรู เท่ากับ 2.50 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 เท่ากับ 25.30 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นทำการเดินระบบใน Cycle ที่ 2, 3 และ 4 พบว่า การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้ผ่านจุดเบรกทรูได้ และค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดเบรกทรูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 2.50 เป็น 24.50, 41.50 และ 53.40 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 25.30 เป็น 42.80, 53.50 และ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าระยะความสูงของการซັกกกลับ 6 เซนติเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานได้มากกว่าระยะความสูงของการซັกกกลับ 4 และ 2 เซนติเมตร และแบบ Fixed bed column ซึ่งมีค่าเท่ากับ 50.76, 31.99 และ 25.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องมาจากการซັกกกลับถ่าน MAC ที่ระยะซັกกกลับ 6 เซนติเมตร ส่งผลทำให้ Cycle ที่ 2, 3 และ 4 มีประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น โดยการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ที่จุดเบรกทรู และมีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงเทียบเท่ากับ Cycle ที่ 1 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ เพราะปริมาณถ่าน MAC ชุดใหม่ที่เติมเข้ามาแทนที่ถ่าน MAC ที่ถูกดึงออกมีปริมาณมากเพียงพอ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสและตำแหน่งว่างบนถ่าน MAC เพิ่มขึ้น ดังนั้น การซັกกกลับถ่านกัมมันต์ในระบบ Pulsed bed column จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ สามารถยืดอายุการใช้งานคอลัมน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะที่สูญเสียปริมาณถ่านกัมมันต์น้อยกว่าระบบการดูดซับแบบ Fixed bed column แต่สามารถเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับได้สูงกว่า (McKay, 1981; Plangklang and Sookkumnerd, 2023) จากผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าระยะความสูงของการซັกกกลับ 6 เซนติเมตร สามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ได้เพิ่มขึ้นเป็น 5,280 นาที และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคอลัมน์ให้มากกว่าการดูดซับแบบ Fixed bed column ได้ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม

4.3.2.2 ผลของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Pulsed bed column กับการดูดซับแบบ Fixed bed column

จากผลการศึกษาการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบคอลัมน์ ได้ทำการเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ และค่าความสามารถในการดูดซับระหว่างการดูดซับแบบ Pulsed bed column กับการดูดซับแบบ Fixed bed column ดังแสดงในตารางที่ 4.19 พบว่าการดูดซับแบบ Pulsed bed column มีระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 สูงสุดเท่ากับ 5,280 นาที และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการดูดซับแบบ Fixed bed column ในสภาวะที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 50 และสภาวะการ

ดูดซับจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะเบดอิมตัว มีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 870 และ 1,950 นาที ตามลำดับ และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 25.63 และ 34.94 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการดูดซับแบบ Pulsed bed column สามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ และเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ได้มากกว่าการดูดซับแบบ Fixed bed column โดยที่ระยะเวลาสูงของการชักกลับเท่ากับ 2, 4 และ 6 เซนติเมตร สามารถเพิ่มระยะเวลาการดูดซับสูงขึ้นร้อยละ 50.85, 74.78 และ 83.52 ตามลำดับ และเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจากการดูดซับแบบ Fixed bed column ได้ร้อยละ 19.88, 49.50 และ 59.06 ตามลำดับ เนื่องจากการชักกลับในระบบการดูดซับแบบ Pulsed bed column เป็นการนำถ่าน MAC ที่อิมตัวออก แล้วเติมถ่าน MAC ที่ยังไม่ได้ดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ จึงเป็นการเพิ่มปริมาณพื้นผิวและตำแหน่งที่ว่างของถ่าน MAC สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซาน ส่งผลทำให้ใช้ระยะเวลาในการดูดซับยาวนานขึ้น ทำให้ถ่าน MAC สัมผัสกับโมเลกุลสารไตรโคลซานได้มากขึ้น สามารถยืดอายุการใช้งานคอลัมน์ ลดปริมาณการสูญเสียถ่าน MAC และสามารถเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับของถ่าน MAC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.4 ผลการศึกษาสภาพการอุดตันบนถ่าน MAC ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column

ผลการศึกษาสภาพการอุดตันบนพื้นผิวถ่าน MAC หลังดูดซับสารไตรโคลซาน ในระบบคอลัมน์แบบ Pulsed bed column โดยวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนเปิด (Open pores) และรูพรุนปิด (Closed pores) ของถ่าน MAC ก่อนและหลังการดูดซับด้วยเทคนิค XTM (BL1.2W: X-ray Tomographic Microscopy, Synchrotron Light Research Institute) โดยใช้ของตัวอย่างถ่าน MAC ที่ระยะเวลาสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร ทำการเก็บตัวอย่างถ่าน MAC หลังจากเสร็จสิ้น Cycle ที่ 1, 2, 3 และ 4 เพื่อศึกษาลักษณะรูพรุนของถ่าน MAC รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.20 จากนั้นเก็บตัวอย่างถ่าน MAC หลังเสร็จสิ้นการดูดซับใน Cycle ที่ 4 ที่ระดับความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 เซนติเมตร เพื่อศึกษาปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC หลังการใช้งานในคอลัมน์แบบ Pulsed bed column รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.21 และนำผลการศึกษาที่ได้จากเทคนิค XTM ไปสร้างภาพจำลองสามมิติ มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ผลการอุดตันบนพื้นผิวถ่าน MAC เมื่อมีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น

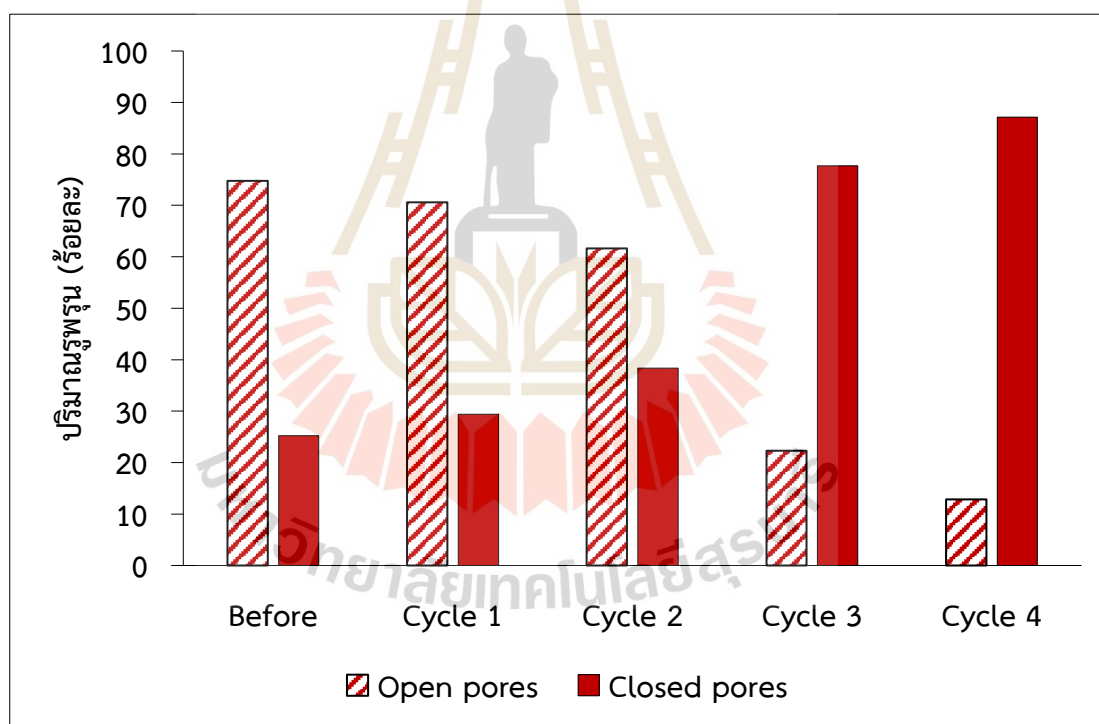
ผลการศึกษาสภาพการอุดตันบนพื้นผิวถ่าน MAC ที่มีระยะเวลาการดูดซับแตกต่างกัน ได้แก่ ถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ (0 นาที) และถ่าน MAC หลังการดูดซับที่ระยะเวลาการดูดซับ 870 นาที (หลังการดูดซับ Cycle ที่ 1), 1,110 นาที (หลังการดูดซับ Cycle ที่ 2), 1,440 นาที (หลังการดูดซับ Cycle ที่ 3) และ 1,770 นาที (หลังการดูดซับ Cycle ที่ 4) จากผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.20 พบว่า เมื่อระยะเวลาการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถ่าน MAC มีปริมาณรูพรุนเปิดลดลง ทำให้มีสัดส่วนร้อยละปริมาณรูพรุนปิดเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าถ่าน MAC ก่อนดูดซับมีปริมาณรูพรุนเปิดสูงสุดร้อยละ 74.74 และมีรูพรุนปิดร้อยละ 25.26 จากนั้นทำการดูดซับสารไตรโคลซานจนถึงระยะชักกลับของ Cycle ที่ 1, 2, 3 และ 4 ทำให้ถ่าน MAC มีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดลดลงร้อยละ 70.59, 61.66, 22.30 และ 12.84 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณรูพรุนปิด พบว่าถ่าน

MAC ก่อนดูดซับมีปริมาณรูพรุนปิดต่ำสุดร้อยละ 25.26 จากนั้นทำการดูดซับสารไตรโคลซานจนถึงระยะซีกกลับของ Cycle ที่ 1, 2, 3 และ 4 ส่งผลให้ถ่าน MAC มีปริมาณรูพรุนปิดคิดเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้นร้อยละ 29.41, 38.34, 77.70 และ 87.16 ตามลำดับ เนื่องมาจากการลดลงของปริมาณรูพรุนเปิด จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปริมาณรูพรุนเปิดของถ่าน MAC ก่อนดูดซับที่สามารถเกิดการดูดซับได้ (Active sites) มีปริมาณสูง ทำให้เกิดการดูดซับสารไตรโคลซานบนพื้นผิวของถ่าน MAC อย่างรวดเร็ว ได้สูงสุดถึงร้อยละ 74.74 และมีสัดส่วนปริมาณรูพรุนปิดร้อยละ 25.26 ที่ไม่สามารถเกิดการดูดซับได้ (Non-active sites) เนื่องจากเป็นรูพรุนที่ไม่เชื่อมต่อกับพื้นผิวอื่น ๆ ทำให้สารไตรโคลซานไม่สามารถถูกดูดซับในบริเวณนี้ได้ หรือเป็นรูพรุนที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่าโมเลกุลสารไตรโคลซาน (Zdravkov et al., 2007; Yurduşen et al., 2020; Li et al., 2024) เมื่อพิจารณาสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดและรูพรุนปิดดังแสดงในรูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นว่าปริมาณรูพรุนเปิดของ MAC ก่อนดูดซับมีสูงสุดถึงร้อยละ 74.74 หลังการดูดซับจะพบว่าปริมาณรูพรุนเปิดมีแนวโน้มลดลงตาม Cycle ที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่ามีปริมาณรูพรุนเปิดลดลงเพียงเล็กน้อยใน Cycle ที่ 1 (ร้อยละ 70.59) และมีปริมาณรูพรุนเปิดค่อย ๆ ลดลงใน Cycle ที่ 2 (ร้อยละ 61.66) และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับสารไตรโคลซานจนถึง Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่าปริมาณรูพรุนเปิดจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดย Cycle ที่ 3 (ร้อยละ 22.30) และ Cycle ที่ 4 (ร้อยละ 12.84) ตามลำดับ ในขณะที่สัดส่วนปริมาณรูพรุนปิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยถ่าน MAC ก่อนดูดซับ (ร้อยละ 25.26) และถ่าน MAC หลังดูดซับของ Cycle ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับร้อยละ 29.41, 38.34, 77.70 และ 87.16 ตามลำดับ เนื่องมาจากสารไตรโคลซานถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนเปิดลดจำนวนลง จากผลการศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าถ่าน MAC หลังการดูดซับที่ถูกซีกกลับใน Cycle ที่ 1 และ 2 เกิดการดูดซับสารไตรโคลซานได้ยังไม่เต็มประสิทธิภาพ รวมถึงพบว่าเส้นโค้งการดูดซับของกราฟ Breakthrough curve ของ Cycle ที่ 1 มีลักษณะเหมือนกับการดูดซับแบบ Fixed bed column สามารถอนุมานได้ว่าถ่าน MAC ที่ทำการดูดซับสารไตรโคลซานในคอลัมน์เป็นระยะเวลา 870 นาที ยังคงมีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดสูง เนื่องมาจากมีระยะเวลาการดูดซับไม่เพียงพอ ส่งผลทำให้การดูดซับของถ่าน MAC ไม่เต็มประสิทธิภาพ หรือเมื่อเดินระบบการดูดซับแบบ Fixed bed column เป็นครั้งที่ 2 ซึ่งมีระยะเวลาการดูดซับจนถึง 1,100 นาที ก็พบว่ามีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดของถ่าน MAC ลดลงเพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับ Cycle ที่ 1 แสดงให้เห็นว่าถ่าน MAC ของการดูดซับแบบ Fixed bed column ยังไม่สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้เต็มประสิทธิภาพเหมือนกับ Cycle ที่ 1 จึงเป็นสาเหตุให้ Fixed bed column ต้องสูญเสียถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก เนื่องมาจากการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ทั้งหมดในคอลัมน์ อีกทั้งถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ที่ถูกปล่อยออกจากคอลัมน์ยังพบว่าการดูดซับยังไม่เต็มประสิทธิภาพความสามารถของถ่าน MAC (Patel, 2019) แต่เมื่อเดินระบบการดูดซับในคอลัมน์จนถึง Cycle ที่ 3 และ 4 พบว่ามีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดลดลงอย่างมาก เนื่องมาจากถ่าน MAC ที่ถูกเปลี่ยนมีระยะเวลาสัมผัสกับโมเลกุลสารไตรโคลซานยาวนานมากขึ้น รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.32 ทำให้ถ่าน MAC สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับบนพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ การเพิ่มปริมาณถ่าน MAC จึงเป็นการเพิ่มพื้นผิวและตำแหน่งว่างที่ใช้ในการดูดซับ ส่งผลให้มีระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น และมีค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Futalan and Wan., 2022; Subair et al., 2024) จากผล

การศึกษาค้นคว้านี้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับแบบ Pulsed bed column ช่วยยืดอายุการใช้งานคอลัมน์ให้ยาวนานขึ้น และทำให้เกิดการดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ Fixed bed column

ตารางที่ 4.20 ปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการดูดซับ

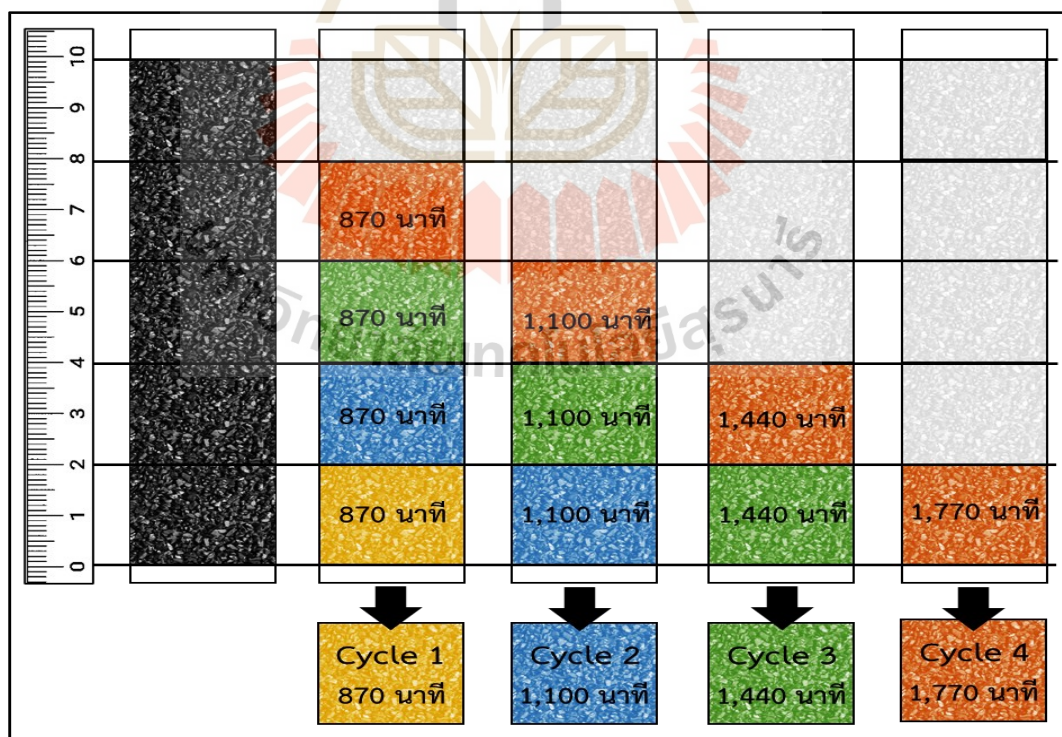
| ตัวอย่าง | ระยะเวลาการดูดซับ (นาทีก) | ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ) | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|
| | | รูพรุนเปิด | รูพรุนปิด |
| ถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ | 0 | 74.74 | 25.26 |
| ถ่าน MAC หลังการดูดซับที่ Cycle 1 | 870 | 70.59 | 29.41 |
| ถ่าน MAC หลังการดูดซับที่ Cycle 2 | 1,110 | 61.66 | 38.34 |
| ถ่าน MAC หลังการดูดซับที่ Cycle 3 | 1,440 | 22.30 | 77.70 |
| ถ่าน MAC หลังการดูดซับที่ Cycle 4 | 1,770 | 12.84 | 87.16 |



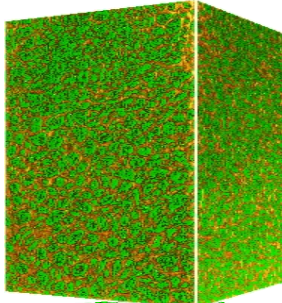
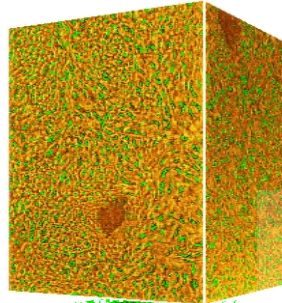
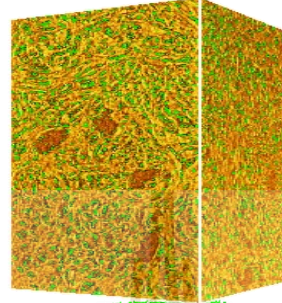
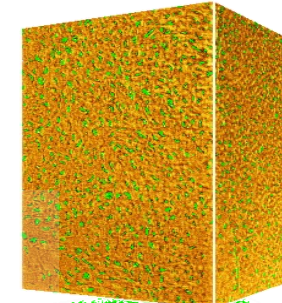
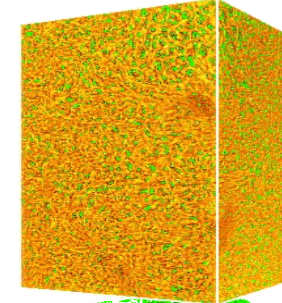
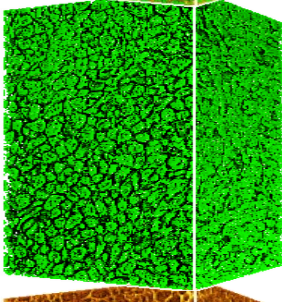
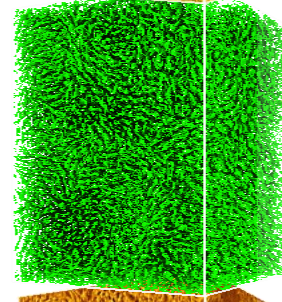
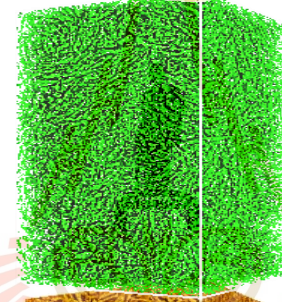
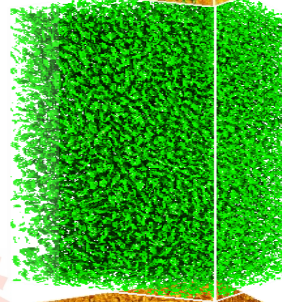
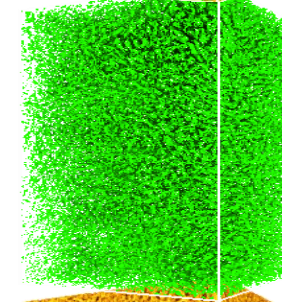
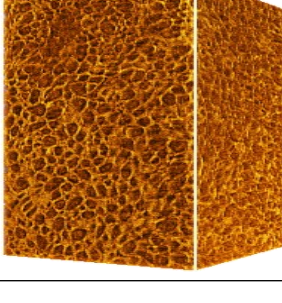



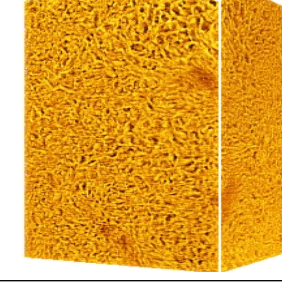
รูปที่ 4.31 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC เมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XTM นำมาสร้างภาพจำลองสามมิติดังแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่า เมื่อระยะเวลาในการดูดซับยาวนานขึ้นจาก 870 ถึง 1,770 นาทีก ส่งผลทำให้มีพื้นที่สีน้ำตาลเพิ่มขึ้นและมีพื้นที่สีเขียวลดลง เนื่องจากเฟสของแข็ง (Matrix phase) ที่เกิดขึ้นหลังดูดซับจะประกอบด้วยเนื้อถ่าน MAC และโมเลกุลสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับส่งผลให้มีพื้นที่สีน้ำตาลเพิ่มขึ้น ในขณะที่เฟสของอากาศ (Dispersive phase) จะถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลสารไตรโคลซานจึงมีพื้นที่สี

เขียวลดลง ผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้จึงสอดคล้องกับผลการศึกษาของถ่าน MAC หลังการดูดซับมีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดลดลง ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับถ่าน MAC ระหว่างก่อนและหลังการดูดซับสารไตรโคลซาน พบว่า เมื่อมีระยะเวลาในการดูดซับยาวนานขึ้น ส่งผลให้ถ่าน MAC หลังดูดซับมีพื้นที่สีน้ำตาลเพิ่มขึ้น และมีพื้นที่สีเขียวลดลง แสดงว่าเกิดการอุดตันบนพื้นผิวและรูพรุนของถ่าน MAC เพราะมีการดูดซับสารไตรโคลซานเพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษาสภาพการอุดตันบนพื้นผิวถ่าน MAC เมื่อมีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับสารไตรโคลซานเพิ่มขึ้นจาก 870 เป็น 1,110, 1,440 และ 1,770 นาที พบว่า สารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MAC ส่งผลทำให้สัดส่วนรูพรุนเปิดมีปริมาณลดลง และสัดส่วนรูพรุนปิดมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่ง Cycle ที่ 4 มีปริมาณรูพรุนเปิดลดลงมากที่สุด ส่งผลให้เกิดการดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น ดังนั้น การดูดซับแบบ Pulsed bed column จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่าน MAC ได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากถ่าน MAC จะไม่ถูกปล่อยออกทั้งคอลัมน์ ส่งผลทำให้มีเพียงถ่าน MAC ที่อึดตัวเท่านั้นที่ถูกปล่อยออก ส่งผลให้ถ่าน MAC ในคอลัมน์ที่ดูดซับสารไตรโคลซานยังไม่เต็มประสิทธิภาพ มีระยะเวลาอยู่ในคอลัมน์ยาวนานขึ้น และสามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้มากขึ้นจึงมีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดลดลงมากที่สุด รวมถึงมีการเพิ่มถ่าน MAC ชุดใหม่เข้าสู่คอลัมน์ตามปริมาณที่ถูกปล่อยออก ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณพื้นผิวของถ่าน MAC ทำให้การดูดซับแบบ Pulsed bed column สามารถลดการสูญเสียถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก และสามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ได้ (Patel, 2019; Sookkumnerd, 2019; Plangklang and Sookkumnerd, 2023)



รูปที่ 4.32 แบบจำลองการเลื่อนตำแหน่งของถ่าน MAC ภายในคอลัมน์การดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่มีระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร

| | | | | | |
|----------------|--|--|---|--|--|
| Visualization |  |  |  |  |  |
| |  |  |  |  |  |
| Matrix phase |  |  |  |  |  |
| Total porosity | ถ่าน MAC ก่อนดูดซับ 74.74% | ระดับความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 0 เซนติเมตร | | | |
| | | Cycle 1 70.59% | Cycle 2 61.66% | Cycle 3 22.30% | Cycle 4 12.84% |

รูปที่ 4.33 ภาพสามมิติด้วยเทคนิค XTM ของถ่าน MAC ก่อนและหลังดูดซับที่ Cycle ต่าง ๆ ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column

4.4.2 ผลการถอดต้นบนพื้นผิวถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของคอลัมน์

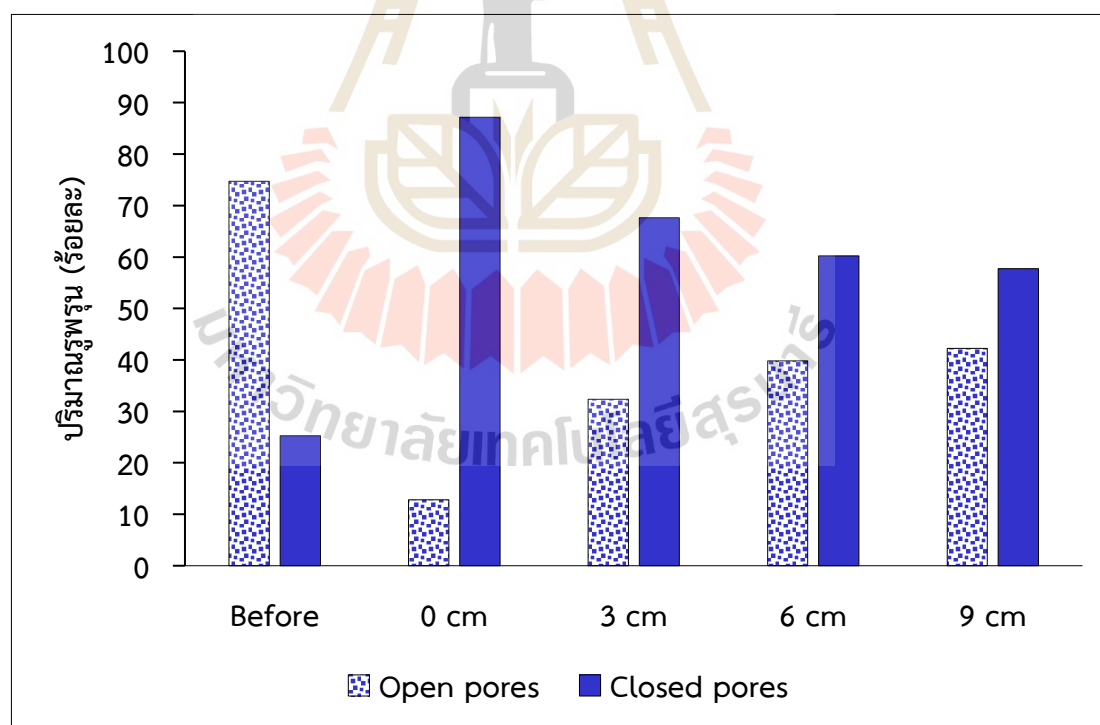
ผลการศึกษาสภาพการถอดต้นบนพื้นผิวถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของคอลัมน์ โดยใช้ตัวอย่างถ่าน MAC หลังเสร็จสิ้นการดูดซับใน Cycle ที่ 4 ของระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร ที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 0, 3, 6 และ 9 เซนติเมตร จากผลการศึกษาปริมาณรูพรุนดังแสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าปริมาณรูพรุนที่ระดับความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 เซนติเมตร มีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.84, 32.35, 39.80 และ 42.25 ตามลำดับ และมีปริมาณรูพรุนปิดลดลงเป็นร้อยละ 87.16, 67.65, 60.20 และ 57.75 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่าน MAC ที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 0 เซนติเมตร (บริเวณด้านล่างสุดของคอลัมน์) มีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดน้อยสุดเท่ากับร้อยละ 12.84 และมีปริมาณรูพรุนปิดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 87.16 แสดงว่าถ่าน MAC ที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 0 เซนติเมตร เกิดการดูดซับมากที่สุด และถ่าน MAC ถูกใช้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องมาจากการดูดซับแบบคอลัมน์ Pulsed bed column ถูกออกแบบให้มีการไหลแบบ Up-flow ส่งผลให้บริเวณด้านล่างของคอลัมน์หรือระดับความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 0 เซนติเมตร ถ่าน MAC ได้เกิดการดูดซับสารละลายไตรโคลซานก่อนบริเวณด้านบนของคอลัมน์ รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.34

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าบริเวณด้านล่างของคอลัมน์มีปริมาณรูพรุนเปิดน้อยที่สุด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีระดับความสูงของคอลัมน์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.32 ดังนั้น บริเวณด้านล่างของคอลัมน์จึงเป็นส่วนแรกที่เกิดการดูดซับและถอดต้นก่อนบริเวณด้านบน ส่งผลทำให้การดูดซับมีแนวโน้มการถอดต้นของรูพรุนลดลงตามระดับความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการศึกษาการถอดต้นเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของคอลัมน์สามารถยืนยันผลการวิเคราะห์การถอดต้นเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการดูดซับได้ว่าการชักกลับถ่าน MAC ที่มีระยะความสูงของการชักกลับอย่างน้อย 2 เซนติเมตร สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ได้ เพราะสามารถลดสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดได้ ซึ่งลักษณะการชักกลับที่ความสูง 2 เซนติเมตร จำนวน 4 Cycle เป็นตัวแทนที่ดีในการเปรียบเทียบสัดส่วนของปริมาณรูพรุนเปิดและรูพรุนปิดของทั้งคอลัมน์ (ถ่าน MAC ถูกบรรจุในคอลัมน์ที่มีความสูงสุทธิเท่ากับ 10 เซนติเมตร) ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าถ่าน MAC ที่อยู่ด้านบนของคอลัมน์ยังไม่สามารถดูดซับได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เพราะพบสัดส่วนรูพรุนเปิดในปริมาณมาก หากถ่าน MAC ถูกปล่อยออกจากการดูดซับทั้งหมดแบบ Fixed bed column จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับของคอลัมน์ลดลง และสูญเสียถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นการดูดซับแบบ Pulsed bed column จะส่งผลทำให้ถ่าน MAC ที่อยู่ด้านบนของคอลัมน์เลื่อนตำแหน่งลงมาข้างล่าง เนื่องมาจากการชักถ่าน MAC จำนวนหนึ่งออกทางด้านล่างคอลัมน์ ดังนั้น ถ่าน MAC จึงมีระยะเวลาสัมผัสกับสารไตรโคลซานได้ยาวนานขึ้น ส่งผลต่อสัดส่วนรูพรุนเปิดที่มีปริมาณลดลง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของคอลัมน์ได้อย่างคุ้มค่า ผลการศึกษาในครั้งนี้ได้ถูกจำลองเป็นภาพสามมิติด้วยเทคนิค XTM ดังแสดงในรูปที่ 4.35 พบว่าถ่าน MAC หลังการดูดซับที่ระดับความสูงชั้นถ่าน 0 เซนติเมตร มีพื้นที่สีน้ำตาลมากที่สุด และมีพื้นที่สีเขียวลดลง เนื่องจากเกิดการดูดซับสูงสุด และเมื่อเพิ่มระดับความสูงของคอลัมน์เป็น 3, 6 และ 9 เซนติเมตร พบว่ามีพื้นที่สีน้ำตาลลดลง และมีพื้นที่สีเขียวกระจายทั่วพื้นผิวถ่าน MAC เป็นบริเวณกว้าง เนื่องมาจากมีแนวโน้มการดูดซับลดลง จากการทบทวนงานวิจัยพบว่าการดูดซับแบบ Fixed bed column จะดึงถ่านกัม

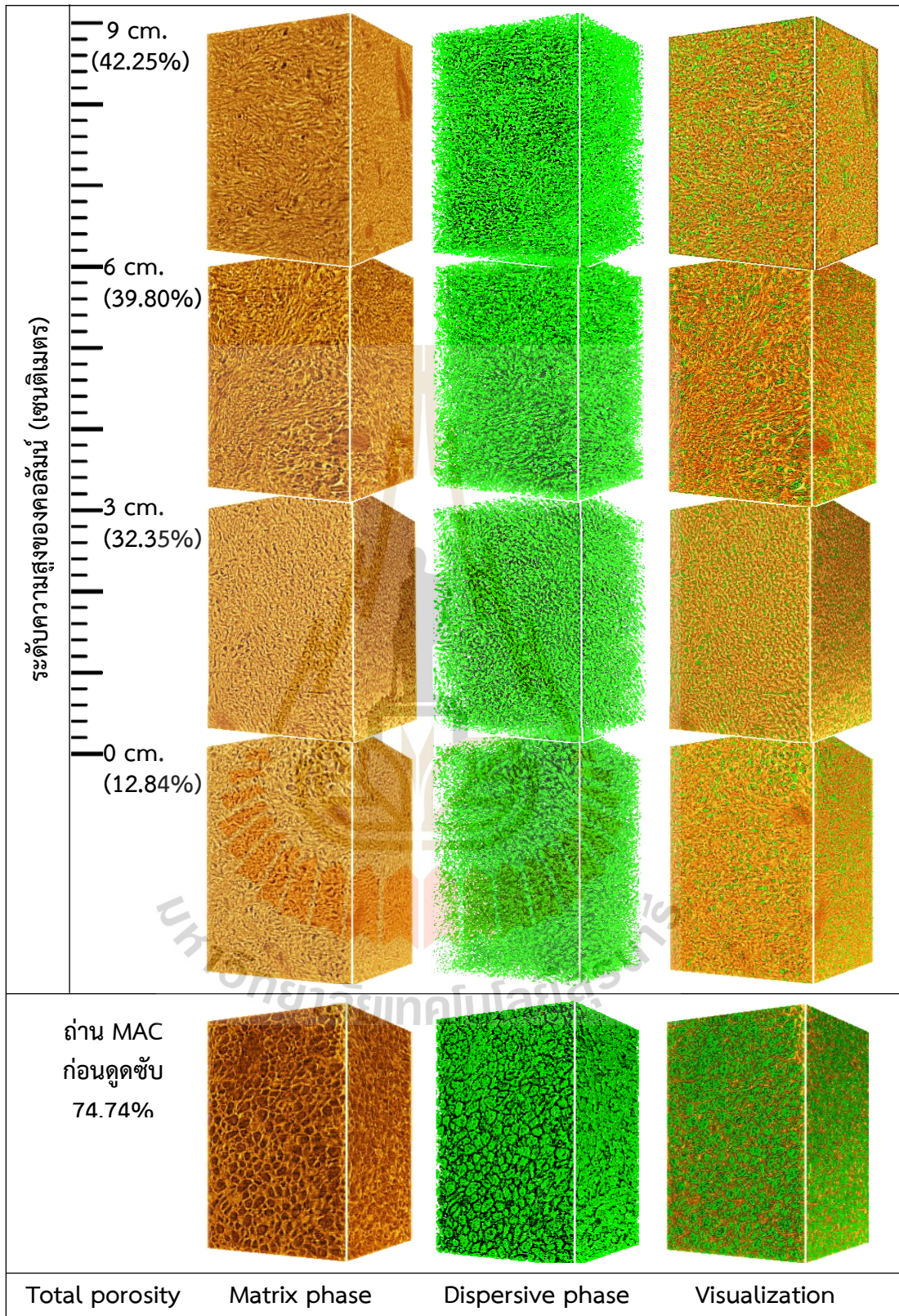
มันต์ออกทั้งคอลัมน์ ส่งผลทำให้สูญเสียถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก และถ่าน MAC ที่ถูกเปลี่ยนออกยังมีค่าความสามารถในการดูดซับน้อย และยังไม่เต็มประสิทธิภาพของความสามารถในการดูดซับของถ่าน ในขณะที่การดูดซับแบบ Pulsed bed column สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคอลัมน์ได้จากการชักกลับถ่านในปริมาณน้อย รวมไปถึงเพื่อทดแทนการปล่อยถ่าน MAC ออกเหมือนในระบบ Fixed bed column ที่จะเอาตัวดูดซับออกทั้งคอลัมน์ (McKay, 1981; Patel, 2019; Plangklang and Sookkumnerd, 2023)

ตารางที่ 4.21 ปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงชั้นถ่าน MAC

| ตัวอย่าง | ระดับความสูงชั้นถ่าน MAC (เซนติเมตร) | ปริมาณรูพรุน (ร้อยละ) | |
|---|---|-----------------------|-----------|
| | | รูพรุนเปิด | รูพรุนปิด |
| ถ่าน MAC ก่อนการดูดซับ | - | 74.74 | 25.26 |
| ถ่าน MAC หลังการดูดซับ ของ Cycle ที่ 4 | 0 | 12.84 | 87.16 |
| | 3 | 32.35 | 67.65 |
| | 6 | 39.80 | 60.20 |
| | 9 | 42.25 | 57.75 |



รูปที่ 4.34 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณรูพรุนของถ่าน MAC เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับความสูงคอลัมน์



รูปที่ 4.35 ภาพสามมิติด้วยเทคนิค XTM ของถ่าน MAC ก่อนและหลังการดูดซับที่ระดับความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 0, 3, 6 และ 9 เซนติเมตร ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column

เมื่อนำผลการทบทวนงานวิจัยมาพิจารณาพร้อมกับผลการศึกษาสภาพการอุดตันด้วยเทคนิค XTM ในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าหากออกแบบการดูดซับในคอลัมน์เป็นแบบ Fixed bed column จะพบว่าถ่าน MAC ที่ระดับความสูงของคอลัมน์เป็น 3, 6 และ 9 เซนติเมตร ยังไม่สามารถดูดซับได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะที่ระดับความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 9 เซนติเมตร ซึ่งอยู่บริเวณด้านบนสุดของคอลัมน์ จะเกิดการดูดซับในคอลัมน์น้อยสุดเพียงร้อยละ 43.47 ทำให้ยังคงมีพื้นที่ว่างในการดูดซับเหลืออยู่มาก และเมื่อทำการดูดซับจนถึงสภาวะเบตดูดซับที่ร้อยละ 50 ถ่านกัมมันต์จะถูกดึงออกจากคอลัมน์ทั้งหมด ซึ่งเป็นผลให้การดูดซับแบบ Fixed bed column เกิดการดูดซับได้ไม่เต็มประสิทธิภาพและสูญเสียถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก ดังนั้น การซักกลับถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์แบบ Pulsed bed column จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่าน MAC ได้ด้วยการดึงถ่าน MAC ออกจากด้านล่างคอลัมน์เพียงจำนวนหนึ่ง และถ่าน MAC ที่บริเวณด้านบนของคอลัมน์จะเลื่อนลงมาด้านล่างของคอลัมน์จึงมีระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น และลดการสูญเสียถ่าน MAC ปริมาณในปริมาณมาก

4.5 การนำผลการศึกษาคอลัมน์แบบ Pulsed bed column มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซานในอุตสาหกรรม

จากลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ที่ผลิตได้ในการศึกษาครั้งนี้มีพื้นที่ผิวสูงเท่ากับ 985.4 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 0.427 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นำมาใช้ในการออกแบบการดูดซับแบบคอลัมน์ จากผลการศึกษาสภาวะในการเดินระบบที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราการไหลเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสูงชั้นสารดูดซับเท่ากับ 10 เซนติเมตร และมีความสูงของระยะซักกลับเท่ากับ 6 เซนติเมตร มีระยะเวลาในการดูดซับยาวนานที่สุดเท่ากับ 5,280 นาที และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม

กำหนดให้โจทย์ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการ Scaling-up มีอัตราการไหลเข้าสู่คอลัมน์เพิ่มขึ้นเป็น 87.90 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ประสิทธิภาพในการดูดซับสารไตรโคลซานร้อยละ 95 จะทำให้มีความเข้มข้นสารไตรโคลซานออกจากระบบไม่เกิน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าสู่ระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7.0 ถึง 12.68 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่พบในน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด และค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าในช่วง 5.5 ถึง 9.0 ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) รายละเอียดลักษณะน้ำเสียดังแสดงในตารางที่ 4.22 นำผลการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซานในอุตสาหกรรม วิเคราะห์อายุการใช้งานของคอลัมน์ความสามารถในการดูดซับ และประสิทธิภาพของคอลัมน์ เมื่อมีการขยายระบบ Scaling-up ของคอลัมน์ โดยคำนวณค่าพารามิเตอร์จากการเปลี่ยนแปลงขนาดของคอลัมน์ จากคอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ (Lab scale) โดยทำการเพิ่มขนาดของคอลัมน์ใหม่ เส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 400 เซนติเมตร และมีความสูง 1,500 เซนติเมตร (Pilot scale) ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.23 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.22 โจทย์ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการ Scaling-up

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่า |
|---|------------------|-----------|
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานในน้ำเสียเข้าระบบ | มิลลิกรัมต่อลิตร | 60 |
| ความเข้มข้นสารไตรโคลซานออกจากระบบ | มิลลิกรัมต่อลิตร | 3 |
| ประสิทธิภาพในการกำจัดสารไตรโคลซาน ไม่น้อยกว่า | ร้อยละ | 95 |
| ค่าพีเอชของน้ำเสียเข้าระบบ | - | 7.0-12.68 |
| ค่าพีเอชออกจากระบบ | - | 5.5-9.0 |

ตารางที่ 4.23 รายละเอียดผลการศึกษากำจัดสารไตรโคลซานสำหรับประยุกต์ใช้ในการ Scaling-up คอลัมน์ดูดซับในอุตสาหกรรม

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าที่ได้จากงานวิจัย (Lab-scale) | ค่าที่ได้จากการออกแบบ (Pilot-scale) |
|--|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ | เซนติเมตร | 2 | 400 |
| ความสูงคอลัมน์ | เซนติเมตร | 10 | 1500 |
| พื้นที่หน้าตัดคอลัมน์ | ตารางเซนติเมตร | 3.14 | 125,600 |
| ปริมาตรของคอลัมน์ | ลูกบาศก์เซนติเมตร | 31.42 | 188,400,000 |
| อัตราการกรอง | เซนติเมตรต่อนาที | 1.27 | 11.66 |
| อัตราการไหลน้ำเสีย | มิลลิลิตรต่อนาที | 10 | 1,465,000 |
| Cycle 1 | | | |
| น้ำหนักถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์ (เริ่มต้น) | กรัม | 14.02 | 84,780,000 |
| ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ | นาที | 870 | 128.60 |
| ค่าความสามารถในการดูดซับ | มิลลิกรัมต่อกรัม | 25.30 | 0.13 |
| ปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่เข้าคอลัมน์ | ลิตร | 8.70 | 188,400 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q_{total}) | มิลลิกรัม | 261 | 10,738,743 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m_{total}) | มิลลิกรัม | 522.00 | 11,303,940 |
| %Total adsorption = $(q_{total}/m_{total}) \times 100$ | ร้อยละ | 50 | 95 |

ตารางที่ 4.23 รายละเอียดผลการศึกษากำจัดสารไตรโคลซานสำหรับประยุกต์ใช้ในการ Scaling-up คอลัมน์ดูดซับในอุตสาหกรรม (ต่อ)

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าที่ได้จากงานวิจัย (Lab-scale) | ค่าที่ได้จากการออกแบบ (Pilot-scale) |
|--|------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Cycle 2 | | | |
| น้ำหนักถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์ | กรัม | 22.44 | 85,119,120 |
| ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ | นาที | 2,160 | 205.76 |
| ค่าความสามารถในการดูดซับ | มิลลิกรัมต่อกรัม | 42.80 | 0.13 |
| ปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่เข้าคอลัมน์ | ลิตร | 21.60 | 301,438.40 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q_{total}) | มิลลิกรัม | 648 | 17,181,988.8 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m_{total}) | มิลลิกรัม | 1,296 | 18,086,304 |
| %Total adsorption = $(q_{total}/m_{total}) \times 100$ | ร้อยละ | 50 | 95 |
| Cycle 3 | | | |
| น้ำหนักถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์ | กรัม | 30.85 | 186,855,120 |
| ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ | นาที | 3,540 | 282.92 |
| ค่าความสามารถในการดูดซับ | มิลลิกรัมต่อกรัม | 41.50 | 0.13 |
| ปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่เข้าคอลัมน์ | ลิตร | 35.40 | 414,477.80 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q_{total}) | มิลลิกรัม | 1,062 | 23,625,234.60 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m_{total}) | มิลลิกรัม | 2,124.00 | 24,868,668 |
| %Total adsorption = $(q_{total}/m_{total}) \times 100$ | ร้อยละ | 50 | 95 |
| Cycle 4 | | | |
| น้ำหนักถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์ | กรัม | 39.26 | 237,723,120 |
| ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ | นาที | 5,280 | 360.08 |
| ค่าความสามารถในการดูดซับ | มิลลิกรัมต่อกรัม | 53.40 | 0.13 |
| ปริมาตรสารละลายไตรโคลซานที่เข้าคอลัมน์ | ลิตร | 52.80 | 527,520 |

ตารางที่ 4.23 รายละเอียดผลการศึกษากำจัดสารไตรโคลซานสำหรับประยุกต์ใช้ในการ Scaling-up คอลัมน์ดูดซับในอุตสาหกรรม (ต่อ)

| พารามิเตอร์ | หน่วย | ค่าที่ได้จากงานวิจัย (Lab-scale) | ค่าที่ได้จากการออกแบบ (Pilot-scale) |
|--|-----------|----------------------------------|-------------------------------------|
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q_{total}) | มิลลิกรัม | 1,584 | 25,559,210.4 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m_{total}) | มิลลิกรัม | 3,168 | 26,904,432 |
| %Total adsorption = $(q_{total}/m_{total}) \times 100$ | ร้อยละ | 50 | 95 |

จากผลการคำนวณการกำจัดสารไตรโคลซานของ Pilot scale โดยในแต่ละรอบของการดูดซับจะเปลี่ยนถ่ายถ่าน MAC ร้อยละ 60 ของความสูงคอลัมน์ ส่งผลทำให้ถ่าน MAC ที่ถูกเปลี่ยนออกมีระยะความสูงเท่ากับ 900 เซนติเมตร (ความสูงคอลัมน์ 1,500 x 60 เซนติเมตร) แล้วป้อนถ่าน MAC ชุดใหม่เข้าสู่คอลัมน์ตามระยะความสูงที่ถูกเปลี่ยนออก กำหนดให้มีประสิทธิภาพการดูดซับไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.24 มีรายละเอียดดังนี้ ที่ Cycle 1 การดูดซับในรอบแรกของการเดินระบบส่งผลทำให้มีปริมาณถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์เท่ากับ 84.8 ตัน มีระยะเวลาในการดูดซับเท่ากับ 128.60 นาที สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียสารไตรโคลซานเท่ากับ 188,400 ลิตร และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม จากนั้นชกกลับถ่าน MAC ออก และเติมถ่าน MAC ชุดใหม่เป็น Cycle 2 พบว่ามีปริมาณถ่าน MAC ที่ถูกใช้ในคอลัมน์เพิ่มขึ้นเป็น 85.1 ตัน มีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 205.76 นาที สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียสารไตรโคลซานเท่ากับ 301,438.40 ลิตร และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม ต่อมาทำการวิเคราะห์หลังการชกกลับถ่าน MAC เริ่มการดูดซับของ Cycle 3 พบว่ามีปริมาณถ่าน MAC ที่ถูกใช้ในคอลัมน์เพิ่มขึ้นเป็น 186.9 ตัน มีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้นเป็น 282.92 นาที สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียสารไตรโคลซานเท่ากับ 414,477.80 ลิตร และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม และทำการวิเคราะห์ผลหลังการชกกลับถ่าน MAC ของ Cycle 4 พบว่ามีปริมาณถ่าน MAC ที่ถูกใช้ในคอลัมน์เพิ่มขึ้นเป็น 237.7 ตัน มีระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 360.08 นาที สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียสารไตรโคลซานเท่ากับ 527,520 ลิตร และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.13 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การดูดซับระหว่าง Lab scale และ Pilot scale พบว่าทั้งสองชุดข้อมูลมีปริมาณสารไตรโคลซานที่ป้อนเข้าคอลัมน์ และปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่จะพบว่า Lab scale เกิดการดูดซับได้มากกว่าแบบ Pilot scale เนื่องจากมีอัตราการไหลต่ำกว่า และมีปริมาณถ่าน MAC ที่ใช้ในการดูดซับน้อยกว่า ส่งผลให้สารไตรโคลซานมีระยะเวลาสัมผัสกับถ่าน MAC ยาวนานขึ้น และทำให้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีความมากกว่าการดูดซับของ Pilot scale ดังนั้น

การดูดซับแบบ Lab scale ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ถ่าน MAC จะอิ่มตัวก่อน และมีรอบของการเปลี่ยนถ่าน MAC มากกว่า

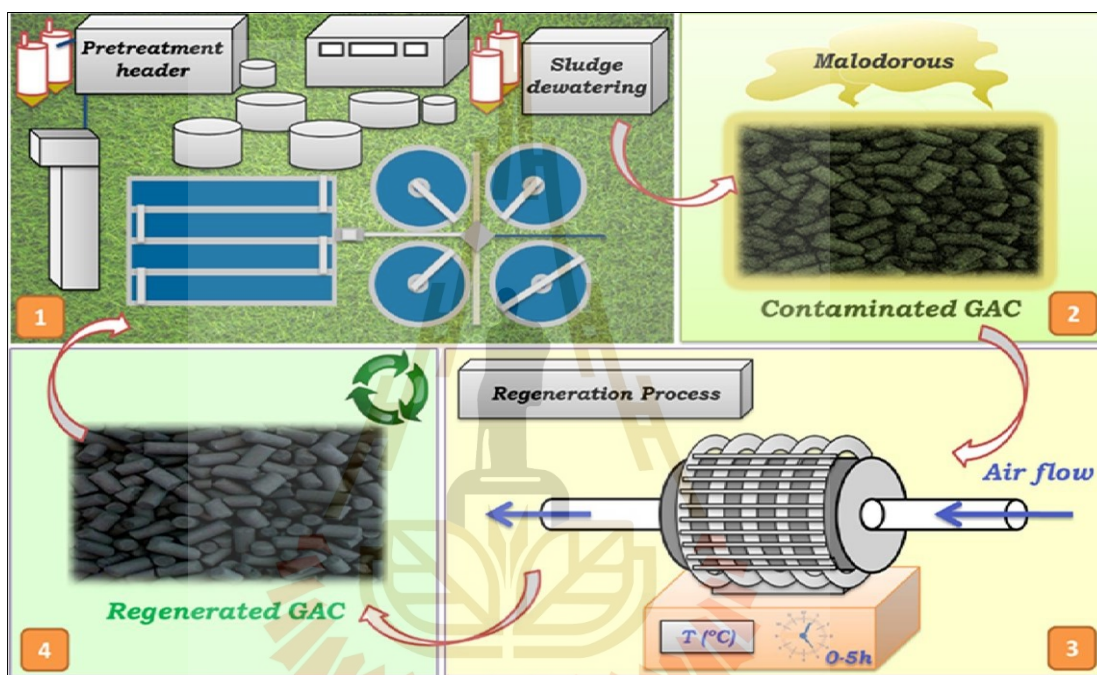
ตารางที่ 4.24 สรุปผลการกำจัดสารไตรโคลซานในคอลัมน์ (Pilot scale)

| ผลการศึกษา | Cycle 1 | Cycle 2 | Cycle 3 | Cycle 4 |
|---|---------|------------|------------|---------|
| น้ำหนักถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์ (ตัน) | 84.8 | 85.1 | 186.9 | 237.7 |
| ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาทีก) | 128.60 | 205.76 | 282.92 | 360.08 |
| ค่าความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าคอลัมน์ (ลิตร) | 188,400 | 301,438.40 | 414,477.80 | 527,520 |
| %Total adsorption (ร้อยละ) | 95 | 95 | 95 | 95 |

จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดคอลัมน์ และอัตราการไหล ส่งผลทำให้มีการใช้ถ่าน MAC เพิ่มขึ้นสูงสุดเป็น 237.7 ตัน และสามารถรองรับปริมาณน้ำเสียสารไตรโคลซานได้สูงสุดเท่ากับ 527,520 ลิตร เพราะคอลัมน์มีขนาดใหญ่ขึ้น และพบว่าส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าคอลัมน์ Pilot scale สามารถกำจัดปริมาณสารไตรโคลซานได้สูงสุดเท่ากับ 25,559,210.4 มิลลิกรัม แต่มีค่าความสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องมาจากถ่าน MAC ที่ป้อนเข้าคอลัมน์นั้นจะส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวและตำแหน่งว่างสำหรับการดูดซับสูง การดูดซับเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างแต่อัตราการดูดซับจะเกิดขึ้นได้น้อย แสดงให้เห็นว่าคอลัมน์ Pilot scale ที่ถูกแบบในงานวิจัยนี้สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้อย่างยาวนาน การยืดอายุคอลัมน์จากการดูดซับแบบ Pulsed bed column ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง ทั้งนี้ การวิเคราะห์การดูดซับของ Pilot scale ในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มสเกลของขนาดคอลัมน์ และเพิ่มอัตราการไหลเพียงเท่านั้น จึงพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการศึกษาความเข้มข้นสารไตรโคลซานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ระยะความสูงของการชักกลับ หรือเพิ่มรอบของการดูดซับ จึงจะส่งผลให้การดูดซับในคอลัมน์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เมื่อมีการใช้งานถ่านกัมมันต์ไปได้ระยะหนึ่งจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับลดลง แสดงให้เห็นว่ามีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับแพร่เข้าสู่รูพรุนและเกาะติดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะเบตอิมตัว และมีระดับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลายก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับมีค่าเท่ากัน ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพในการดูดซับชนิดนี้ถูกปล่อยออกจากคอลัมน์ และถูกแทนที่ด้วยถ่านกัมมันต์ชุดใหม่ แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้มีการจัดการถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้วอยู่สองวิธีการ ได้แก่ การกำจัดโดยการฝังกลบหรือการเผา และการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์สามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากสามารถเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.36 แต่พบข้อจำกัดด้าน

ความสามารถในการดูดซับที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตใหม่ และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพหลายครั้งจะมีความสามารถในการดูดซับลดลงตามลำดับจะกระทั่งไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้อีก (Márquez et al., 2021) ดังนั้น การเลือกวิธีการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์จึงควรมีความสอดคล้องกับกลไกการดูดซับ และความร้อนที่ใช้ในการคายการดูดซับ (สัมฤทธิ์ โหม่ง, 2566) ตัวอย่างการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ เช่น การฟื้นฟูสภาพทางความร้อน การฟื้นฟูสภาพทางความร้อนด้วยไมโครเวฟ การฟื้นฟูสภาพด้วยไอน้ำ การฟื้นฟูสภาพด้วยตัวทำละลาย การฟื้นฟูสภาพทางไฟฟ้าเคมี และการฟื้นฟูสภาพทางชีวภาพ เป็นต้น



รูปที่ 4.36 การเวียนใช้ถ่านกัมมันต์หลังผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Márquez et al., 2021)

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อน (Thermal regeneration) เป็นวิธีการไพโรไลซิสถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้ว โดยให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาการดูดซับสารไตรโคลซานบนพื้นผิวถ่าน MAC ที่เกิดขึ้นในการศึกษาวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงกลไกการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมี มีรายละเอียดดังนี้ จากผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ ได้ค่า ΔH เท่ากับ 9.68 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Edokpayi et al., 2020; Vidovix et al., 2019) จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ และเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Simiyu et al., 2023) จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับพบว่ามีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งสามารถอธิบายไอโซเทอร์มการดูดซับของระบบการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ที่เกิดการดูดซับด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ และพันธะทางเคมี รวมถึงการดูดซับเกิดขึ้นได้ทั้งแบบชั้นเดียว และแบบหลายชั้น

(ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย, 2554; Triwiswara et al., 2020) ดังนั้น วิธีการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมของ สัมฤทธิ์ ไม้พวง (2566) พบว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส สามารถคายการดูดซับองค์ประกอบของสารฟีนอลได้ เนื่องจากสารฟีนอลสามารถระเหยกลายเป็นไอได้โดยมีจุดเดือดเท่ากับ 182 องศาเซลเซียส และสารไตรโคลซานมีจุดเดือดเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส เป็นการคายการดูดซับทางกายภาพ และที่อุณหภูมิประมาณ 620 องศาเซลเซียส เป็นการคายการดูดซับทางเคมี นอกจากนี้การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่มีอุณหภูมิสูงถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในกระตุ้นถ่าน MAC ของงานวิจัยนี้ (950 องศาเซลเซียส) จะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ผิว และลักษณะรูพรุนของถ่าน MAC ไม่มากนัก เนื่องจากอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีความร้อนไม่เพียงพอต่อการทำลายเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่เป็นส่วนหนึ่งของผนังรูพรุน และมีความสอดคล้องกับผลการศึกษากการสลายตัวทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) ของถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียที่ถูกใช้ศึกษาการดูดซับในงานวิจัยของ ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ (2563) ที่ต้องให้ความร้อนในการกระตุ้นมากกว่า 900 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถสลายองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดสารไตรโคลซานโดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ที่ใช้ในการศึกษา

ผลจากการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่าน MAC ที่ใช้ในการศึกษา พบว่ามีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดเท่ากับ 0.427 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 985.40 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง-เล็ก และมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานถ่านกัมมันต์สำหรับอุตสาหกรรมทั่วไป จากผลการศึกษาพบว่าถ่าน MAC มีสัดส่วนปริมาณรูพรุนเปิดที่สามารถเกิดการดูดซับได้สูงสุดร้อยละ 74.74 สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้ดีเนื่องจากมีค่าพื้นที่ผิวสูง และพบหมู่ฟังก์ชัน -OH, C=O, C-O, C=C และ C-C ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดการดูดซับด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ และพันธะ π - π รวมถึงถ่าน MAC มีค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 7.90 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวถ่าน MAC เป็นประจุบวกที่สภาวะกรด และเป็นประจุลบที่สภาวะด่าง

5.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์

ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ เทอร์โมไดนามิกส์ และจลนพลศาสตร์ สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานด้วยถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย ในการทดลองแบบแบดซ์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.2.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ของการดูดซับแบบแบดซ์ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 780 นาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการกวนเท่ากับ 150 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชของสารละลายไตรโคลซานเท่ากับ 2 และ 10.5 ± 0.2 มีความสามารถในการดูดซับอยู่ในช่วง 27.80 ถึง 40.00 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.2.2 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

ผลจากการศึกษาอุณหพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีเท่ากับ 9.68 กิโลจูลต่อโมล ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีเท่ากับ 0.04 กิโลจูลต่อโมล-เคลวิน และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์อยู่ในช่วง -2.24 ถึง -3.04 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

การดูดซับเกิดขึ้นแบบสุ่ม และเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาปัจจัยเรื่องอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ

5.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

ผลการศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC มีความสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเท่ากับ 0.00005 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที่ และมีค่าความสามารถในการดูดซับจากสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียมเท่ากับ 61.73 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ และผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

5.2.4 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC มีความสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.9245 ถึง 0.9948 และ 0.9582 ถึง 0.9848 ตามลำดับ และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดอยู่ในช่วง 90.91 ถึง 116.28 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC สามารถเกิดการดูดซับได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี

5.2.5 ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

ผลการศึกษากลไกการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC พบว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงไฟฟ้าสถิตย์แบบดึงดูดกันจากการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน -OH, C-H, C=O, C=C, C-C, C-O และ C-Cl โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะกรด พบว่าถ่าน MAC สามารถดูดซับสารไตรโคลซานได้ดี ซึ่งสารไตรโคลซานจะอยู่ในรูปของ Phenolic-TCS และถ่าน MAC มีประจุบวกบนพื้นผิว ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ พันธะไฮโดรเจน พันธะ π - π การสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารไตรโคลซานด้วยตัวเอง และการแพร่เข้าสู่รูพรุนของสารไตรโคลซาน

5.3 ผลการศึกษาการดูดซับแบบคอลัมน์

5.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Fixed bed column

ผลจากการศึกษาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับแบบ Fixed bed column ได้แก่ อัตราการไหลเท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้นเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที และความสูงชั้นสารดูดซับเท่ากับ 10 เซนติเมตร พบว่ามีระยะเวลาในการดูดซับจนกระทั่งหมดประสิทธิภาพเท่ากับ 1,950 นาที และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 35.94 มิลลิกรัมต่อกรัม จากผลการศึกษาสอดคล้องกับการทำนายเส้นโค้งการดูดซับด้วยแบบจำลองของโทมัสได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.9602 ถึง 0.9827 และมีค่าความสามารถในการดูดซับโทมัส (q_{TH}) อยู่ในช่วง 21.70 ถึง 40.35 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulsed bed column

ผลการศึกษาการดูดซับแบบ Pulsed bed column พบว่าเมื่อเพิ่มระยะความสูงของการชักกลับจาก 2, 4 และ 6 เซนติเมตร ส่งผลทำให้สามารถยืดระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น จาก 1,770, 3,450 เป็น 5,280 นาที ตามลำดับ และมีค่าความสามารถในการดูดซับจาก 31.99, 50.76 เป็น 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยที่ระยะความสูงของการชักกลับเท่ากับ 6 เซนติเมตร สามารถเพิ่มระยะเวลาการดูดซับเป็น 5,280 นาที และค่าความสามารถในการดูดซับจากการดูดซับเท่ากับ 62.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น การชักกลับถ่าน MAC ออกเพียงปริมาณน้อย ส่งผลทำให้การดูดซับแบบ Pulsed bed column สามารถลดปริมาณการสูญเสียถ่านกัมมันต์ ยืดอายุการใช้งาน และเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับของคอลัมน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.4 ผลการศึกษาสภาพการอุดตันบนถ่าน MAC ของการดูดซับแบบ Pulsed bed column

ผลการศึกษาสภาพการอุดตันบนพื้นผิวถ่าน MAC หลังดูดซับสารไตรโคลซานด้วยเทคนิค XTM พบว่า การอุดตันของถ่าน MAC ในคอลัมน์จะเกิดขึ้นมากในบริเวณจุดเริ่มต้นของการปล่อยสารไตรโคลซานเข้า และถ่าน MAC ที่อยู่ด้านบนของคอลัมน์ยังมีพื้นที่ว่างในการดูดซับเหลืออยู่มาก เนื่องจากยังดูดซับได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้น การดูดซับแบบ Pulsed bed column จึงสามารถยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์ได้นานขึ้น และเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน MAC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.5 ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

5.5.1 ในการศึกษาขั้นต่อไป การนำผลการศึกษาที่ได้จากการดูดซับแบบ Pulsed bed column ไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารไตรโคลซานในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ดูแลส่วนบุคคล เพื่อนำไปสู่ขั้นตอนการใช้งานจริง

5.5.2 ควรกำหนดปริมาณสารไตรโคลซานที่ออกจากระบบบำบัด (High detection limit) เพื่อนำมาใช้สำหรับออกแบบคอลัมน์การดูดซับ เช่น อัตราการไหลที่ป้อนน้ำเสียเข้าสู่คอลัมน์ ระยะเวลาการดูดซับ ปริมาณน้ำเสียที่สามารถรองรับได้ และปริมาณถ่าน MAC ที่ใช้ในการดูดซับ

5.5.3 เมื่อมีการขยายระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ (Scaling-up) ควรศึกษาระยะชักกลับถ่าน MAC เพิ่มเติม เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซาน และยืดอายุการใช้งานของคอลัมน์

5.5.4 ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงความเป็นไปได้ในการฟื้นฟูสภาพถ่าน MAC ที่ใช้แล้ว และนำกลับมาใช้ใหม่ในการดูดซับแบบคอลัมน์ เช่น การฟื้นฟูสภาพทางความร้อน

รายการอ้างอิง

- เจือจันทร์ เกตษา. (2556). ผลของอุณหภูมิคาร์บอนไฮดรอกซิลต่อสมบัติของถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 150 หน้า.
- ฉวีวรรณ เพ็งพิทักษ์. (2562). ถ่านกัมมันต์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 4 หน้า.
- นุชจิรา ดีแจ่ม, ศิรินุช จินดารักษ์, ศกสิทธิ์ จินดารักษ์. (2560). ผลของปริมาณตัวประสานโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีต่อถ่านอัดเม็ดของถ่านกัมมันต์จากเปลือกแมคคาเดเมีย. มหาวิทยาลัยนเรศวร. 115 หน้า.
- บั้งอร อินทร์สูงเนิน. (2562). การศึกษาการดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดเมลานอยดินโดยใช้ถ่านกัมมันต์ไม้เสม็ดขาว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 252 หน้า.
- ปณพร เล็กประเสริฐ, รังสิณี ชื่นเจริญ, โกวิท ปิยะมังกลา. (2018). การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องโดยเกล็ดตัดแปร. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 1-10.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. ๒๕๖๐. กรมควบคุมมลพิษ. (2560).
- พงษ์ศิริ วินิจฉัย, วารุณี ธนะแพสย์, อัมพิกา แซ่จั้ง, นิธิวดี วงษ์เจริญ, พัสดราภรณ์ ห้วยศรีจันทร์. (2547). การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณไตรโคลซานในผลิตภัณฑ์สบู่ก้อนและสบู่เหลวในท้องตลาดโดยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรี. เรื่องประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 42: สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 499 หน้า.
- พัฒนศักดิ์ แดงบุตรดี, ขนิษฐา แก้วอิน, รวิรินทร์ สุทธะนันท์, โกวิท ปิยะมังกลา. (2557). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้เกล็ดรีงในคอลัมน์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 24, ฉบับที่ 2, 11 หน้า.
- ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). การเตรียมและการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้. ทุนอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- รัตนกร ยวงสวัสดิ์, สุรเชษฐ์ ปิโย, ณัฐพล เกษตรนิยม. (2564). การกำจัดโครเมียม (VI) โดยใช้ไคโตซานแบบเชื่อมขวางในคอลัมน์เบดนิ่ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร. สุวรรณภูมิ. ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, 12 หน้า.

- วิมลนันท์ พงศ์ภัทรกานต์, เทวรักษ์ ปานกลาง, รัศมี นนที. (2558). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือก
 กะลาแมคคาเดเมียเพื่อกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งในกลุ่มชุมชนฟอกย้อมผ้าฝ้าย จังหวัดเลย.
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย. 128 หน้า.
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2558). ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้โอสมวล
 เบบ้าเป็นตัวดูดซับ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระ
 นคร. 46 หน้า.
- ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์. (2563). การใช้ประโยชน์จากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมียเพื่อ
 นำไปเป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดฟีนอล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา
 วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 245 หน้า.
- สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2558). คาร์บอนกัมมันต์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิมพ์ครั้งที่ 1. 188
 หน้า.
- อลิสรา นิติวัดนะ. (2553). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคคาเดเมียโดยกระตุ้นทางกายภาพ.
 วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 128 หน้า.
- Abbott, T., Bicakci, G.K., Islam, M.S., Eskicioglu, C. (2020). A Review on the Fate of
 Legacy and Alternative Antimicrobials and Their Metabolites during
 Wastewater and Sludge Treatment. International Journal of Molecular
 Sciences. Vol. 21, No. 23: 9241.
- Abdulhafedh, A. (2021). Incorporating K-means, Hierarchical Clustering and PCA in
 Customer Segmentation. Journal of City and Development. Vol. 3, No. 1, pp.
 12-30.
- Abdus-Salam, N., Buhari, M. (2016). Adsorption of Alizarin and Fluorescein Dyes onto
 Palm Seeds Activated Carbon: Kinetic and Thermodynamic Studies. Journal
 of the Chemical Society of Pakistan. Vol. 38, No. 4, pp. 604-614.
- Ajao, C., Andersson, M.A., Teplova, V.V., Nagy, S., Gahmberg, C.G., Andersson, L.C.,
 Hautaniemi, M., Kakasi, B., Roivainen, M., Salonen M.S. (2015). Mitochondrial
 toxicity of triclosan on mammalian cells. Toxicology Reports. Vol. 2, pp. 624–
 637.
- Aljamali, N.M., Aldujaili, R.A.B., Alfatlawi, I.O. (2021). Physical and Chemical
 Adsorption and its Applications. International Journal of Thermodynamics
 and Chemical Kinetics. Vol. 7, No. 2, pp. 1-8.
- AL-Doury, M.M.I., Alwan, M.H. (2021). Phenol Removal from Synthetic Wastewater
 by Adsorption Column. IOP Conference Series: Materials Science and
 Engineering. Vol. 1058, No. 1: 012034.
- Anders, B., Doll, S., Spangenberg, B. (2021). A validated quantification of triclosan in
 toothpaste using high-performance thin-layer chromatography and a 48-

- bit flatbed scanner.** Journal of Planar Chromatography – Modern TLC. Vol. 34, pp. 203-209.
- Ayangunna, R.R., Giwa, S.O., Giwa, A. (2016). **Coagulation-Flocculation Treatment of Industrial Wastewater Using Tamarind Seed Powder.** International Journal of ChemTech Research. Vol. 9, No. 5, pp. 771-780.
- Aygun, A., Yilmaz, T. (2010). **Improvement of Coagulation-Flocculation Process for Treatment of Detergent Wastewaters Using Coagulant Aids.** International Journal of Chemical and Environmental Engineering. Vol. 1, No. 2, 5 pages.
- Bae, J.S., Su, S. (2013). **Macadamia nut shell derived carbon composites for post combustion CO₂ capture.** International Journal of Greenhouse Gas Control. Vol. 19, pp.174-182.
- Bagley, D.M., Lin, Y.J. (2000). **Clinical evidence for the lack of triclosan accumulation from daily use in dentifrices.** American Journal of Chemistry. Vol. 13, No. 3, pp. 148-52.
- Bakare, B.F., Adeyinka, G.C. (2022). **Occurrence and Fate of Triclosan and Triclocarban in Selected Wastewater Systems across Durban Metropolis, KwaZulu-Natal, South Africa.** International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol. 19, No. 11: 6769.
- Bedoux, G., Roig, B., Thomas, O., Dupont, V., Bot, B.L. (2012). **Occurrence and toxicity of antimicrobial triclosan and by-products in the environment.** Environmental Science and Pollution Research International. Vol. 14, No. 4, pp. 1044-1065.
- Buth, J.M., Grandbois, M., Vikesland, P.J., McNeill, K., Arnold, W.A. (2010). **Aquatic photochemistry of chlorinated triclosan derivatives: Potential source of polychlorodibenzo-*P*-dioxins.** Environmental Toxicology and Chemistry. Vol. 28, No. 12, pp. 2555–2563.
- Castillo, N.A.M., Fernández, L.A.G., Pérez, R.O., Ramos, R.L., Dotto, G.L., Ramírez, R.F., Frómeta, A.E.N., Flores, M.M.A., Marín, F.C., Mendoza, H.H., Contreras, S.A. (2022). **Removal of triclosan from water by adsorption on activated carbons and photodegradation.** Research Square.
- Charmas, B., Ziezio, M., Jedynek, K. (2023). **Assessment of the Porous Structure and Surface Chemistry of Activated Biocarbons Used for Methylene Blue Adsorption.** Molecules. Vol. 28, No. 13: 4922.
- Chen, X., Mou, L., Qu, J., Wu, L., Liu, C. (2023). **Adverse effects of triclosan exposure on health and potential molecular mechanisms.** Science of the Total Environment. Vol. 879: 163068.

- Dada, A.O., Olalekan, A.P., Olatunua, A., Dada, O.O. (2012). **Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn²⁺ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk.** Journal of Applied Chemistry. Vol. 3, No. 1, pp. 38-45.
- Dar, O.I., Aslam, R., Pan, D., Sharma, S., Andotra, M., Kaur, A., Jia, A., Faggio, C. (2022). **Source, bioaccumulation, degradability and toxicity of triclosan in aquatic environments: A review.** Environmental Technology & Innovation. Vol. 25: 102122.
- Dhillon, G.S., Kaur, S., Pu;icharla, R., Brar, S.K., Cledón, M., Surampalli, R.Y. (2015). **Triclosan Current Status, Occurrence, Environmental Risks and Bioaccumulation Potential.** International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol. 12, No. 5, pp. 5657-5684.
- Dias, D., Bernardo, M., Pinto, F., Fonseca, I., Lapa, N. (2022). **Cr(III) dynamic removal in a fixed-bed column by using a co-gasification char.** International Journal of Environmental Science and Technology. Vol. 19, pp. 8145–8158.
- Dix-Cooper, L., Kosatsky, T. (2019). **Use of antibacterial toothpaste is associated with higher urinary triclosan concentrations in Asian immigrant women living in Vancouver, Canada.** Science of The Total Environment. Vol. 671, pp. 897-904.
- Edokpayi, J.N., Alayande, S.O., Adetoro, A., Odiyo, J. (2020). **The Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamics Studies of the Sorption of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Pulverized Raw Macadamia Nut Shells.** Journal of Analytical Methods in Chemistry. pp. 1-10.
- Ehiomogbe, P., Ahuchaogu, I.I., Ahaneku, I.E. (2021). **REVIEW OF ADSORPTION ISOTHERMS MODELS.** ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering, Tome XIV.
- Environmental Protection Agency. (2008). **Reregistration Eligibility Decision (RED) Document for Triclosan.** 98 pages.
- Eskander, S., Saleh, H.E.-D. (2017). **Biodegradation: Process Mechanism.** In **Environmental Science and Engineering**, 1st ed.; Studium Press LLC: Houston, TX, USA.
- Fair, P.A., Lee, H., Adams, J., Darling, C., Pacepavicius, G., Alaei, M., Bossart, G.D., Henry, N., Muir, D. (2009). **Occurrence of triclosan in plasma of wild Atlantic bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) and in their environment.** Environmental Pollution. Vol. 157, pp. 2248-2254.

- Fan, F., Yang, Z., Li, H., Shi, Z., Kan, H. (2018). **Preparation and properties of hydrochars from macadamia nut shell via hydrothermal carbonization.** Royal Society Open Science. Vol. 5, No. 10: 181126.
- Fulazzaky, M.A., Salim, N.A.A., Khamidun, M.H., Puteh, M.H., Yusoff, A.R.M., Abdulah, N.H., Syafiuddin, A., Zaini, M.A.A. (2022). **The mechanisms and kinetics of phosphate adsorption onto iron-coated waste mussel shell observed from hydrodynamic column.** International Journal of Environmental Science and Technology. Vol. 19, pp. 6345–6358
- Futalan, C.M., Wan, M.W. (2022). **Fixed-Bed Adsorption of Lead from Aqueous Solution Using Chitosan-Coated Bentonite.** International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol. 19: 2597.
- Girish, C.R., Murty, V.R. (2015). **Adsorption of Phenol from Aqueous Solution Using *Lantana camara*, Forest Waste: Packed Bed Studies and Prediction of Breakthrough Curves.** Environmental Processes. Vol. 2, pp. 773–796.
- Gkika, D.A., Mitropoulos, A.C., Lambropoulou D.A., Kalavrouziotis, I.K., Kyzas, G.Z. (2022). **Cosmetic wastewater treatment technologies: a review.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 29, pp. 75223–75247.
- Guerra, P., Teslic, S., Shah, A., Albert, A. (2019). **Occurrence and removal of triclosan in Canadian wastewater systems.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 26, No. 1.
- Hadibarata, T., Al-Ghamdi, A.A., Salmiati, S., Salmiati, Z., Khori, N.M., Elshikh, M.S. (2018). **Triclosan removal by adsorption using activated carbon derived from wastebiomass: Isotherms and kinetic studies.** Chinese Chemical Society. Vol. 65, No. 2, pp. 1-9.
- Halden, R.U., Paul, D.H., (2005). **Co-occurrence of triclocarban and triclosan in US.** Environmental Science and Technology. Vol. 39, No. 6, pp. 1420-1426.
- Haydari, I., Lissaneddine, A., Aziz, K., Ouazzani, N., Mandi, L., El Ghadraoui, A., Aziz, F. (2022). **Optimization of preparation conditions of a novel low-cost natural bio-sorbent from olive pomace and column adsorption processes on the removal of phenolic compounds from olive oil mill wastewater.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 29: 80044-800611.
- Hay, A.G., Dees, P.M., Sayler, G.S. (2001). **Growth of a bacterial consortium on triclosan.** FEMS Microbiology Ecology. Vol. 36, pp. 105-112.
- Henry, N.D., Fair, P.A. (2013). **Comparison of in vitro cytotoxicity, estrogenicity and anti-estrogenicity of triclosan, perfluorooctane sulfonate and**

- perfluorooctanoic acid.** *Journal of Applied Toxicology*. Vol. 33, No. 4, pp. 265–272.
- Ho, Z.H., Adnan, L.A. (2021). **Phenol Removal from Aqueous Solution by Adsorption Technique Using Coconut Shell Activated Carbon.** *Tropical Aquatic and Soil Pollution*. Vol. 1, No. 2, pp. 98-107.
- Hussain, O.A., Hathout, A.S., Abdel-Mobdy, Y.E., Rahim, E.A.A., Fouzy, A.S.M. (2023). **Preparation and characterization of activated carbon from agricultural wastes and their ability to remove chlorpyrifos from water.** *Toxicology Reports*. Vol. 10, pp. 146-154.
- Hu, X., Cheng, Z., Sun, Z., Zhu, H. (2017). **Adsorption of Diclofenac and Triclosan in Aqueous Solution by Purified Multi-Walled Carbon Nanotubes.** *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 26, No. 1, pp. 87-95.
- Iheanacho, O.C, Nwabanne, J.T., Obi, C.C., Igwegbe, C.A., Onu, C.E., Dahlan, I. (2023). **Adsorptive Dephenolization of Aqueous Solutions Using Thermally Modified Corn Cob: Mechanisms, Point of Zero Charge, and Isosteric Heat Studies.** *Adsorption Science & Technology*. 14 pages.
- Jagiello, J., Thommes, M., Linares-Solano, A., Cazorla-Amorós, D., Lozano-Castelló, D. (2004). **Characterization of Carbon Micro and Ultramicropores Using Adsorption of Hydrogen and Other Simple Gases.** 5 pages.
- Jang, J., Lee, D. (2016). **Enhanced adsorption of cesium on PVA-alginate encapsulated Prussian blue-graphene oxide hydrogel beads in a fixed-bed column system.** *Bioresources Technology*. Vol. 218, pp. 294-300.
- Jayanto, G.D., Widyastuti, M., Hadi, M.P. (2021). **Laundry wastewater characteristics and their relationship with river water quality as an indicator of water pollution. Case study: Code Watershed, Yogyakarta.** *E3S Web of Conferences*. Vol. 325, 8 pages.
- Juela, D., Vera, M., Cruzat, C., Alvarez, X., Vanegas, E. (2021). **Mathematical modeling and numerical simulation of sulfamethoxazole adsorption onto sugarcane bagasse in a fixed-bed column.** *Chemosphere*. Vol. 280: 130687.
- Kaminska, G., Marzalek, A., Kudlek, E., Adamczak, M. (2022). **Innovative treatment of wastewater containing of triclosan – SBR followed by ultrafiltration/ adsorption/ advanced oxidation processes.** *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 50, No. 2: 103282.
- Kang, J., Seo, E., Lee, C., Moon, J., Park, S. (2023). **Effectivity and adsorption mechanism of food waste biochar for triclosan removal: a spectroscopic**

- and experimental approach.** *Biomass Conversion and Biorefinery*. Vol. 13, pp. 11067-11083.
- Karthika, M., Vasuki, M. (2021). **Comparative Study of Adsorption of Different Dyes from Aqueous Media Onto Physically Activated Carbon: Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Parameter.** *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 16, No. 6, pp. 441-446.
- Karunaratne, H., Amarasinghe, P. (2013). **Fixed Bed Adsorption Column Studies for the Removal of Aqueous Phenol from Activated Carbon Prepared from Sugarcane Bagasse.** *Energy Procedia*. Vol. 34, pp. 83-90.
- Kaur, I., Gaba, S., Kaur, S., Kumar, R., Chawla, J. (2018). **Spectrophotometric determination of triclosan based on diazotization reaction: response surface optimization using Box-Behnken design.** *Water Science and Technology*. Vol. 77, No. 9, pp. 2204–2212.
- Khader, E.H., Khudhur, R.H., Abbood, N.S. Albayati, T.M. (2023). **Decolourisation of Anionic Azo Dye in Industrial Wastewater Using Adsorption Process: Investigating Operating Parameters.** *Environmental Processes*. Vol. 10, No. 34.
- Khoriha, N., Khori, E.M., Salmiati, S., Hadibarata, T., Yusop, Z. (2020). **A Combination of Waste Biomass Activated Carbon and Nylon Nanofiber for Removal of Triclosan from Aqueous Solutions.** *Journal of Environmental Treatment Techniques*. Vol. 8, No. 3, pp. 1036-1045.
- Kumari, U., Behera, S.K., Meikap, B.C. (2019). **A novel acid modified alumina adsorbent with enhanced defluoridation property: kinetics, isotherm study and applicability on industrial wastewater.** *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 365, pp. 868-882.
- Kwon, J.T., Seo, G.B., Kim, H.M., Shim, I., Lee, B., Jung, J.Y., Kim, P., Choi, K. (2013). **Evaluation of comparative cytotoxicity of spray-type chemicals used in household products.** *Molecular and Cellular Toxicology*. Vol. 9, pp. 51–56.
- Lehutso, R.F., Daso, A.P., Okonkwo, J.O. (2017). **Occurrence and environmental levels of triclosan and triclocarban in selected wastewater treatment plants in Gauteng Province, South Africa.** *Emerging Contaminants*. Vol. 3, No. 3, pp. 107-114.
- Liu, G., Dai, Z., Liu, X., Dahlgren R.A., Xu, L. (2022). **Modification of agricultural wastes to improve sorption capacities for pollutant removal from water – a review.** *Carbon Research*. Vol. 1, No. 24.
- Li, L. (2021). **Toxicity evaluation and by-products identification of triclosan ozonation and chlorination.** *Chemosphere*. Vol. 263, 128223.

- Li, Q., Huang, L., Zhu, P., Zhong, M., Xu, S. (2023). **Rapid adsorption of triclosan and p-chloro-m-xyleneol by nitrogen-doped magnetic porous carbon.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 30, pp. 1640-1655.
- Li, X., Sun, N., Zhang, S., Soomro, R.A., Xu, B. (2024). **Closed pore structure engineering from ultra-micropores with the assistance of polypropylene for boosted sodium ion storage.** Journal of Materials Chemistry A. Vol. 12, pp. 12015-12025.
- Luo, Z., He, Y., Zhi, D., Luo, L., Sun, Y., Khan, E., Wang, L., Peng, Y., Zhou, Y., Tsang, D.C.W. (2019). **Current progress in treatment techniques of triclosan from wastewater: A review.** Science of the Total Environment. Vol. 696: 133990.
- Machedi, S., Ejidike, I.P., Mtunzi, F.M., Pakade, V.E., Klink, M.J. (2019). **Chlorinated Phenols Sorption Performance by Macadamia Activated Carbon and Grafted Macadamia Activated Carbon: Characterization, Kinetics, and Thermodynamic studies.** Oriental Journal of Chemistry. Vol. 35, No. 5, pp. 1469–1479.
- Márquez, P., Benítez, A., Hidalgo-Carrillo, J., Urbano, F.J., Caballero, Á., Siles, J.A., Martín, M.A. (2021). **Simple and eco-friendly thermal regeneration of granular activated carbon from the odour control system of a full-scale WWTP: Study of the process in oxidizing atmosphere.** Separation and Purification Technology. Vol. 255: 117782.
- Marzbali, M.H., Esmaili, M. (2019). **Fixed bed adsorption of tetracycline on a mesoporous activated carbon: Experimental study and neuro-fuzzy modeling.** Journal of Applied Research and Technology. Vol. 15, No. 5, pp. 454-463.
- Maynou, F., Costa, S., Freitas, R., Solé, M. (2021). **Effects of triclosan exposure on the energy budget of *Ruditapes philippinarum* and *R. decussatus* under climate change scenarios.** Science of the Total Environment. Vol. 777: 146068.
- McKay, G. (1981). **Design Models for Adsorption Systems in Wastewater Treatment.** Journal of Chemical Technology & Biotechnology. Vol. 31, pp. 717-731.
- Mesfer, M.K.A., Danish, M., Khan, M.I., Ali, I.H., Hasan, M., Jery, A.E. (2020). **Continuous Fixed Bed CO₂ Adsorption: Breakthrough, Column Efficiency, Mass Transfer Zone.** Processes. Vol. 8: 1233.
- Mhemeed, A.H. (2018). **A General Overview on the Adsorption.** Indian Journal of Natural Sciences. Vol. 9, No. 51.
- Mhlongo, S.A., Sibali, L.L., Ndibewu, P.P. (2023). **Occurrence, quantification and removal of triclosan in wastewater of Umbogintwini Industrial Complex in**

- KwaMakhutha, South Africa.** South African Journal of Science. Vol. 119, No. 11/12.
- Milanović, M., Đurić, L., Milošević, N., Milić, N. (2023). **Comprehensive insight into triclosan—from widespread occurrence to health outcomes.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 30, No. 10, pp. 25119–25140.
- Mojoudi, N., Mirghaffari, N., Soleimani, M., Shariatmadari, H., Belver, C., Bedia, J. (2019). **Phenol adsorption on high microporous activated carbons prepared from oily sludge: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies.** Scientific Reports. Vol 9: 19352.
- Morales, J.L., Perez, O.P., Velazquez, F.R., (2012). **Sorption of Triclosan onto Tyre Crumb Rubber.** Adsorption Science and Technology. Vol. 30, No. 10, pp. 831-846.
- Mubarak, M.F., Ahmed, A.M., Gabr, S.S. (2021). **Nanoporous Carbon Materials toward Phenolic Compounds Adsorption.** Nanoporous.
- Ndagijimana, P., Liu, X., Li, Z., Yu, G., Wang, Y. (2020). **The synthesis strategy to enhance the performance and cyclic utilization of granulated activated carbon-based sorbent for bisphenol A and triclosan removal.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 27, pp. 15758–15771.
- Noisak, J., Charoonsuk, T., Pongampai, S., Pinpru, N., Pakawanit, P., Vittayakorn, W., Maluangnont, T., Chiu, T., Vittayakorn, M. (2023). **Towards the preparation of organic ferroelectric composites: fabrication of a gamma-glycine-bacterial cellulose composite via cold sintering process.** Journal of Materials Research and Technology. Vol. 25, pp. 4749-4760.
- Olaniyan, L.W.B., Mkwetshana, N., Okoh, A.I. (2016). **Triclosan in water, implications for human and environmental health.** SpringerPlus. Vol. 5, No. 1639.
- Orhan, M. (2020). **Triclosan applications for biocidal functionalization of polyester and cotton surfaces.** Journal of Engineered Fibers and Fabrics. Vol. 15, pp. 1-11.
- Orhon, K.B., Orhon, A.K., Dilek, F.B., Yetis, U. (2017). **Triclosan removal from surface water by ozonation-Kinetics and by-products formation.** Journal of Environmental Management. Vol. 204, pp. 327-336.
- Patel, H. (2019). **Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review.** Applied Water Science. Vol. 9, No. 3, pp. 45.
- Phuekphong, A., Imwiset, K., Ogawa, M. (2020). **Organically Modified Bentonite as an Efficient and Reusable Adsorbent for Triclosan Removal from Water.** Langmuir. Vol. 36, No. 31, pp. 9025-9034.

- Piechocki, J., Wisniewski, D., Biatowiec, A. (2014). **Thermal gasification of waste biomass from agriculture production for energy purposed: In sustainable energy solutions in agriculture.** ROUTLEDGE in association with GSE Research. pp. 355-381.
- Plangklang, C., Sookkumnerd, T. (2023). **Modelling and feedforward control of pulsed bed adsorption column for colorant removal in sugar syrup.** Engineering Journal. Vol. 27, No. 1, pp. 29–38.
- Pongsak, S., Yimrattanabovorn, J. (2021). **Utilization of Activated Carbon from Macadamia Nut shell as Adsorbent for Phenol Removal.** The 30th TIChE Conference (TIChE2021). Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima. Thailand.
- Poós, T., Varju, E. (2020). **Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations.** International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 153: 119500.
- Procházková, M., Máša, V. (2022). **Sustainable Wastewater Management in Industrial Laundries.** CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Vol. 94. ISSN 2283-9216.
- Rodrigues, L., Thim, G., Mendez, M., Coutinho, A.R. (2013). **Activated carbon derived from macadamia nut shells: An effective adsorbent for phenol removal.** Journal of Porous Materials. Vol. 20, No. 4.
- Roh, H., Subramanya, N., Zhao, F.M., Yu, C.P., Sandt, J., Chu, K.H. (2009). **Biodegradation potential of wastewater micropollutants by ammonia-oxidizing bacteria.** Chemosphere. Vol. 77, No. 8, pp. 1084-1089.
- Rusdiana, N., Wibowo, M.S., Kartasasmita, R.E. (2021). **DETERMINATION OF TRICLOSAN IN INDONESIAN HOUSEHOLD, PERSONAL CARE, AND COSMETIC PRODUCTS BY ISOCRATIC REVERSED-PHASE HIGH PERFORMANCE LIQUID CHROMATOGRAPHY.** RASĀYAN Journal of Chemistry. Vol. 14, No. 2, pp. 1435-1440.
- Sahmoune, M.N. (2019). **Evaluation of thermodynamic parameters for adsorption of heavy metals by green adsorbents.** Environmental Chemistry Letters. Vol. 17, No. 4, pp. 697–704.
- Sarna-Boś, K., Skic, K., Sobieszczánski, J., Boguta, P., Chałas, R. (2021). **Contemporary Approach to the Porosity of Dental Materials and Methods of Its Measurement.** International Journal of Molecular Sciences. Vol. 22, No. 16: 8903.
- Sazali, N., Harun, Z., Sazali, N. (2020). **A Review on Batch and Column Adsorption of Various Adsorbent Towards the Removal of Heavy Metal.** Journal of

- Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. Vol. 67, No. 2, pp. 66-88.
- Scientific Committee on Consumer Safety (SCSS). (2010). **Opinion on triclosan (Antimicrobial Resistance)**. European Commission. 56 pages.
- Shahawy, A.E., Mubarak, M.F., Shafi, M.E., Abdulla, H.M. (2022). **Fe(III) and Cr(VI) ions' removal using AgNPs/GO/ chitosan nanocomposite as an adsorbent for wastewater treatment**. RSC Advances. Vol. 12, No. 27: 17065.
- Simiyu, L.N., Nthiga, E.W., Tanui, P., Muthakia, G.K. (2023). **Kinetic modelling of p-Nitrophenol ions adsorption onto activated and activated carbon from macadamia nutshells in a model solution**. International Journal of Scientific Research in Chemical Sciences. Vol. 10, No. 4, pp. 17-23.
- Sinicropi, M.S., Iacopetta, D., Ceramella, J., Catalano, A., Mariconda, A., Pellegrino, M., Saturnino, C., Longo, P., Aquaro, S. (2022). **Triclosan: A Small Molecule with Controversial Roles**. Antibiotics. Vol. 11, No. 6: 735.
- Sonia, A.G., Guadalupe, M.M., Sonia, M.G., Eduardo, O.R., Jessica, L.C., Enrique, A.M. (2020). **Removal of triclosan by CTAB-modified zeolite-rich tuff from aqueous solutions**. MRS Advanced. Vol. 5, 3257-3264.
- Sookkumnerd, T. (2019). **Numerical Modeling of Industrial-Scale Pulsed Bed Adsorber for Colorant Removal in Sugar Refining**. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 559: 012019.
- Subair, A., Lakshmi, P.K., Chellappan, S., Chinghakhham, C. (2024). **Removal of polystyrene microplastics using biochar-based continuous flow fixed-bed column**. Environmental Science and Pollution Research. Vol. 31, pp. 13753–13765.
- Sultana, M., Rownok, M.H., Sabrin, M., Rahaman, M.H., Alam, S.M.N. (2022). **A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption**. Cleaner Engineering and Technology. Vol. 6: 100382.
- Sun, K., Li, S., Waigi, M.G., Huang, Q. (2018). **Nano-MnO₂-mediated transformation of triclosan with humic molecules present: kinetics, products, and pathways**. Environmental Science and Pollution Research. Vol. 25, pp. 14416–
- Triwiswara, M., Lee, C., Moon, J., Park, S. (2020). **Adsorption of triclosan from aqueous solution onto char derived from palm kernel shell**. Desalination and Water Treatment. Vol. 177. pp. 71-79.
- U.S. Food and Drug Administration. (2008). **Nomination Profile Triclosan [CAS 3380-34-5]**. National Toxicology Program. 25 pages.

- Vega, L.P., Soltan, J., Peñuela, G.A. (2019). **Sonochemical degradation of triclosan in water in a multifrequency reactor.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 26, pp. 4450–4461.
- Verlicchi, P., Zambello, E. (2015). **Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil—A critical review.** Science of The Total Environment. Vol. 538, pp. 750–767.
- Verma, L., Singh, J. (2023). **Removal of As(III) and As(V) from aqueous solution using engineered biochar: batch and fixed-bed column study.** International Journal of Environmental Science and Technology. Vol. 20, pp. 1961–1980.
- Vidovix, T.B., Januário, E.F.D., Araújo, M.F., Bergamasco, R., Vieira, A.M.S. (2019). **Bisfenol A adsorption using a low-cost adsorbent prepared from residues of babassu coconut peels.** Environmental Technology. Vol. 42, No. 15, pp. 2372–2384.
- Vidovix, T.B., Januário, E.F.D., Araújo, M.F., Bergamasco, R., Vieira, A.M.S. (2022). **Investigation of two new low-cost adsorbents functionalized with magnetic nanoparticles for the efficient removal of triclosan and a synthetic mixture.** Environmental Science and Pollution Research. Vol. 29, pp. 46813–46829.
- Virginia, H.M., Adrián, B.P. (2012). **Lignocellulosic Precursors used in the Synthesis of Activated Carbon: Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment.** Mass Transfer - Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling. InTech. 102 pages.
- Wang, L., Shi, C., Wang, L., Pan, L., Zhang, X., Zou, J. (2020). **Rational design, synthesis, adsorption principles and applications of metal oxide adsorbents: a review.** Nanoscale. Vol. 12, pp. 4790–4815.
- Wang, S., Poon, K., Cai, Z. (2013). **Removal and reductive dechlorination of triclosan by *Chlorella pyrenoidosa*.** Chemosphere. Vol. 92, No. 11, pp. 1498–1505.
- Watiniasih, N.L., Purnama, I.G.H., Padmanabha, G., Merdana, I.M., Antara, I.N.G. (2019). **Managing laundry wastewater.** IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 248: 012084.
- Weatherly, L.M., Shim, J., Hashmi, H.N., Kennedy, R.H., Hess, S.T., Gosse, J.A. (2016). **Antimicrobial agent triclosan is a proton ionophore uncoupler of mitochondria in living rat and human mast cells and in primary human keratinocytes.** Journal of Applied Toxicology. Vol. 36, No. 6, pp. 777–789.

- Wei, C., Huang, Y., Liao, Q., Xia, A., Zhu, X., Zhu, X. (2019). **Adsorption thermodynamic characteristics of *Chlorella vulgaris* with organic polymer adsorbent cationic starch: Effect of temperature on adsorption capacity and rate.** *Bioresource Technology*. Vol. 293: 122056.
- Winitthana, T., Lawanprasert, S., Chanvorachote, P. (2014). **Triclosan potentiates epithelial-to-mesenchymal transition in anoikis-resistant human lung cancer cells.** *PLoS One*. Vol. 9 No. 10: 110851.
- Wongcharee, S., Aravinthan, V., Erdei, L., Sanongraj, W. (2018). **Mesoporous activated carbon prepared from macadamia nut shell waste by carbon dioxide activation: Comparative characterisation and study of methylene blue removal from aqueous solution.** *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. Vol. 13, No. 2.
- Wyllie, G.R.A. (2015). **Spectroscopic Determination of Triclosan Concentration in a Series of Antibacterial Soaps: A First-Year Undergraduate Laboratory Experiment.** *Journal of Chemical Education*. Vol. 92, No. 1, pp. 153-156.
- Xie, B., Qin, J., Wang, S., Li, X., Sun, H., Chen, W. (2019). **Adsorption of Phenol on Commercial Activated Carbons: Modelling and Interpretation.** *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol. 17, No. 789.
- Xie, N., Wang, H., You, C. (2024). **Enhanced adsorption of Pb²⁺ by the oxygen-containing functional groups enriched activated carbon.** *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 31, pp. 31028–31041.
- Yang, Y., Ding, J., Zhu, X., Tian, Z., Zhu, S. (2023). **Triclosan to Improve the Antimicrobial Performance of Universal Adhesives.** *Polymers*. Vol. 15, No. 2.
- Ying, G.G., Kookana, R.S. (2007). **Triclosan in wastewaters and biosolids from Australian wastewater treatment plants.** *Environment International*. Vol. 33, No. 2, pp. 199-205.
- Yokoyama, J.T.C., Cazetta, A.L., Bedin, K.C., Spessato, L., Fonseca, J.M., Carraro, P.S., Ronix, A., Silva, M.C., Silva, T.L., Almeida, V.C. (2019). **Stevia residue as new precursor of CO₂-activated carbon: Optimization of preparation condition and adsorption study of triclosan.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 173, pp. 403-410.
- Yurduşen, A., Yürüm, A., Yürüm, Y. (2020). **The role of ultramicropores in the CO₂ adsorption capacity of Fe-BTC crystallites synthesized with a perturbation-assisted nanofusion synthesis strategy.** *CrystEngComm*. Vol. 22, pp. 932-944.

- Zdravkov, B.D., Čermák, J.J., Šefara, M. Janku, J. (2007). **Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective.** Central European Journal of Chemistry. Vol. 5, No. 2, pp. 385–395.
- Zhang, X., Song, K, Junfeng, L., Zhang, Z., Wang, C., Li, H. (2019). **Sorption of triclosan by carbon nanotubes in dispersion: The importance of dispersing properties using different surfactants.** Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol. 562, pp. 280-288.
- Zhang, Y., Zhang, S., Xu, S., Cao, F., Ren, X., Sun, Q., Yang, L., Wennersten, R., Mei, N. (2024). **Simulation of the VOC Adsorption Mechanism on Activated Carbon Surface by Nitrogen-Containing Functional Groups.** Applied Sciences. Vol. 14 No. 5: 1793.





ภาคผนวก ก
รายละเอียดการคำนวณ
การดูดซับแบบแบตช์

ก.1 การคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS , kJ/mol-K) ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH , kJ/mol) และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG , kJ/mol)

คำนวณหาค่า ΔS และค่า ΔH โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้สมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $y = -1164.9x + 5.0807$

จากสมการ
$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}$$

1) คำนวณหาค่า ΔS ได้จากจุดตัดแกน y :

$$\Delta S = 5.0807 \times 8.314$$

$$\Delta S = +42.24 \text{ J/mol-K}$$

$$\Delta S = +0.04 \text{ kJ/mol-K}$$

2) คำนวณหาค่า ΔH ได้จากความชัน

$$\Delta H = -(-1164.9) \times 8.314$$

$$\Delta H = +9,684.98 \text{ J/mol}$$

$$\Delta H = +9.68 \text{ kJ/mol}$$

จากสมการ
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

3) คำนวณหาค่า ΔG ได้จากสมการ $\Delta G = 9.68 - (T \times 0.04)$

เมื่อ $T = 298$: $\Delta G = 9.68 - (298 \times 0.04) = -2.24 \text{ kJ/mol}$

เมื่อ $T = 303$: $\Delta G = 9.68 - (303 \times 0.04) = -2.44 \text{ kJ/mol}$

เมื่อ $T = 308$: $\Delta G = 9.68 - (308 \times 0.04) = -2.64 \text{ kJ/mol}$

เมื่อ $T = 313$: $\Delta G = 9.68 - (313 \times 0.04) = -2.84 \text{ kJ/mol}$

เมื่อ $T = 318$: $\Delta G = 9.68 - (318 \times 0.04) = -3.04 \text{ kJ/mol}$

ดังนั้น เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) เท่ากับ $+0.04 \text{ kJ/mol-K}$ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH) เท่ากับ $+9.68 \text{ kJ/mol}$ และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG) มีค่าอยู่ในช่วง -2.24 ถึง -3.04 kJ/mol

ก.2 การคำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การคำนวณอัตราเร็วปฏิกิริยาในการเข้าสู่สมดุลสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยพิจารณาจากสมการจลนพลศาสตร์ 2 สมการ ได้แก่ สมการการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และ สมการการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-secondary order)

1) สมการการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)

คำนวณหาค่าคงที่ k_1 (min^{-1}) และค่า q_e (mg/g) โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้สมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $y = -0.0075x + 4.9245$ และค่า $R^2 = 0.9122$

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

จะได้ค่า k_1 จากความชัน: $k_1 = 0.0075 \times 2.303 = 0.0173 \text{ min}^{-1}$

จะได้ค่า q_e จากจุดตัดแกน y : $q_e = 137.62 \text{ mg/g}$

2) สมการการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-secondary order)

คำนวณหาค่าคงที่ k_2 (g/mg-min) และค่า q_e (mg/g) โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t จะได้สมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $y = 0.0162x + 4.9123$ และค่า $R^2 = 0.9569$

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

จะได้ค่า q_e จากความชัน: $q_e = 1/0.0162 = 61.73 \text{ mg/g}$

จะได้ค่า k_2 จากจุดตัดแกน y : $k_2 = 1/(4.9123 \times 61.73) = 0.00005 \text{ g/mg-min}$

ดังนั้น จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับอันดับสองเทียม ($R^2 = 0.9569$) ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม ($R^2=0.9122$) โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเท่ากับ 0.00005 g/mg-min และมีค่า q_e เท่ากับ 61.73 mg/g

ก.3 การคำนวณความสามารถในการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การคำนวณความสามารถในการดูดซับสำหรับการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC โดยพิจารณาจากไอโซเทอร์มการดูดซับ 2 สมการ ได้แก่ สมการของแลงมัวร์ (Langmuir isotherm) และสมการของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

1) สมการของแลงมัวร์ (Langmuir isotherm)

สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้สมการเส้นตรง คำนวณหาค่าคงที่ K_L (mg/g), q_m (mg/g) และ R_L ได้จากจุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ

จากสมการ
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m k_L}$$

- ค่าพีเอช 2 อุณหภูมิห้อง ได้สมการเส้นตรง $y = 0.0338x + 0.0098$ ($R^2 = 0.9551$)

จะได้ค่า q_m จากจุดตัดแกน y: $q_m = 1/0.0098 = 102.04$ mg/g

จะได้ค่า k_L จากความชัน: $k_L = 1/(102.04 \times 0.0338) = 0.29$ mg/g

จะได้ค่า R_L จากการคำนวณ: $R_L = 1/[1+(k_L C_0)] = 1/[1 + (0.29 \times 50.99)] = 0.063$

- ค่าพีเอช 2 อุณหภูมิ 45 °C ได้สมการเส้นตรง $y = 0.0084x + 0.0086$ ($R^2 = 0.9245$)

จะได้ค่า q_m จากจุดตัดแกน y: $q_m = 1/0.0086 = 116.28$ mg/g

จะได้ค่า k_L จากความชัน: $k_L = 1/(116.28 \times 0.0084) = 1.02$ mg/g

จะได้ค่า R_L จากการคำนวณ: $R_L = 1/[1+(k_L C_0)] = 1/[1 + (1.02 \times 50.99)] = 0.019$

- ค่าพีเอช 10.5±0.2 อุณหภูมิห้อง ได้สมการเส้นตรง $y = 0.1646x + 0.0110$ ($R^2 = 0.9948$)

จะได้ค่า q_m จากจุดตัดแกน y: $q_m = 1/0.0110 = 90.91$ mg/g

จะได้ค่า k_L จากความชัน: $k_L = 1/(90.91 \times 0.1646) = 0.07$ mg/g

จะได้ค่า R_L จากการคำนวณ: $R_L = 1/[1+(k_L C_0)] = 1/[1 + (0.07 \times 50.99)] = 0.219$

- ค่าพีเอช 10.5±0.2 อุณหภูมิ 45 °C ได้สมการเส้นตรง $y = 0.0810x + 0.0102$ ($R^2 = 0.9846$)

จะได้ค่า q_m จากจุดตัดแกน y: $q_m = 1/0.0102 = 98.04$ mg/g

จะได้ค่า k_L จากความชัน: $k_L = 1/(98.04 \times 0.0810) = 0.13$ mg/g

จะได้ค่า R_L จากการคำนวณ: $R_L = 1/[1+(k_L C_0)] = 1/[1 + (0.13 \times 50.99)] = 0.131$

2) สมการของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $\ln C_e$ จะได้สมการเส้นตรง คำนวณหาค่าคงที่ n และ K_F $((\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n})$ ได้จากจุดตัดแกน y และความชัน ตามลำดับ

จากสมการ
$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln C_e$$

- ค่าพีเอช 2 อุณหภูมิห้อง ได้สมการเส้นตรง $y = 0.6192x + 1.3554$ ($R^2 = 0.9713$)

จะได้ค่า n จากความชัน: $n = 1/0.6192 = 1.61$

จะได้ค่า k_F จากจุดตัดแกน y : $k_F = 10^{1.3554} = 22.67 (\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$

- ค่าพีเอช 2 อุณหภูมิ 45 °C ได้สมการเส้นตรง $y = 0.3576x + 1.7682$ ($R^2 = 0.9582$)

จะได้ค่า n จากความชัน: $n = 1/0.3576 = 2.80$

จะได้ค่า k_F จากจุดตัดแกน y : $k_F = 10^{1.7682} = 58.64 (\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$

- ค่าพีเอช 10.5±0.2 อุณหภูมิห้อง ได้สมการเส้นตรง $y = 0.7295x + 0.8403$ ($R^2 = 0.9809$)

จะได้ค่า n จากความชัน: $n = 1/0.7295 = 1.37$

จะได้ค่า k_F จากจุดตัดแกน y : $k_F = 10^{0.8403} = 6.92 (\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$

- ค่าพีเอช 10.5±0.2 อุณหภูมิ 45 °C ได้สมการเส้นตรง $y = 0.6291x + 1.1189$ ($R^2 = 0.9848$)

จะได้ค่า n จากความชัน: $n = 1/0.6291 = 1.59$

จะได้ค่า k_F จากจุดตัดแกน y : $k_F = 10^{1.1189} = 13.15 (\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$



ภาคผนวก ข
รายละเอียดการคำนวณ
การตูดซับแบบคอลัมน์

ข.1 การคำนวณปริมาณถ่าน MAC สำหรับการดูดซับแบบคอลัมน์

การศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบชุดทดลองแบบคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร และมีความหนาแน่นของถ่าน MAC เท่ากับ 0.447 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถคำนวณปริมาณถ่าน MAC ที่บรรจุในคอลัมน์มีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (Area)} &= \pi d^2/4 \\ &= (3.142 \times 2^2)/4 \\ &= 3.142 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรคอลัมน์ทั้งหมด (Volume)} &= \text{พื้นที่หน้าตัด} \times \text{ความสูง} \\ &= 3.142 \times 10 \\ &= 31.42 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์} &= \text{ความหนาแน่นของถ่าน MAC} \times \text{ปริมาตรคอลัมน์ทั้งหมด} \\ &= 0.447 \times 31.42 \\ &= 14.04 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์มีน้ำหนักเท่ากับ 14.04 กรัม

ข.2 การคำนวณอัตราการไหลที่ใช้ศึกษาในการดูดซับแบบคอลัมน์

- ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับของ Langmuir isotherm ที่สภาวะ pH เท่ากับ 10.5 ± 0.2 และที่อุณหภูมิห้อง มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 90.91 mg/g
- ระยะเวลาที่เหมาะสม (HRT) เท่ากับ 780 นาที
- ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 20 mg/L
- น้ำหนักถ่าน MAC ที่ใช้ในคอลัมน์ (W) เท่ากับ 14.04 g

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (} q_{\text{total}} \text{)} &= q_m \times W \\ &= (90.91 \text{ mg/g}) \times 14.04 \text{ g} \\ &= 1,276.3764 \text{ mg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (} V \text{)} &= (q_{\text{total}} / C_0) \times 1000 \text{ mL} \\ &= [(1,276.3764 \text{ mg}) / (20 \text{ mg/L})] \times 1,000 \text{ mL} \\ &= 63,818.82 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหล (} Q \text{)} &= V / \text{HRT} \\ &= (63,818.82 \text{ mL}) / 780 \text{ min} \\ &= 81.82 \text{ mL/min} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของสารละลายไตรโคลซานที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์เท่ากับ 81.82 mL/min แต่การดูดซับแบบคอลัมน์สามารถเกิดการดูดซับได้เพียงร้อยละ 10 ของการดูดซับสูงสุดที่ได้จากแบบแบตช์ จึงเลือกใช้อัตราการไหลเท่ากับ 8 mL/min และทำการศึกษาที่สภาวะอัตราการไหลเท่ากับ 6 และ 10 mL/min เพิ่มเติม

ข.3 การทำนายเส้นโค้งการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

การคำนวณค่าคงที่ Breakthrough curve ของการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ในการดูดซับแบบ Fixed bed column เพื่อทำนาย Breakthrough curve ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของโทมัส (Thomas model) และแบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model) ที่สภาวะอัตราการไหล 10 ml/min ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 mg/L และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 cm

1) แบบจำลองของโทมัส (Thomas model)

คำนวณหาค่าคงที่ K_{TH} (mL/mg-min) และค่าคงที่ q_{TH} (mg/g) โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln((C_t/C_0)-1)$ กับ t จะได้สมการเส้นตรง $y = -0.00258x + 2.4360$

$$\text{จากสมการ} \quad \ln \left[\frac{C_0}{C_t} - 1 \right] = \left[\frac{K_{TH} q_{TH} M}{Q} \right] - K_{TH} C_0 t$$

จะได้ค่า K_{TH} จากความชัน: $K_{TH} = (0.00258/60) \times 1,000 = 0.043 \text{ mL/mg-min}$

จะได้ค่า q_{TH} จากจุดตัดแกน y : $q_{TH} = (2.4360 \times 10) / (0.043 \times 14.04) = 40.35 \text{ mg/g}$

2) แบบจำลองของยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson model)

คำนวณหาค่าคงที่ K_{YN} (min^{-1}) และ τ (min) โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_t/(C_0-C_t))$ กับ t จะได้สมการเส้นตรง $y = -0.0025x + 2.3717$

$$\text{จากสมการ} \quad \ln \left[\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right] = K_{YN} t - \frac{\tau}{2} K_{YN}$$

จะได้ค่า K_{TH} จากความชัน: $K_{TH} = -0.00258 \text{ min}^{-1}$

จะได้ค่า τ จากจุดตัดแกน y : $\tau = (-2.3717) / (-0.0025) = 948.68 \text{ min}$

ข.4 การคำนวณการกำจัดสารไตรโคลซานในคอลัมน์ในงานวิจัยนี้ (Lab scale)

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ออกแบบให้คอลัมน์มีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 50 ($C_t/C_0 = 0.5$) ส่งผลทำให้สารไตรโคลซานถูกดูดซับ 30 mg/g ($C_0 - C_t = 60 - 30 = 30$ mg/g)

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}}, \text{ mg)} = [Q \times (C_0 - C_t) \times t_{\text{total}}] / 1,000$$

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}}, \text{ mg)} = [Q \times C_t \times t_{\text{total}}] / 1,000$$

1) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ เริ่มเดินระบบ

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}}) = (10 \times 30 \times 870) / 1,000 = 261 \text{ mg}$$

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}}) = (10 \times 60 \times 870) / 1,000 = 522 \text{ mg}$$

2) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ หลังการซั๊กกลับถ่าน MAC ครั้งที่ 1

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}}) = (10 \times 30 \times 2,160) / 1,000 = 648 \text{ mg}$$

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}}) = (10 \times 60 \times 2,160) / 1,000 = 1,296 \text{ mg}$$

3) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ หลังการซั๊กกลับถ่าน MAC ครั้งที่ 2

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}}) = (10 \times 30 \times 3,540) / 1,000 = 1,062 \text{ mg}$$

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}}) = (10 \times 60 \times 3,540) / 1,000 = 2,124 \text{ mg}$$

4) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ หลังการซั๊กกลับถ่าน MAC ครั้งที่ 3

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}}) = (10 \times 30 \times 5,280) / 1,000 = 1,584 \text{ mg}$$

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}}) = (10 \times 60 \times 5,280) / 1,000 = 3,168 \text{ mg}$$

ข.5 การคำนวณการกำจัดสารไตรโคลซานสำหรับประยุกต์ใช้ในการ Scaling-up (Pilot scale)

ออกแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการ Scaling-up โดยออกแบบให้มีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 95 ($C_t/C_0 = 0.05$) ส่งผลทำให้สารไตรโคลซานถูกดูดซับ 57 mg/g ($C_0 - C_t = 60 - 3 = 57$ mg/g)

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}} \text{, mg)} = [Q \times (C_0 - C_t) \times t_{\text{total}}] / 1,000$$

$$\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}} \text{, mg)} = [Q \times C_t \times t_{\text{total}}] / 1,000$$

1) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ เริ่มต้นระบบ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}} \text{)} &= (1,465,000 \times 57 \times 128.60) / 1,000 \\ &= 10,738,743 \text{ mg} \\ &= 10.7 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}} \text{)} &= (1,465,000 \times 60 \times 128.60) / 1,000 \\ &= 11,303,940 \text{ mg} \\ &= 11.3 \text{ kg} \end{aligned}$$

2) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ หลังการชักกลับถ่าน MAC ครั้งที่ 1

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}} \text{)} &= (1,465,000 \times 57 \times 205.76) / 1,000 \\ &= 17,181,988.8 \text{ mg} \\ &= 17.2 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}} \text{)} &= (1,465,000 \times 60 \times 205.76) / 1,000 \\ &= 18,086,304 \text{ mg} \\ &= 18.1 \text{ kg} \end{aligned}$$

3) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ หลังการชักกลับถ่าน MAC ครั้งที่ 2

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q}_{\text{total}} \text{)} &= (1,465,000 \times 57 \times 282.92) / 1,000 \\ &= 23,625,234.6 \text{ mg} \\ &= 23.6 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m}_{\text{total}} \text{)} &= (1,465,000 \times 60 \times 282.92) / 1,000 \\ &= 24,868,668 \text{ mg} \\ &= 24.9 \text{ kg} \end{aligned}$$

4) การกำจัดสารไตรโคลซาน @ หลังการซักกลับถ่าน MAC ครั้งที่ 3

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่ถูกดูดซับ (q_{\text{total}})} &= (1,465,000 \times 57 \times 306.08)/1,000 \\ &= 25,559,210.4 \text{ mg} \\ &= 25 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณสารไตรโคลซานที่เข้าสู่คอลัมน์ทั้งหมด (m_{\text{total}})} &= (1,465,000 \times 60 \times 306.08)/1,000 \\ &= 26,904,432 \text{ mg} \\ &= 26.9 \text{ kg}\end{aligned}$$





ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการศึกษา

ไอโซเทอร์มการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC

ตารางที่ ค.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ที่ค่าพีเอช 2 และอุณหภูมิห้อง

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0 , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C_e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g) |
|--|--|--|
| 3.93 | 0.33 | 8.41 |
| 8.53 | 0.78 | 17.94 |
| 11.86 | 0.99 | 26.29 |
| 17.63 | 2.19 | 34.72 |
| 20.66 | 2.82 | 39.36 |
| 23.99 | 3.45 | 49.69 |
| 25.98 | 4.02 | 54.43 |
| 29.19 | 4.89 | 61.19 |
| 31.77 | 5.98 | 65.88 |
| 34.08 | 6.31 | 73.47 |
| 37.66 | 7.69 | 81.26 |
| 39.97 | 8.62 | 86.86 |
| 44.80 | 10.30 | 91.17 |
| 50.99 | 11.14 | 98.79 |

ตารางที่ ค.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ที่ค่าพีเอช 2 และอุณหภูมิห้อง


| ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0 , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C_e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g) |
|--|--|--|
| 3.93 | 0.00 | 9.02 |
| 8.53 | 0.00 | 19.48 |
| 11.86 | 0.00 | 28.27 |
| 17.63 | 0.03 | 38.99 |
| 20.66 | 0.42 | 44.24 |
| 23.99 | 0.81 | 54.91 |
| 25.98 | 1.11 | 60.06 |
| 29.19 | 1.77 | 67.47 |
| 31.77 | 2.43 | 73.03 |
| 34.08 | 2.67 | 80.72 |
| 37.66 | 2.88 | 90.87 |
| 39.97 | 3.06 | 98.32 |
| 44.80 | 4.71 | 102.50 |
| 50.99 | 5.86 | 109.30 |

ตารางที่ ค.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ที่ค่าพีเอช 10.5 ± 0.2 และ อุณหภูมิห้อง

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0 , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C_e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g) |
|--|--|--|
| 4.5 | 1.59 | 5.87 |
| 9.8 | 2.73 | 14.00 |
| 14.2 | 4.26 | 19.78 |
| 19.6 | 5.89 | 27.37 |
| 22.6 | 6.91 | 31.20 |
| 28.3 | 10.18 | 36.12 |
| 31.3 | 12.10 | 38.30 |
| 35.7 | 13.81 | 43.51 |
| 38.9 | 16.43 | 45.05 |
| 43.2 | 18.26 | 49.54 |
| 48.3 | 19.73 | 56.89 |
| 52.2 | 20.54 | 63.11 |
| 56.1 | 21.65 | 68.55 |
| 60.8 | 22.91 | 75.36 |

ตารางที่ ค.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC ที่ค่าพีเอช 10.5 ± 0.2 และอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

| ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0 , mg/L) | ความเข้มข้นที่เหลือ (C_e , mg/L) | ความสามารถในการดูดซับ (q_e , mg/g) |
|--|--|--|
| 4.5 | 1.26 | 6.53 |
| 9.8 | 1.65 | 16.18 |
| 14.2 | 2.25 | 23.78 |
| 19.6 | 3.81 | 31.46 |
| 22.6 | 4.62 | 35.92 |
| 28.3 | 6.49 | 43.59 |
| 31.3 | 7.60 | 47.15 |
| 35.7 | 9.46 | 52.17 |
| 38.9 | 10.57 | 56.47 |
| 43.2 | 11.95 | 62.09 |
| 48.3 | 12.70 | 70.88 |
| 52.2 | 13.36 | 77.49 |
| 56.1 | 14.02 | 83.83 |
| 60.8 | 14.77 | 91.65 |



ภาคผนวก ง
ข้อมูลผลการศึกษา
การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบ Fixed bed column

ง.1 การดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 20.06 | 0.16 | 30 | 180 | 0.008 |
| 20.06 | 0.26 | 60 | 180 | 0.013 |
| 20.06 | 0.32 | 90 | 180 | 0.016 |
| 20.06 | 0.51 | 120 | 180 | 0.025 |
| 20.06 | 0.66 | 150 | 180 | 0.033 |
| 20.06 | 0.96 | 180 | 180 | 0.048 |
| 20.06 | 1.09 | 210 | 180 | 0.054 |
| 20.06 | 1.46 | 240 | 180 | 0.073 |
| 20.06 | 1.88 | 300 | 360 | 0.094 |
| 20.06 | 2.15 | 390 | 540 | 0.107 |
| 20.06 | 2.34 | 450 | 360 | 0.117 |
| 20.06 | 2.58 | 510 | 360 | 0.129 |
| 20.06 | 2.66 | 630 | 720 | 0.133 |
| 20.06 | 3.04 | 750 | 720 | 0.152 |
| 20.06 | 3.37 | 870 | 720 | 0.168 |
| 20.06 | 3.82 | 990 | 720 | 0.190 |
| 20.06 | 4.00 | 1170 | 1080 | 0.199 |
| 20.06 | 4.79 | 1410 | 1440 | 0.239 |
| 20.06 | 5.44 | 1590 | 1080 | 0.271 |
| 20.06 | 5.91 | 1710 | 720 | 0.295 |
| 20.06 | 6.34 | 1770 | 360 | 0.316 |
| 20.06 | 6.88 | 1950 | 1080 | 0.343 |
| 20.06 | 7.58 | 2070 | 720 | 0.378 |
| 20.06 | 8.54 | 2310 | 1440 | 0.426 |
| 20.06 | 8.98 | 2430 | 720 | 0.448 |
| 20.06 | 9.46 | 2670 | 1440 | 0.471 |

ตารางที่ ง.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 20.06 | 10.26 | 2910 | 1440 | 0.511 |
| 20.06 | 10.74 | 3090 | 1080 | 0.535 |
| 20.06 | 11.52 | 3210 | 720 | 0.574 |
| 20.06 | 12.34 | 3330 | 720 | 0.615 |
| 20.06 | 12.71 | 3450 | 720 | 0.633 |
| 20.06 | 13.39 | 3570 | 720 | 0.667 |
| 20.06 | 14.42 | 3690 | 720 | 0.719 |
| 20.06 | 15.58 | 3810 | 720 | 0.777 |
| 20.06 | 16.32 | 3990 | 1080 | 0.813 |
| 20.06 | 16.83 | 4110 | 720 | 0.839 |
| 20.06 | 17.69 | 4230 | 720 | 0.882 |
| 20.06 | 18.25 | 4350 | 720 | 0.910 |
| 20.06 | 18.86 | 4470 | 720 | 0.940 |
| 20.06 | 19.08 | 4590 | 720 | 0.951 |

ง.2 การดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 20.16 | 0.44 | 30 | 240 | 0.022 |
| 20.16 | 0.63 | 60 | 240 | 0.031 |
| 20.16 | 0.85 | 90 | 240 | 0.042 |
| 20.16 | 0.93 | 120 | 240 | 0.046 |
| 20.16 | 1.13 | 150 | 240 | 0.056 |
| 20.16 | 1.54 | 180 | 240 | 0.076 |
| 20.16 | 1.88 | 210 | 240 | 0.093 |
| 20.16 | 2.21 | 270 | 480 | 0.110 |
| 20.16 | 2.63 | 330 | 480 | 0.130 |
| 20.16 | 3.05 | 390 | 480 | 0.151 |
| 20.16 | 3.39 | 450 | 480 | 0.168 |
| 20.16 | 4.16 | 570 | 960 | 0.206 |
| 20.16 | 4.47 | 690 | 960 | 0.222 |
| 20.16 | 4.93 | 810 | 960 | 0.245 |
| 20.16 | 5.34 | 930 | 960 | 0.265 |
| 20.16 | 5.75 | 1050 | 960 | 0.285 |
| 20.16 | 6.23 | 1170 | 960 | 0.309 |
| 20.16 | 6.70 | 1290 | 960 | 0.332 |
| 20.16 | 7.02 | 1410 | 960 | 0.348 |
| 20.16 | 7.37 | 1530 | 960 | 0.366 |
| 20.16 | 7.72 | 1650 | 960 | 0.383 |
| 20.16 | 8.30 | 1830 | 1440 | 0.412 |
| 20.16 | 8.98 | 1950 | 960 | 0.445 |
| 20.16 | 9.25 | 2070 | 960 | 0.459 |
| 20.16 | 9.78 | 2190 | 960 | 0.485 |
| 20.16 | 10.20 | 2310 | 960 | 0.506 |

ตารางที่ ง.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 20.16 | 10.88 | 2430 | 960 | 0.540 |
| 20.16 | 11.38 | 2550 | 960 | 0.564 |
| 20.16 | 12.26 | 2670 | 960 | 0.608 |
| 20.16 | 13.04 | 2790 | 960 | 0.647 |
| 20.16 | 13.41 | 2910 | 960 | 0.665 |
| 20.16 | 14.06 | 3030 | 960 | 0.697 |
| 20.16 | 14.52 | 3150 | 960 | 0.720 |
| 20.16 | 14.99 | 3270 | 960 | 0.744 |
| 20.16 | 15.73 | 3390 | 960 | 0.780 |
| 20.16 | 16.85 | 3510 | 960 | 0.836 |
| 20.16 | 17.56 | 3630 | 960 | 0.871 |
| 20.16 | 18.49 | 3750 | 960 | 0.917 |
| 20.16 | 18.97 | 3870 | 960 | 0.941 |
| 20.16 | 19.23 | 3990 | 960 | 0.954 |



ง.3 การดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ ง.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 19.83 | 0.25 | 30 | 300 | 0.013 |
| 19.83 | 0.33 | 60 | 300 | 0.017 |
| 19.83 | 0.57 | 90 | 300 | 0.029 |
| 19.83 | 0.95 | 120 | 300 | 0.048 |
| 19.83 | 1.85 | 150 | 300 | 0.093 |
| 19.83 | 2.45 | 180 | 300 | 0.124 |
| 19.83 | 3.04 | 210 | 300 | 0.153 |
| 19.83 | 3.46 | 270 | 600 | 0.174 |
| 19.83 | 4.00 | 330 | 600 | 0.202 |
| 19.83 | 4.25 | 390 | 600 | 0.214 |
| 19.83 | 4.57 | 450 | 600 | 0.230 |
| 19.83 | 5.13 | 570 | 1200 | 0.259 |
| 19.83 | 5.60 | 690 | 1200 | 0.282 |
| 19.83 | 5.93 | 810 | 1200 | 0.299 |
| 19.83 | 6.32 | 930 | 1200 | 0.319 |
| 19.83 | 6.86 | 1050 | 1200 | 0.346 |
| 19.83 | 7.45 | 1170 | 1200 | 0.376 |
| 19.83 | 7.78 | 1290 | 1200 | 0.392 |
| 19.83 | 8.25 | 1410 | 1200 | 0.416 |
| 19.83 | 9.11 | 1530 | 1200 | 0.459 |
| 19.83 | 9.54 | 1650 | 1200 | 0.481 |
| 19.83 | 10.08 | 1830 | 1800 | 0.508 |
| 19.83 | 11.13 | 1950 | 1200 | 0.561 |
| 19.83 | 11.42 | 2070 | 1200 | 0.576 |
| 19.83 | 12.05 | 2190 | 1200 | 0.608 |
| 19.83 | 12.66 | 2310 | 1200 | 0.638 |

ตารางที่ ง.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 19.83 | 13.42 | 2430 | 1200 | 0.677 |
| 19.83 | 14.09 | 2550 | 1200 | 0.710 |
| 19.83 | 14.63 | 2670 | 1200 | 0.738 |
| 19.83 | 15.14 | 2790 | 1200 | 0.763 |
| 19.83 | 15.52 | 2910 | 1200 | 0.782 |
| 19.83 | 16.15 | 3030 | 1200 | 0.814 |
| 19.83 | 16.61 | 3150 | 1200 | 0.837 |
| 19.83 | 17.13 | 3270 | 1200 | 0.864 |
| 19.83 | 18.06 | 3390 | 1200 | 0.911 |
| 19.83 | 18.84 | 3510 | 1200 | 0.950 |

ง.4 การดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ ง.4 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 40.08 | 0.38 | 30 | 300 | 0.009 |
| 40.08 | 0.99 | 60 | 300 | 0.025 |
| 40.08 | 1.96 | 90 | 300 | 0.049 |
| 40.08 | 3.64 | 150 | 600 | 0.091 |
| 40.08 | 5.88 | 240 | 900 | 0.147 |
| 40.08 | 7.25 | 330 | 900 | 0.181 |
| 40.08 | 9.85 | 450 | 1200 | 0.246 |
| 40.08 | 11.96 | 570 | 1200 | 0.298 |
| 40.08 | 13.00 | 690 | 1200 | 0.324 |
| 40.08 | 14.94 | 810 | 1200 | 0.373 |
| 40.08 | 16.29 | 930 | 1200 | 0.406 |
| 40.08 | 18.37 | 1050 | 1200 | 0.458 |
| 40.08 | 21.52 | 1170 | 1200 | 0.537 |
| 40.08 | 23.24 | 1290 | 1200 | 0.580 |
| 40.08 | 25.22 | 1410 | 1200 | 0.629 |
| 40.08 | 27.27 | 1710 | 3000 | 0.680 |
| 40.08 | 28.85 | 1830 | 1200 | 0.720 |
| 40.08 | 30.92 | 2010 | 1800 | 0.772 |
| 40.08 | 33.64 | 2190 | 1800 | 0.839 |
| 40.08 | 35.86 | 2550 | 3600 | 0.895 |
| 40.08 | 37.94 | 2730 | 1800 | 0.947 |
| 40.08 | 38.05 | 2910 | 1800 | 0.949 |

ง.5 การดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ ง.5 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 10 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 58.77 | 1.06 | 30 | 300 | 0.018 |
| 58.77 | 2.98 | 60 | 300 | 0.051 |
| 58.77 | 4.24 | 90 | 300 | 0.072 |
| 58.77 | 5.09 | 120 | 300 | 0.087 |
| 58.77 | 5.53 | 150 | 300 | 0.094 |
| 58.77 | 7.12 | 180 | 300 | 0.121 |
| 58.77 | 8.28 | 210 | 300 | 0.141 |
| 58.77 | 9.33 | 240 | 300 | 0.159 |
| 58.77 | 10.59 | 270 | 300 | 0.180 |
| 58.77 | 12.62 | 330 | 600 | 0.215 |
| 58.77 | 14.77 | 390 | 600 | 0.251 |
| 58.77 | 15.85 | 450 | 600 | 0.270 |
| 58.77 | 18.66 | 510 | 600 | 0.318 |
| 58.77 | 20.07 | 570 | 600 | 0.342 |
| 58.77 | 23.25 | 630 | 600 | 0.396 |
| 58.77 | 26.18 | 690 | 600 | 0.445 |
| 58.77 | 30.07 | 750 | 600 | 0.512 |
| 58.77 | 32.29 | 870 | 1200 | 0.549 |
| 58.77 | 37.58 | 990 | 1200 | 0.639 |
| 58.77 | 40.69 | 1110 | 1200 | 0.692 |
| 58.77 | 42.39 | 1230 | 1200 | 0.721 |
| 58.77 | 44.60 | 1350 | 1200 | 0.759 |
| 58.77 | 46.52 | 1470 | 1200 | 0.792 |
| 58.77 | 48.38 | 1590 | 1200 | 0.823 |
| 58.77 | 50.95 | 1710 | 1200 | 0.867 |
| 58.77 | 53.26 | 1830 | 1200 | 0.906 |
| 58.77 | 55.78 | 1950 | 1200 | 0.949 |

ง.6 การดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 8 เซนติเมตร

ตารางที่ ง.6 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 8 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 60.65 | 2.00 | 10 | 100 | 0.035 |
| 60.65 | 2.19 | 20 | 100 | 0.036 |
| 60.65 | 2.32 | 30 | 100 | 0.038 |
| 60.65 | 2.46 | 40 | 100 | 0.041 |
| 60.65 | 3.14 | 50 | 100 | 0.052 |
| 60.65 | 3.43 | 60 | 100 | 0.057 |
| 60.65 | 3.57 | 70 | 100 | 0.059 |
| 60.65 | 4.03 | 80 | 100 | 0.066 |
| 60.65 | 4.16 | 90 | 100 | 0.069 |
| 60.65 | 4.43 | 100 | 100 | 0.073 |
| 60.65 | 4.95 | 110 | 100 | 0.082 |
| 60.65 | 5.92 | 120 | 100 | 0.098 |
| 60.65 | 6.78 | 130 | 100 | 0.112 |
| 60.65 | 7.52 | 150 | 200 | 0.124 |
| 60.65 | 8.11 | 170 | 200 | 0.134 |
| 60.65 | 9.38 | 190 | 200 | 0.155 |
| 60.65 | 10.63 | 210 | 200 | 0.175 |
| 60.65 | 11.05 | 240 | 300 | 0.182 |
| 60.65 | 12.78 | 270 | 300 | 0.211 |
| 60.65 | 13.45 | 300 | 300 | 0.222 |
| 60.65 | 14.84 | 330 | 300 | 0.245 |
| 60.65 | 17.03 | 360 | 300 | 0.281 |
| 60.65 | 19.33 | 390 | 300 | 0.319 |
| 60.65 | 20.13 | 420 | 300 | 0.332 |
| 60.65 | 21.17 | 450 | 300 | 0.349 |
| 60.65 | 23.16 | 480 | 300 | 0.382 |

ตารางที่ ง.6 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 8 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 60.65 | 60.65 | 540 | 600 | 28.03 |
| 60.65 | 60.65 | 600 | 600 | 30.65 |
| 60.65 | 60.65 | 660 | 600 | 32.47 |
| 60.65 | 60.65 | 720 | 600 | 34.75 |
| 60.65 | 60.65 | 780 | 600 | 38.92 |
| 60.65 | 60.65 | 840 | 600 | 40.65 |
| 60.65 | 60.65 | 900 | 600 | 42.54 |
| 60.65 | 60.65 | 960 | 600 | 45.90 |
| 60.65 | 60.65 | 1020 | 600 | 47.88 |
| 60.65 | 60.65 | 1080 | 600 | 49.57 |
| 60.65 | 60.65 | 1200 | 1200 | 52.86 |
| 60.65 | 60.65 | 1320 | 1200 | 54.84 |
| 60.65 | 60.65 | 1440 | 1200 | 56.72 |
| 60.65 | 60.65 | 1560 | 1200 | 57.46 |



ง.7 การดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 6 เซนติเมตร

ตารางที่ ง.7 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 6 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 60.6 | 0.92 | 10 | 100 | 0.015 |
| 60.6 | 1.97 | 20 | 100 | 0.033 |
| 60.6 | 2.68 | 30 | 100 | 0.044 |
| 60.6 | 3.11 | 40 | 100 | 0.051 |
| 60.6 | 3.49 | 50 | 100 | 0.057 |
| 60.6 | 3.70 | 60 | 100 | 0.061 |
| 60.6 | 4.22 | 70 | 100 | 0.070 |
| 60.6 | 4.32 | 80 | 100 | 0.071 |
| 60.6 | 4.49 | 90 | 100 | 0.074 |
| 60.6 | 4.97 | 100 | 100 | 0.082 |
| 60.6 | 5.65 | 110 | 100 | 0.093 |
| 60.6 | 6.05 | 120 | 100 | 0.100 |
| 60.6 | 6.51 | 130 | 100 | 0.107 |
| 60.6 | 7.43 | 140 | 100 | 0.123 |
| 60.6 | 8.35 | 150 | 100 | 0.138 |
| 60.6 | 8.70 | 160 | 100 | 0.143 |
| 60.6 | 9.27 | 170 | 100 | 0.153 |
| 60.6 | 9.86 | 180 | 100 | 0.163 |
| 60.6 | 10.54 | 190 | 100 | 0.174 |
| 60.6 | 11.76 | 200 | 100 | 0.194 |
| 60.6 | 13.14 | 210 | 100 | 0.217 |
| 60.6 | 13.78 | 220 | 100 | 0.227 |
| 60.6 | 14.22 | 230 | 100 | 0.234 |
| 60.6 | 14.65 | 240 | 100 | 0.242 |
| 60.6 | 15.32 | 250 | 100 | 0.253 |
| 60.6 | 15.43 | 260 | 100 | 0.254 |

ตารางที่ ง.7 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Fixed bed column ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นสารไตรโคลซานเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงชั้นสารดูดซับ 6 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|-----------|
| 60.6 | 16.00 | 270 | 100 | 0.264 |
| 60.6 | 16.84 | 280 | 100 | 0.278 |
| 60.6 | 17.51 | 290 | 100 | 0.289 |
| 60.6 | 18.22 | 300 | 100 | 0.300 |
| 60.6 | 19.62 | 310 | 100 | 0.324 |
| 60.6 | 20.35 | 320 | 100 | 0.336 |
| 60.6 | 21.62 | 330 | 100 | 0.357 |
| 60.6 | 23.51 | 360 | 300 | 0.388 |
| 60.6 | 25.19 | 390 | 300 | 0.415 |
| 60.6 | 26.73 | 420 | 300 | 0.441 |
| 60.6 | 28.00 | 450 | 300 | 0.462 |
| 60.6 | 31.22 | 480 | 300 | 0.515 |
| 60.6 | 34.46 | 540 | 600 | 0.568 |
| 60.6 | 35.65 | 600 | 600 | 0.588 |
| 60.6 | 38.86 | 660 | 600 | 0.641 |
| 60.6 | 42.95 | 720 | 600 | 0.708 |
| 60.6 | 44.38 | 780 | 600 | 0.732 |
| 60.6 | 47.68 | 840 | 600 | 0.786 |
| 60.6 | 53.16 | 900 | 600 | 0.877 |
| 60.6 | 55.65 | 960 | 600 | 0.918 |
| 60.6 | 57.76 | 1020 | 600 | 0.952 |



ภาคผนวก จ
ข้อมูลผลการศึกษา
การดูดซับสารไตรโคลซานของถ่าน MAC แบบ Pulsed bed column

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ.1 การดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับ 2 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.07 | 2.29 | 30 | 300 | 0.038 |
| 60.07 | 3.12 | 60 | 300 | 0.052 |
| 60.07 | 3.70 | 90 | 300 | 0.062 |
| 60.07 | 4.59 | 120 | 300 | 0.076 |
| 60.07 | 5.72 | 150 | 300 | 0.095 |
| 60.07 | 6.93 | 180 | 300 | 0.115 |
| 60.07 | 7.67 | 210 | 300 | 0.128 |
| 60.07 | 8.54 | 240 | 300 | 0.142 |
| 60.07 | 10.64 | 270 | 300 | 0.177 |
| 60.07 | 11.66 | 330 | 600 | 0.194 |
| 60.07 | 14.83 | 390 | 600 | 0.247 |
| 60.07 | 17.90 | 450 | 600 | 0.298 |
| 60.07 | 19.72 | 510 | 600 | 0.328 |
| 60.07 | 21.05 | 570 | 600 | 0.350 |
| 60.07 | 23.15 | 630 | 600 | 0.385 |
| 60.07 | 24.94 | 690 | 600 | 0.415 |
| 60.07 | 26.55 | 750 | 600 | 0.442 |
| 60.07 | 29.94 | 870 | 1200 | 0.498* |
| 60.07 | 7.40 | 900 | 300 | 0.123 |
| 60.07 | 14.36 | 930 | 300 | 0.239 |
| 60.07 | 18.56 | 960 | 300 | 0.309 |
| 60.07 | 21.82 | 990 | 300 | 0.363 |
| 60.07 | 23.31 | 1020 | 300 | 0.388 |
| 60.07 | 25.72 | 1050 | 300 | 0.428 |
| 60.07 | 28.81 | 1110 | 600 | 0.480* |
| 60.07 | 7.79 | 1140 | 300 | 0.130 |
| 60.07 | 11.80 | 1170 | 300 | 0.196 |
| 60.07 | 15.86 | 1200 | 300 | 0.264 |

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการซีกกลับ 2 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.07 | 18.26 | 1260 | 600 | 0.304 |
| 60.07 | 23.84 | 1320 | 600 | 0.397 |
| 60.07 | 26.35 | 1380 | 600 | 0.439 |
| 60.07 | 30.61 | 1440 | 600 | 0.510* |
| 60.07 | 6.02 | 1470 | 300 | 0.100 |
| 60.07 | 15.00 | 1500 | 300 | 0.250 |
| 60.07 | 17.15 | 1530 | 300 | 0.286 |
| 60.07 | 21.93 | 1560 | 300 | 0.365 |
| 60.07 | 24.48 | 1590 | 300 | 0.407 |
| 60.07 | 26.44 | 1650 | 600 | 0.440 |
| 60.07 | 28.67 | 1710 | 600 | 0.477 |
| 60.07 | 30.72 | 1770 | 600 | 0.511* |

*หมายเหตุ: สิ้นสุด Cycle

จ.2 การดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับ 4 เซนติเมตร

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับ 4 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.6 | 2.67 | 30 | 300 | 0.044 |
| 60.6 | 3.20 | 60 | 300 | 0.053 |
| 60.6 | 4.94 | 90 | 300 | 0.082 |
| 60.6 | 7.13 | 120 | 300 | 0.118 |
| 60.6 | 8.43 | 150 | 300 | 0.139 |
| 60.6 | 10.17 | 180 | 300 | 0.168 |
| 60.6 | 11.83 | 210 | 300 | 0.195 |
| 60.6 | 13.57 | 240 | 300 | 0.224 |
| 60.6 | 15.00 | 270 | 300 | 0.247 |
| 60.6 | 16.32 | 330 | 600 | 0.269 |
| 60.6 | 17.75 | 390 | 600 | 0.293 |
| 60.6 | 19.47 | 450 | 600 | 0.321 |
| 60.6 | 21.63 | 510 | 600 | 0.357 |
| 60.6 | 23.74 | 570 | 600 | 0.391 |
| 60.6 | 24.92 | 630 | 600 | 0.411 |
| 60.6 | 26.01 | 690 | 600 | 0.429 |
| 60.6 | 27.59 | 750 | 600 | 0.455 |
| 60.6 | 29.44 | 870 | 1200 | 0.485* |
| 60.6 | 0.65 | 900 | 300 | 0.011 |
| 60.6 | 1.43 | 930 | 300 | 0.024 |
| 60.6 | 2.16 | 960 | 300 | 0.036 |
| 60.6 | 3.09 | 990 | 300 | 0.051 |
| 60.6 | 3.54 | 1020 | 300 | 0.058 |
| 60.6 | 4.27 | 1050 | 300 | 0.070 |
| 60.6 | 6.10 | 1110 | 600 | 0.101 |
| 60.6 | 8.54 | 1140 | 300 | 0.141 |
| 60.6 | 10.98 | 1170 | 300 | 0.181 |
| 60.6 | 12.16 | 1200 | 300 | 0.201 |

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการซีกกลับ 4 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.6 | 15.76 | 1260 | 600 | 0.260 |
| 60.6 | 18.46 | 1320 | 600 | 0.304 |
| 60.6 | 22.02 | 1380 | 600 | 0.363 |
| 60.6 | 24.16 | 1440 | 600 | 0.398 |
| 60.6 | 26.83 | 1500 | 600 | 0.442 |
| 60.6 | 27.83 | 1560 | 600 | 0.459 |
| 60.6 | 28.83 | 1590 | 300 | 0.475* |
| 60.6 | 0.73 | 1620 | 300 | 0.012 |
| 60.6 | 0.93 | 1650 | 300 | 0.015 |
| 60.6 | 1.12 | 1680 | 300 | 0.019 |
| 60.6 | 1.32 | 1710 | 300 | 0.022 |
| 60.6 | 1.85 | 1740 | 300 | 0.031 |
| 60.6 | 2.89 | 1770 | 300 | 0.048 |
| 60.6 | 4.92 | 1800 | 300 | 0.081 |
| 60.6 | 5.98 | 1830 | 300 | 0.099 |
| 60.6 | 9.55 | 1890 | 600 | 0.157 |
| 60.6 | 11.21 | 1950 | 600 | 0.185 |
| 60.6 | 13.65 | 2010 | 600 | 0.225 |
| 60.6 | 14.83 | 2070 | 600 | 0.245 |
| 60.6 | 16.69 | 2130 | 600 | 0.275 |
| 60.6 | 17.44 | 2190 | 600 | 0.288 |
| 60.6 | 19.83 | 2250 | 600 | 0.327 |
| 60.6 | 24.04 | 2310 | 600 | 0.396 |
| 60.6 | 27.05 | 2370 | 600 | 0.446 |
| 60.6 | 30.84 | 2430 | 600 | 0.509* |
| 60.6 | 0.73 | 2460 | 300 | 0.012 |
| 60.6 | 0.93 | 2490 | 300 | 0.015 |
| 60.6 | 1.12 | 2520 | 300 | 0.019 |
| 60.6 | 1.32 | 2550 | 300 | 0.022 |
| 60.6 | 1.40 | 2580 | 300 | 0.023 |
| 60.6 | 1.52 | 2610 | 300 | 0.025 |

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการซีกกลับ 4 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.6 | 2.33 | 2640 | 300 | 0.038 |
| 60.6 | 3.60 | 2670 | 300 | 0.059 |
| 60.6 | 5.59 | 2730 | 600 | 0.092 |
| 60.6 | 6.57 | 2790 | 600 | 0.108 |
| 60.6 | 7.78 | 2850 | 600 | 0.128 |
| 60.6 | 8.43 | 2910 | 600 | 0.139 |
| 60.6 | 10.06 | 2970 | 600 | 0.166 |
| 60.6 | 13.01 | 3030 | 600 | 0.214 |
| 60.6 | 15.51 | 3090 | 600 | 0.256 |
| 60.6 | 19.94 | 3150 | 600 | 0.329 |
| 60.6 | 24.04 | 3210 | 600 | 0.396 |
| 60.6 | 25.67 | 3270 | 600 | 0.423 |
| 60.6 | 26.66 | 3330 | 600 | 0.440 |
| 60.6 | 28.51 | 3390 | 600 | 0.470 |
| 60.6 | 31.29 | 3450 | 600 | 0.516* |

*หมายเหตุ: สิ้นสุด Cycle



จ.3 การดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับ 6 เซนติเมตร

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับ 6 เซนติเมตร

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.6 | 2.05 | 30 | 300 | 0.034 |
| 60.6 | 3.03 | 60 | 300 | 0.050 |
| 60.6 | 4.30 | 90 | 300 | 0.071 |
| 60.6 | 6.40 | 120 | 300 | 0.106 |
| 60.6 | 8.37 | 150 | 300 | 0.138 |
| 60.6 | 9.75 | 180 | 300 | 0.161 |
| 60.6 | 11.21 | 210 | 300 | 0.185 |
| 60.6 | 12.70 | 240 | 300 | 0.210 |
| 60.6 | 14.04 | 270 | 300 | 0.232 |
| 60.6 | 16.15 | 330 | 600 | 0.267 |
| 60.6 | 17.89 | 390 | 600 | 0.295 |
| 60.6 | 20.17 | 450 | 600 | 0.333 |
| 60.6 | 24.89 | 510 | 600 | 0.411 |
| 60.6 | 26.34 | 570 | 600 | 0.435 |
| 60.6 | 27.52 | 630 | 600 | 0.454 |
| 60.6 | 28.06 | 690 | 600 | 0.463 |
| 60.6 | 29.88 | 750 | 600 | 0.493 |
| 60.6 | 30.17 | 870 | 1200 | 0.498* |
| 60.6 | 0.22 | 900 | 300 | 0.004 |
| 60.6 | 0.31 | 930 | 300 | 0.005 |
| 60.6 | 0.48 | 960 | 300 | 0.008 |
| 60.6 | 0.55 | 990 | 300 | 0.009 |
| 60.6 | 0.64 | 1020 | 300 | 0.011 |
| 60.6 | 0.73 | 1050 | 300 | 0.012 |
| 60.6 | 0.93 | 1080 | 300 | 0.015 |
| 60.6 | 1.94 | 1110 | 300 | 0.032 |
| 60.6 | 2.36 | 1140 | 300 | 0.039 |
| 60.6 | 3.29 | 1200 | 600 | 0.054 |

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการซีกกลับ 6 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.6 | 5.98 | 1260 | 600 | 0.099 |
| 60.6 | 7.89 | 1320 | 600 | 0.130 |
| 60.6 | 8.43 | 1380 | 600 | 0.139 |
| 60.6 | 9.44 | 1440 | 600 | 0.156 |
| 60.6 | 12.47 | 1500 | 600 | 0.206 |
| 60.6 | 15.08 | 1560 | 600 | 0.249 |
| 60.6 | 16.69 | 1620 | 600 | 0.275 |
| 60.6 | 17.16 | 1680 | 600 | 0.283 |
| 60.6 | 19.10 | 1740 | 600 | 0.315 |
| 60.6 | 19.94 | 1800 | 600 | 0.329 |
| 60.6 | 21.38 | 1860 | 600 | 0.353 |
| 60.6 | 23.15 | 1920 | 600 | 0.382 |
| 60.6 | 25.48 | 1980 | 600 | 0.420 |
| 60.6 | 26.57 | 2040 | 600 | 0.438 |
| 60.6 | 28.34 | 2100 | 600 | 0.468 |
| 60.6 | 30.56 | 2160 | 600 | 0.504* |
| 60.6 | 0.11 | 2190 | 300 | 0.002 |
| 60.6 | 0.25 | 2220 | 300 | 0.004 |
| 60.6 | 0.28 | 2250 | 300 | 0.005 |
| 60.6 | 0.34 | 2280 | 300 | 0.006 |
| 60.6 | 0.39 | 2310 | 300 | 0.006 |
| 60.6 | 0.42 | 2340 | 300 | 0.007 |
| 60.6 | 0.87 | 2370 | 300 | 0.014 |
| 60.6 | 1.29 | 2400 | 300 | 0.021 |
| 60.6 | 1.60 | 2430 | 300 | 0.026 |
| 60.6 | 1.66 | 2460 | 300 | 0.027 |
| 60.6 | 1.69 | 2490 | 300 | 0.028 |
| 60.6 | 1.74 | 2520 | 300 | 0.029 |
| 60.6 | 1.83 | 2550 | 300 | 0.030 |
| 60.6 | 1.99 | 2580 | 300 | 0.033 |
| 60.6 | 2.16 | 2640 | 600 | 0.036 |

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการซีกกลับ 6 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.6 | 3.34 | 2700 | 600 | 0.055 |
| 60.6 | 3.88 | 2760 | 600 | 0.064 |
| 60.6 | 5.28 | 2820 | 600 | 0.087 |
| 60.6 | 6.49 | 2880 | 600 | 0.107 |
| 60.6 | 8.29 | 2940 | 600 | 0.137 |
| 60.6 | 9.66 | 3000 | 600 | 0.159 |
| 60.6 | 11.18 | 3060 | 600 | 0.184 |
| 60.6 | 12.53 | 3120 | 600 | 0.207 |
| 60.6 | 16.49 | 3180 | 600 | 0.272 |
| 60.6 | 20.39 | 3240 | 600 | 0.337 |
| 60.6 | 22.33 | 3300 | 600 | 0.369 |
| 60.6 | 25.17 | 3360 | 600 | 0.415 |
| 60.6 | 27.64 | 3420 | 600 | 0.456 |
| 60.6 | 29.13 | 3480 | 600 | 0.481 |
| 60.6 | 30.87 | 3540 | 600 | 0.509* |
| 60.6 | 0.31 | 3570 | 300 | 0.005 |
| 60.6 | 0.34 | 3600 | 300 | 0.006 |
| 60.6 | 0.42 | 3630 | 300 | 0.007 |
| 60.6 | 0.45 | 3660 | 300 | 0.007 |
| 60.6 | 0.67 | 3690 | 300 | 0.011 |
| 60.6 | 0.73 | 3720 | 300 | 0.012 |
| 60.6 | 1.08 | 3750 | 300 | 0.018 |
| 60.6 | 1.32 | 3780 | 300 | 0.022 |
| 60.6 | 1.40 | 3840 | 600 | 0.023 |
| 60.6 | 2.40 | 3900 | 600 | 0.040 |
| 60.6 | 3.40 | 3960 | 600 | 0.056 |
| 60.6 | 4.40 | 4020 | 600 | 0.073 |
| 60.6 | 5.40 | 4080 | 600 | 0.089 |
| 60.6 | 6.40 | 4140 | 600 | 0.106 |
| 60.6 | 7.40 | 4200 | 600 | 0.122 |
| 60.6 | 7.84 | 4260 | 600 | 0.129 |

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสารไตรโคลซานของการดูดซับแบบ Pulsed bed column ที่ระยะความสูงของการชักกลับ 6 เซนติเมตร (ต่อ)

| C_0 (mg/L) | C_t (mg/L) | เวลา (นาที) | ปริมาตรน้ำออก (ml) | C_t/C_0 |
|--------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|
| 60.6 | 8.37 | 4320 | 600 | 0.138 |
| 60.6 | 9.49 | 4380 | 600 | 0.157 |
| 60.6 | 12.28 | 4440 | 600 | 0.203 |
| 60.6 | 14.38 | 4500 | 600 | 0.237 |
| 60.6 | 16.80 | 4560 | 600 | 0.277 |
| 60.6 | 18.03 | 4620 | 600 | 0.298 |
| 60.6 | 20.62 | 4680 | 600 | 0.340 |
| 60.6 | 23.82 | 4740 | 600 | 0.393 |
| 60.6 | 25.03 | 4800 | 600 | 0.413 |
| 60.6 | 25.69 | 4860 | 600 | 0.424 |
| 60.6 | 26.13 | 4920 | 600 | 0.431 |
| 60.6 | 26.87 | 4980 | 600 | 0.443 |
| 60.6 | 27.19 | 5040 | 600 | 0.449 |
| 60.6 | 27.66 | 5100 | 600 | 0.456 |
| 60.6 | 28.84 | 5160 | 600 | 0.476 |
| 60.6 | 29.16 | 5220 | 600 | 0.481 |
| 60.6 | 30.76 | 5280 | 600 | 0.508* |

*หมายเหตุ: สิ้นสุด Cycle



ภาคผนวก ฉ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Phalaiphai, M., Yimrattanabovorn, J., Wichisathian, B., Wonglertarak, W., Nawong, S. (2023). **Removal of Triclosan in Aqueous Solution by Using Macadamia Nut Shell Activated Carbon**. International Conference on Environmental Sciences (ICES-23). Nagoya, Japan. pp. 74-78.
- [2] Yimrattanabovorn, J., Phalaiphai, M., Nawong, S. (2024). **Pulsed-Bed Column Adsorption for Triclosan Removal Using Macadamia Nut Shell Activated Carbon**. Civil Engineering Journal. Vol. 10, No. 5, pp. 1645-1661. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-05-019>.



Removal of Triclosan in Aqueous Solution by using Macadamia Nut Shell Activated Carbon

^[1] Mananya Phalaiphai, ^[2] Jareeya Yimrattanabovorn, ^[3] Boonchai Wichitsathian, ^[4] Watcharapol Wonglertarak, ^[5] Siriwan Nawong

^{[1][2][3]} School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.

^[4] School of Environmental Engineering and Disaster Management, Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Thailand.

^[5] School of Food Technology, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology, Thailand.

Abstract — Triclosan (TCS) is a widely used antimicrobial agent in various consumer products, leading to its presence in wastewater and surface water. Therefore, effective treatment methods are urgently needed to remove TCS from wastewater before it is discharged into the environment. Alternative adsorption treatments have been explored for this purpose. The aim of this study is to determine the optimum conditions for TCS adsorption by MAC, including contact time, initial concentration, and pH. Based on the experimental data, the optimal conditions for TCS adsorption were found to be an initial concentration of 20 mg/L, a contact time of 780 minutes, and a pH of 7. The adsorption kinetics followed a second-order model, and the equilibrium data were well-described by both Langmuir and Freundlich isotherms with a maximum adsorption capacity of 526.30 mg/g. Therefore, MAC can be considered an effective and low-cost adsorbent with a high adsorption capacity for the removal of TCS.

Index Terms— Macadamia nutshell, activated carbon, Triclosan, Adsorption, Low-cost adsorbent.

I. INTRODUCTION

Triclosan (TCS) is a common antibacterial agent found in personal care products such as toothpaste, soap, body wash, and pharmaceuticals [1]. The extensive use of TCS-containing products has led to the release of TCS into the aquatic environment and wastewater matrices. TCS can be degraded by UV light, sunlight, or heat, which can result in the formation of 2,8-Dichlorodibenzo-p-dioxins [2]. Exposure of TCS to free chlorine can result in the formation of chlorinated TCS derivatives [3, 4]. Therefore, there is an urgent need to develop effective treatment methods to remove TCS from wastewater before it is discharged into the environment. One promising approach is the use of activated carbon, which has a high surface area and can adsorb a wide range of pollutants. Thus, alternative adsorption treatments have been explored to remove TCS effectively and completely without producing any toxic by-products [5, 6, 7].

However, the commercial activated carbon is an expensive process to date, which is why many researchers have turned their attention towards agricultural waste [8]. The macadamia nut shell activated carbon (MAC) has been reported to be a good phenol adsorbent [9]. The aim of this study is to determine the optimum conditions for TCS adsorption by MAC, such as contact time, initial

concentration, and pH. Langmuir and Freundlich adsorption models were used to describe the adsorption isotherm and study their adsorption kinetics. The results of the study can be applied by using MAC as an alternative low-cost adsorbent for TCS removal.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Preparation of macadamia nut shell activated carbon

The adsorbent samples were prepared from macadamia nut shells by carbonization (CO₂) activation, as reported in [9]. The macadamia nut shell charcoal was crushed and sieved using a sieve analysis (ASTM, 2004) to obtain particles within the size range of 1.70-2.36 mm. The macadamia nut shell activated carbon (MAC) was characterized using a nitrogen adsorption isotherm with an accelerated surface area and a porosimetry system, the Brunauer-Emmett-Tellet (BET) Bet Sorp mini II by Bet-Japan.

2.2 Preparation of triclosan aqueous solution

Triclosan (99.9%) was obtained from Merck Ltd, Thailand. The TCS stock solution with a concentration of 200 mg/L was prepared following the procedure reported in [10, 11]. A UV-VIS spectrophotometer (PG-T80+, Japan) was used for all the experiments to determine the concentration of triclosan.

Removal of Triclosan in Aqueous Solution by using Macadamia Nut Shell Activated Carbon

2.3 Adsorption experiment

Batch adsorption experiments were conducted in 250 mL glass bottles containing 200 mL of triclosan solution. To investigate the effects of initial concentration, contact time, and initial pH on the adsorption capacity of triclosan, three experiment series (1-3) were conducted. The conditions of each batch experiment are presented in Table 1. All experiments were performed in the dark using a thermostat-controlled shaker (New Brunswick, Innova® 42/42R, Germany). The concentrations of triclosan in the solution were measured using a UV/VIS spectrophotometer at 445 nm. The adsorption capacity was determined by performing a material balance on the initial and equilibrium concentrations of the aqueous solution. The amount of solute adsorbed per unit mass of adsorbent was analyzed using Equation (1).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_t)V}{W \times 1000} \quad (1)$$

Where q_e is an adsorption capacity (mg/g). C_0 and C_t are initial and effluent concentrations of solute (mg/L), respectively. V is the volume of the solution (L) and W is the mass of the adsorbent (g).

Table 1. Batch experiment conditions for studying the effects of Factors on triclosan adsorption

| Factor | Experiment series | | |
|------------------------------|-------------------|---------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Mass (g) | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Temperature | 25 | 25 | 25 |
| Volume (ml) | 200 | 200 | 200 |
| Agitation (rpm) | 150 | 150 | 150 |
| Initial concentration (mg/L) | 2-20 | 20 | 20 |
| Contact time (min) | 1,440 | 60-1080 | 780 |
| pH | 11 | 11 | 7-11 |

2.4 Study of Adsorption Isotherms and Kinetics

Adsorption isotherm experiments were conducted to evaluate the adsorption performance. The initial concentration was varied from 2 to 20 mg/L in 200 mL, and each condition was based on the optimal adsorption capacity determined from the batch experiments.

In order to interpret the adsorption kinetics, 1000 mL of TCS with an initial concentration of 20 mg/L and a MAC weight of 0.1 g were used (with each condition based on the batch experiment). The residual TCS concentration was measured using a UV/VIS spectrophotometer at different time intervals until the adsorption capacity reached equilibrium.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 The characterization of MAC

The pore structure, as characterized by surface area and pore volume, is an important property of activated carbon. Many

studies have shown that high values of surface area, pore volume, percent yield, and porosity can result in a greater adsorption capacity [12]. In this study, porosity parameters were calculated from nitrogen sorption isotherms. The percent yield of the MAC after CO₂ activation was 21.01%, and the MAC had a BET surface area of 1,211.40 m²/g. Following the IUPAC classification, the mean pore diameter of 2.13 nm falls within the mesopore range (2.0-50.0 nm), and the pore volume was 0.6456 cm³/g. These results indicate that the MAC has excellent properties for use as an adsorbent. The activation of macadamia nut shell charcoal with CO₂ likely involves the C-CO₂ reaction, which could remove carbon atoms and contribute to the development of mesoporous structures.

3.2 Effect of factors on TCS adsorption of MAC

The adsorption batch experiment was carried out to examine the effect of initial concentration, contact time, and initial pH on the adsorption capacity of TCS.

3.2.1 The effect of TCS initial concentration on adsorption of MAC

The result of different the TCS initial concentrations versus the amount of q_e was shown in Figure 1 to study their effect on adsorption capacity. The result shows the adsorption capacity was increased when increasing the initial concentration because of the great number of adsorption sites of MAC. This indicated that the initial concentration plays an important role which provided the necessary driving force to overcome the resistances to the mass transfer of TCS between the aqueous phase and solid phase [13]. The adsorption capacity of MAC on 2 to 20 mg/L of TCS was an amount of 4.91 to 40.87 mg/mg, respectively, for 24 hr. The interaction between TCS and MAC adsorbent was found enhanced with the increase in the initial concentration. Therefore, batch experiments' equilibrium initial TCS concentration of 2-20 mg/L was used for the adsorption isotherm study.

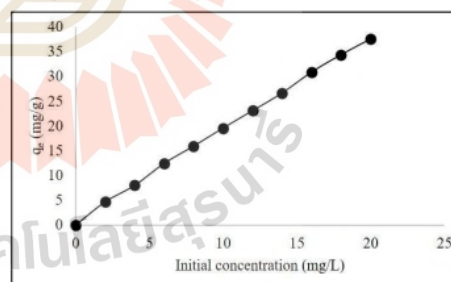


Figure 1. Effects of TCS initial concentration on MAC adsorption capacity

3.2.2 The effect of contact time on MAC adsorption capacity

To investigate the effect of contact time on adsorption capacity, the relationship between different contact times

Removal of Triclosan in Aqueous Solution by using Macadamia Nut Shell Activated Carbon

and the amount of q_e was presented in Figure 2. The adsorption of TCS was rapid during the first 180 minutes, with an increase in adsorption capacity from 7.66 to 12.08 mg/g. Subsequently, the amount of TCS adsorbed increased gradually and reached almost constant levels. The initial rapid phase may be attributed to the availability of vacant sites at the beginning, leading to an increase in the driving force of the concentration gradient between the adsorbate in solution and the adsorbate in the adsorbent. The rapid adsorption at the beginning may be due to the fast attachment of TCS molecules to the surface of MAC, while the following slower adsorption could be attributed to intraparticle diffusion. At 780 minutes, a slight increase in q_e was observed, reaching a maximum adsorption capacity of 27.26 mg/g, which further increased to 27.57 mg/g at 1080 minutes, indicating slower sorption due to intraparticle diffusion. The decrease in adsorption capacity could be due to the saturation of MAC active sites, and thus, the contact time may have allowed sufficient opportunities to create binding sites between TCS and the MAC surface [14, 15]. Therefore, for batch experiments, an equilibrium time of 780 minutes was used for the adsorption isotherm study.

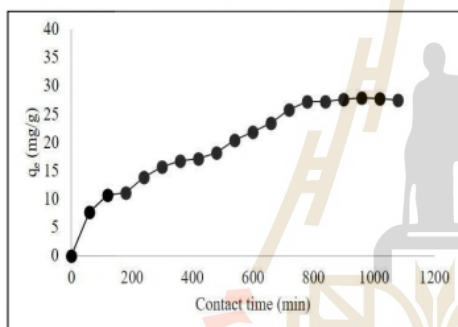


Figure 2. The effect of contact time on MAC adsorption capacity

3.2.3 The effect of initial pH on MAC adsorption capacity

To examine the impact of pH on adsorption capacity, Figure 3 presents the relationship between different pH values and the amount of q_e . The results show that changing pH values within the range of 7-12 significantly affected the adsorption capacities of MAC. The maximum adsorption capacity of 35.83 mg/g was observed at pH 7. However, as the pH increased from 7 to 11, the adsorption capacity decreased from 35.83 to 27.26 mg/g, and further decreased to 18.60 mg/g at a pH of 12. Theoretically, pH changes can affect the dissociation of triclosan molecules at a pK_a of 8.14 [2]. TCS is a hydrophobic ionizable organic chemical, and its dissociation depends on pH values. When $pH < pK_a$, the TCS-phenolate form (anion) dominates in solution, while at $pH > pK_a$, the TCS-phenolic form is dominant. Increasing pH values can lead to increased ionization, partially or fully deprotonated surface functional groups, and thus an increase in negative charges [15, 16].

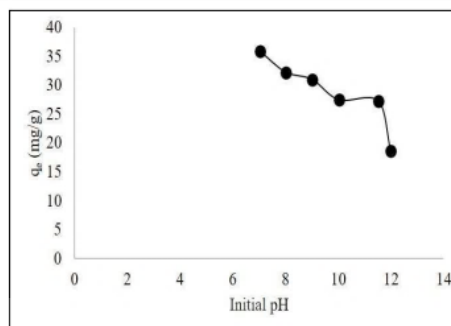


Figure 3. The effect of initial pH on MAC adsorption capacity

3.3 Adsorption isotherm study

Langmuir and Freundlich isotherms are widely used for adsorption studies and have been successfully applied to defining many sorption equilibria of TCS aqueous solution. Therefore, TCS adsorption data were analyzed by Langmuir and Freundlich equations (2) and (3), respectively:

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

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

The Langmuir constants K_L and maximum monolayer adsorption capacity, q_m related to the Langmuir isotherm model, while the Freundlich coefficients (K_F and n) are related to the Freundlich isotherm model. After identifying the optimum conditions in this study, adsorption isotherm experiments were conducted with an initial TCS concentration of 2-20 mg/L in 200 mL of solution, a contact time of 780 minutes, an initial solution pH of 7, an agitation speed of 150 rpm, a MAC weight of 0.1 g, and a temperature of 25 °C. These conditions were chosen to further understand the mechanism of adsorption. The constants obtained from the Langmuir and Freundlich isotherm equations are shown in Figure 4 and Table 2. The best isotherm model was determined based on the linear square regression correlation coefficient (R^2). The results show that the data were fitted with both Langmuir and Freundlich isotherms with R^2 values of 0.9653 and 0.9694, respectively. However, some previous research has indicated that the Freundlich model is better than Langmuir in describing the adsorption of phenol functional groups [17]. Table 2 presents a maximum adsorption capacity of 526.30 mg/g with the Langmuir isotherm. The Langmuir model is limited to monolayer adsorption with no interaction between the adsorbate molecules. Thus, energy adsorption is assumed to be the same all over the adsorbent surface [13].

Removal of Triclosan in Aqueous Solution by using Macadamia Nut Shell Activated Carbon

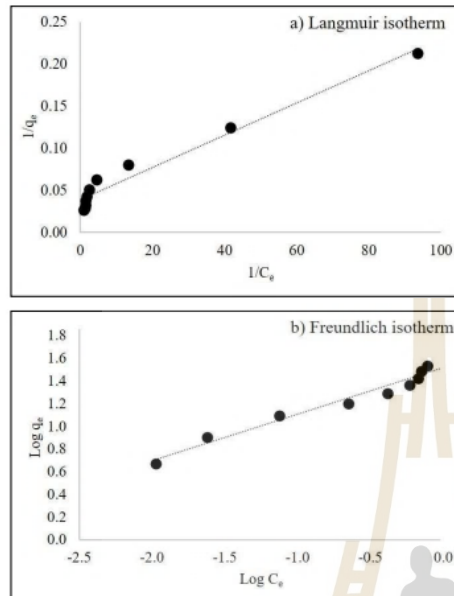


Figure 4. a) Langmuir isotherm and b) Freundlich isotherm for TCS adsorption on MAC under optimum adsorption conditions

Table 2. Estimated parameters for adsorption isotherms

| Isotherms | Unit | Parameters |
|----------------------|------|------------|
| Langmuir constants | | |
| q_{max} | mg/g | 526.30 |
| K_L | L/mg | 0.050 |
| R^2 | | 0.9653 |
| Freundlich constants | | |
| K_F | mg/g | 32.94 |
| n | | 2.43 |
| R^2 | | 0.9694 |

3.4 Adsorption kinetic study

Adsorption kinetics is a critical tool in investigating the adsorption mechanism. For this study, the adsorption kinetics were determined using an initial concentration of 20 mg/L in a 1000 ml solution with a pH of 11. To describe the adsorption process, commonly used kinetic models including zero order, first order, and second order were utilized. The best-fitted model was selected based on the linear square regression correlation coefficient (R^2). The constants obtained from the three kinetic models are presented in Figure 5 and Table 3. It was observed that the coefficient of the second-order model ($R^2 = 0.9881$) was higher and closer to unity. Therefore, it was concluded that

TCS adsorption on MAC was described by the second-order model. Kinetic analysis was crucial in selecting the best operating condition for a full-scale batch process to treat TCS from aqueous solutions.

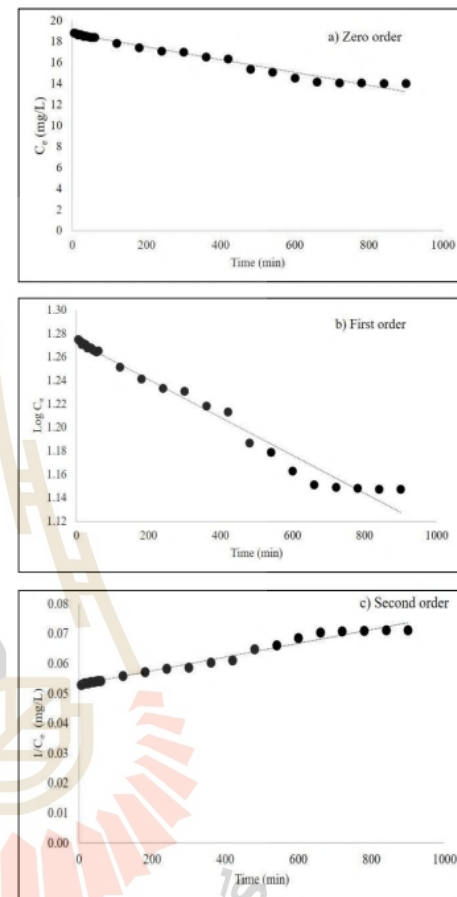


Figure 5. The kinetic models for TCS adsorption on MAC a) zero order; b) first order, and c) second order kinetic

Table 3. Kinetic parameters for TCS adsorption on MAC

| Zero order | | First order | | Second order | |
|------------|--------|-------------|--------|--------------|--------|
| k | R^2 | k_1 | R^2 | k_2 | R^2 |
| 0.0031 | 0.9779 | 0.0002 | 0.9800 | 0.00002 | 0.9881 |

IV. CONCLUSIONS

The Macadamia nut shell activated carbon has demonstrated potential for low-cost production as an adsorbent for the removal of triclosan. Macadamia nut shell activated carbon

Removal of Triclosan in Aqueous Solution by using Macadamia Nut Shell Activated Carbon

is a mesoporous material with high pore volume and surface area. The adsorption capacity of TCS increased with increasing initial concentration and contact time. The TCS-phenolate form was dominant in anion-dominant solutions. The adsorption capacity of MAC for TCS adsorption was higher at pH values below the pKa (pH < 8.14; acidic conditions were better than alkaline conditions). Based on the experimental data, the optimum conditions for TCS adsorption were an initial concentration of 20 mg/L, contact time of 780 minutes, and pH of 7. The adsorption kinetics followed a second-order model, and the equilibrium data were well described by both Langmuir and Freundlich isotherms with a maximum adsorption capacity of 526.30 mg/g, indicating monolayer adsorption of TCS onto MAC. MAC achieved an efficiency of more than 90% for TCS removal. Therefore, MAC can be considered an effective low-cost adsorbent with a high adsorption capacity for the removal of TCS.

Acknowledgments:

We would like to acknowledge the support provided by Suranaree University of Technology for this research. We would also like to express our gratitude to BL4.1: Infrared Spectroscopy and Imaging Synchrotron Light research Institute(Public Organization),Thailand, for their valuable assistance during the adsorption experiments.

REFERENCES

- [1] H. J. Tsai, and F. K. Chang, "Triclosan in influents and effluents from sewage treatment plants using chlorine and UV disinfection," *AJESE*, vol. 6, issue 1, pp. 67-70, Mar. 2022.
- [2] L. W. B. Olaniyan, N. Mkwetshana, and A. I. Okoh, "Triclosan in water, implications for human and environmental health," *SpringerPlus*, vol. 5, no. 1639, 2016.
- [3] J. M. Buth, M. Grandbois, P. J. Vikesland, K. McNeill, and W. A. Arnold, "Aquatic photochemistry of chlorinated triclosan derivatives: potential source of polychlorodibenzo-*P*-dioxins," *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 28, no. 12, pp. 2555-2563, Mar. 2009.
- [4] Z. Chen, Q. Song, G. Cao, and Y. Chen, "Photolytic degradation of triclosan in the presence of surfactants," *Chemical Papers*, vol. 62, no. 6, pp. 608-615, Oct. 2008.
- [5] L. Chen, and Z. Wang, "Effects of chlorination, ultraviolet and ozone disinfection on the biotoxicity of triclosan," *Water Supply*, vol. 19, no. 4, pp. 1175-1180, Oct. 2019.
- [6] Z. Luo et. al., "Current progress in treatment techniques of triclosan from wastewater: A review," *Sci. The Total Environ.*, vol. 696, Dec. 2019.
- [7] K. B. Orhon, A. K. Orhon, F. B. Dilek, and U. Yetis, "Triclosan removal from surface water by ozonation – Kinetics and by-products formation," *Journal of Environmental Management*, vol. 204, no. 1, pp. 327-336, Dec. 2017.
- [8] M. J. Phele, I. P. Ejidike, and F. M. Mtonzi, "Adsorption efficiency of activated macadamia nutshell for the removal Organochlorine pesticides: Endrin and 4,4-DDT from aqueous solution," *J. Pharm. Sci. & Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 258-262, Feb. 2019.
- [9] S. Pongsak, and J. Yimrattanabovorn, "Utilization of activated carbon from Macadamia nut shell as adsorbent for phenol removal," *IICHe Conference: Environment & technology for SDG Goals*, pp. 720-728, May 2021.
- [10] S. Suarez, M. C. Dodd, F. Omil, and U. V. Gunten, "Kinetics of triclosan oxidation by aqueous ozone and consequent loss of antibacterial activity: Relevance to municipal wastewater ozonation," *Water Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 2481-2490, Jun. 2007.
- [11] I. Kaur, S. Gaba, S. Kaur, R. Kaur, and J. Chawla, "Spectrophotometric determination of triclosan based on diazotization reaction: response surface optimization using Box-Behnken design," *Water Sci. Technol.*, vol. 77, no. 9, pp. 2204-2212, Mar. 2018.
- [12] N. S. Kumar, M. Suguna, A. S. Reddy, N. P. Kumar, and A. Krishnaiah, "Adsorption of Phenolic Compounds from Aqueous Solutions onto Chitosan-Coated Beads as Biosorbent," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, no. 19, pp. 9238-9247, Aug. 2010.
- [13] M. Triwiswara, C. G. Lee, J. K. Moon, and S. J. Park, "Adsorption of triclosan from aqueous solution onto char derived from palm kernel shell," *Desalination and Water Treatment*, vol. 177, pp. 71-79, Feb. 2020.
- [14] T. Aprianti, T. I. Sari, F. Hadiah, Y. Utama, and M. Said, "Powered Activated Carbon (PAC)-Ceramic Composite Adsorbent for Iron and Aluminium Cations Removal from Acid Mine Drainage," *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 54, no. 1, Feb. 2022.
- [15] J. L. Morales, O. P. Perez, and F. R. Velazquez, "Sorption of Triclosan onto Tyre Crumb Rubber," *Adsorption Science and Technology*, vol. 30, no. 10, Dec. 2012.
- [16] J. Wang, H. Man, L. Sun, and S. Zang, "Carbon Black: A good adsorbent for Triclosan Removal from water," *Water*, vol. 14, no. 4, Feb. 2022.
- [17] Z. H. Ho, and L. A. Adnan, "Phenol Removal from Aqueous Solution by Adsorption Technique Using Coconut Shell Activated Carbon," *Trop. Aqua. Soil Pollut.*, vol. 1, no. 2, pp. 98-107, Oct. 2021.



Available online at www.CivileJournal.org

Civil Engineering Journal

(E-ISSN: 2476-3055; ISSN: 2676-6957)

Vol. 10, No. 05, May, 2024



Pulsed-Bed Column Adsorption for Triclosan Removal Using Macadamia Nut Shell Activated Carbon

Jareeya Yimrattanabovorn ^{1*}, Mananya Phalaiphai ¹, Siriwan Nawong ²

¹ School of Environmental Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

² Synchrotron Research and Applications Division, Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

Received 20 January 2024; Revised 09 April 2024; Accepted 18 April 2024; Published 01 May 2024

Abstract

Triclosan (TCS), a common antibacterial agent found in numerous personal care products, has been detected in wastewater and surface water and is now of significant environmental concern due to its health impacts. To mitigate this issue, various treatment methods have been explored. This study investigated the efficacy of Macadamia nut shell activated carbon (MAC) as an economical adsorbent for triclosan removal. A pulsed-bed column adsorption technique was applied to enhance adsorption capacity and prolong the operational lifespan of the column. Batch experiments were conducted to explore various parameters and adsorption capacity. Column experiments were carried out to investigate breakthrough curves and various associated parameters. In batch experiments, MAC exhibited a high TCS adsorption capacity of 119.05 mg/g, and optimal adsorption conditions were determined. Adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model, and equilibrium data were well-fitted by both the Langmuir and Freundlich isotherm models. A pulsed-bed column adsorption showed superior performance compared to a fixed-bed column under specific conditions (flow rate: 10 mL/min, TCS initial concentration: 60 mg/L, bed column height: 10 cm) and removal bed height of only 6 cm, successfully enhancing TCS adsorption capacity to 53.40 mg/g and extending the operational lifespan of the column to 5,280 minutes. Adapting pulsed-bed columns for TCS removal from wastewater in the personal care product industry led to the extension of column life with increased adsorption capacity and minimized the use of adsorbents as a practical and environmentally friendly method.

Keywords: Macadamia Nut Shell Waste; Low-Cost Adsorbent; Triclosan; Pulsed-Bed Column; Fixed-Bed Column; Lifespan of Column.

1. Introduction

Triclosan (TCS), chemically identified as 5-chloro-2-(2,4-dichlorophenoxy) phenol, is a widely used antibacterial agent present in numerous products, especially personal care items. Its increasing presence in wastewater and water resources is now of significant environmental concern [1, 2], particularly heightened by the focus of the COVID-19 pandemic on sanitation and personal hygiene [2, 3]. Research has highlighted the adverse effects of TCS exposure on humans, aquatic life, and microbial communities, attributed to its ability to accumulate within their cells [4–7]. Studies conducted by Dar et al. (2022) [4] have elucidated pathways leading to the formation of harmful by-products resulting from the interaction of triclosan with photodegradation, chlorination, and oxidation processes. These reactions involve the insertion of chlorine atoms into para and ortho positions, yielding compounds such as 2,8-dichlorodibenzo-p-dioxin (DCDD), 2,4,6-trichlorophenol (2,4,6 TCP), and polychlorodibenzo-p-dioxins (PCDD) [8].

Numerous studies have investigated various techniques for eliminating triclosan (TCS). However, some of these methods' present challenges, such as bioaccumulation or the formation of toxic by-products. Photodegradation and

* Corresponding author: chareeya@sut.ac.th

<http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-05-019>



© 2024 by the authors. Licensee CEJ, Tehran, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

oxidation can generate harmful by-products [4-6, 8]. Adsorption has emerged as a promising alternative for TCS removal, offering the advantage of producing non-toxic by-products [9, 10]. Activated carbon is a widely favored adsorbent due to its exceptional capacity, but it generates higher production costs. To address this challenge, researchers have developed various natural adsorbents, including Macadamia nut shell activated carbon (MAC) as a cost-effective adsorbent derived from agricultural waste, which demonstrates high surface area and cost-effectiveness [11]. Previous studies have shown MAC to be effective for phenol adsorption [12, 13].

Adsorption techniques include both batch and continuous fixed-bed methods, with the latter being preferred in industrial applications because of its operational simplicity and scalability [14, 15]. Column adsorption, such as fixed-bed columns, is used for industrial wastewater treatment because it is simple to operate with continuous flow and fast adsorption and can be achieved with a high loading of pollutants due to a given large amount of fresh adsorbent in the column [16]. However, fixed-bed columns have limitations such as potential obstructions and decreased efficiency over time, requiring sorbent material replacement. A clogging problem on the column decreases column life extension, and high dosages of adsorbent waste limit the use of this system, resulting in lower adsorption capacity compared to batch adsorption and leading to underutilization and waste [16, 17].

This study introduced a groundbreaking alternative: the pulsed-bed column adsorption system with enhanced adsorption capacity. The pulsed-bed system selectively releases the less efficient column bed height as it becomes partially depleted and introduces regenerated fresh adsorbent, allowing more comprehensive utilization of adsorbent and reducing consumption. This innovative approach extends the operational lifespan of adsorbents in column adsorption processes [17, 18].

The objectives of this investigation were to assess the practicality of using MAC as a cost-effective adsorbent derived from agricultural waste for triclosan removal through batch and column adsorption studies, with a focus on an alternative pulsed-bed column adsorption system. Batch experiments explored various parameters to determine the optimal conditions for fixed-bed columns, including initial TCS concentration, contact time, initial pH, and agitation speed, along with adsorption isotherms, thermodynamics, and kinetics studies. Column experiments involved breakthrough curves and associated parameters under different initial TCS concentrations, flow rates, and bed heights. Fixed-bed column studies provide crucial insights for adapting parameters to pulsed-bed column applications for TCS removal from wastewater in the personal care product industry, leading to an extension of column life, increased adsorption capacity, and minimized use of adsorbent as a practical and environmentally friendly method for TCS removal.

2. Material and Methods

A study framework was designed to investigate the use of MAC as an adsorbent for TCS removal through batch and column adsorption experiments, as illustrated in Figure 1. The analysis included evaluating adsorbent characteristics, examining adsorption data, predicting column behavior, and conducting XTM analysis for data interpretation.

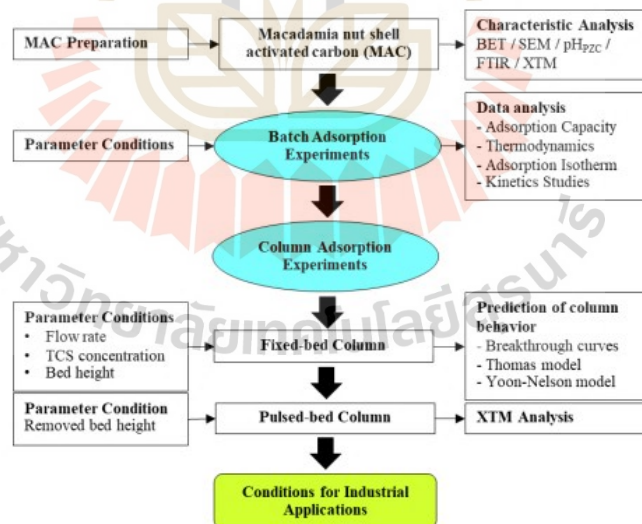


Figure 1. Schematic Flowchart of the Study Framework

2.1. Preparation of Macadamia Nut Shell Activated Carbon (MAC) as an Adsorbent Material

The macadamia nut shell charcoal utilized in this study was sourced from Khaokho district in Phetchabun Province, Thailand. The process of preparing MAC followed the methodology in our previous research. Carbonization was conducted at 950°C using CO₂ gas at a flow rate of 200 mL/min with an activation time of 240 minutes. The MAC samples were characterized using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) method, employing a Belsorp Mini II instrument from Japan. The functional groups of MAC before and after adsorption were identified through synchrotron IR analysis at BL4.1 Infrared Spectroscopy and Imaging, conducted at the Synchrotron Light Research Institute (SLRI). Infrared spectra were acquired using an infrared microscope (Hyperion 2000, VERTEX 70, Bruker. Optics, Ettlingen, Germany) with a 36x IR objective, covering a wave number range of 4000 to 800 cm⁻¹. Spectral analysis was performed using OPUS 7.2 software (Bruker Optics Ltd., Ettlingen, Germany).

2.2. Material Preparation of TCS as an Adsorbate and Analytical Methods

TCS powder with a purity exceeding 97% was acquired from Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, USA). A stock solution at a concentration of 200 mg/L was prepared by dissolving the powder in 0.1 M NaOH in deionized water. This solution was carefully stored in the dark at 4°C to shield it from sunlight. The concentration of TCS was quantified using the diazotization method [19, 20]. The concentration of TCS was measured at 445 nm by a UV/Visible spectrophotometer (JENWAY 7315, UK).

2.3. Batch Adsorption Experiments

The batch adsorption experiments utilized 250 mL conical flasks, each containing 200 mL of TCS solution. The flasks were placed within a thermostat shaker. Detailed experimental conditions are provided in Table 1. The primary goal was to investigate how initial TCS concentration, contact time, initial pH, and agitation speed influenced TCS adsorption.

Table 1. Overview of parameters used in batch adsorption experiments

| Experiments | Parameters | | | | |
|---------------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------|------------------|------------|
| | Contact time (min) | Initial concentration (mg/L) | Agitation speed (rpm) | Temperature (°C) | Initial pH |
| Effect of contact time | 60-1,080 | 20 | 150 | 30 | 10.5±0.2 |
| Effect of initial concentration | 780 | 2-20 | 150 | 30 | 10.5±0.2 |
| Effect of agitation speed | 780 | 20 | 50-200 | 30 | 10.5±0.2 |
| Effect of temperature | 780 | 20 | 150 | 25-45 | 10.5±0.2 |
| Effect of initial pH | 780 | 20 | 150 | 30 | 2-12 |

C_0 as the initial concentration (mg/L) and C_e as the remaining concentration (mg/L) of TCS were measured to calculate the amount of TCS adsorbed onto MAC. The equilibrium adsorption capacity was denoted as q_e (mg/g), using Equation 1, where V signifies the volume of the TCS solution (mL), and m denotes the weight of MAC (g).

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

During these batch experiments, the key thermodynamic parameters including ΔG° as Gibbs free energy (kJ/mol), ΔS° as entropy change (kJ/mol-K), and ΔH° as enthalpy change (kJ/mol) were determined temperatures ranging from 298 to 318 K (Equations 2 and 3). In these equations, K represents the equilibrium constant of the isotherm fits, R is the gas constant (8.314 J/mol/K), and T is the absolute temperature (K). The values of ΔH° were derived from the slope of $\Delta H^\circ/R$, while ΔS° was determined from the intercept of $\Delta H^\circ/R$ in the linear plot of $\ln K$ versus $1/T$.

$$(\Delta G^\circ) = -RT \ln K \quad (2)$$

$$\ln K = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (3)$$

2.4. Adsorption Isotherm and Kinetics

Various TCS concentrations ranging from 5 to 60 mg/L were tested using 200 mL of TCS solution and MAC weight of 0.1 g. The initial pH of the solution was maintained at 2 and 10.5±0.2, and experiments were carried out at ambient temperature (approximately 30°C) and 45°C. The adsorption capacity was determined using the linear forms of the Langmuir and Freundlich isotherms. The Langmuir isotherm is expressed by the linearized Equation 4:

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

In this context, q_m corresponds to the maximum TCS sorbed (mg/g), and K_L stands for the Langmuir constant (L/mg). In the Freundlich isotherm, captured by the linearized Equation 5, K_F is the Freundlich constant (mg/g)(L/mg)^{1/n}, and n signifies the Freundlich exponent.

$$\log q_c = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_c \quad (5)$$

Kinetics were explored by applying pseudo-first-order and pseudo-second-order models, expressed in their linearized forms in Equations 6 and 7, respectively.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (6)$$

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{k_2 q_e} \right)^2 + \frac{t}{q_e} \quad (7)$$

In these equations, q_t denotes the quantities of TCS (mg/g) at any given time, t (minutes). The parameter k_1 represents the pseudo-first-order rate constant (min⁻¹), which can be derived from the plot of $\ln(q_e - q_t)$ against t . Similarly, k_2 is the pseudo-second-order rate constant (g/mg-min), determined from the plot of t against t/q_t .

2.5. Fixed-bed Column Adsorption Experiments

Fixed-bed column adsorption experiments were conducted using an acrylic tube with a 2 cm internal diameter and a height of 10 cm, as illustrated in Figure 2. These experiments employed a continuous up-flow operation using a peristaltic pump and the initial pH of the TCS solution was controlled at 10.5±0.2 by adjusting with either 0.1M NaOH or 0.1M HCl. The entire experiment took place under ambient temperature conditions.

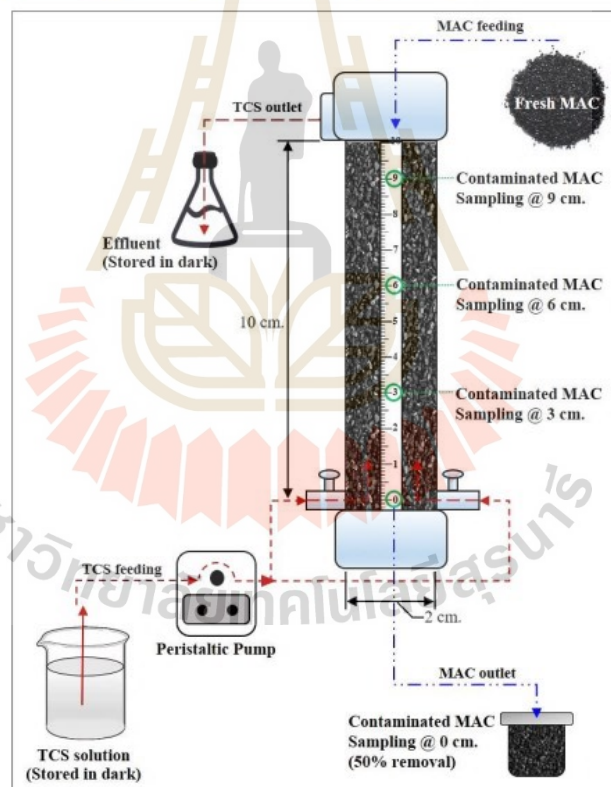


Figure 2. Schematic flowchart of column adsorption experiments

The fixed-bed column experiment encompassed diverse conditions including varying flow rates (6, 8, and 10 mL/min), initial TCS concentrations (20, 40, and 60 mg/L), and different fixed-bed heights (6, 8, and 10 cm). The objective of this study was to investigate the continuous adsorption process at two crucial points: achieving 95% removal ($C_t/C_0 = 0.05$) and 5% removal ($C_t/C_0 = 0.95$) on the breakthrough curve. Supernatant analysis was conducted to determine the residual concentration of TCS. Breakthrough curves were plotted, illustrating C_t/C_0 against time. Various parameters such as t_b , breakthrough time (minutes), t_s , saturation time (minutes), V_{eff} , effluent volume (L), q_b , adsorption at breakthrough (mg/g), and q_s , adsorption at saturation (mg/g) were computed.

The analysis of breakthrough curves involved the application of the Thomas and Yoon-Nelson models. These models provide valuable insights into the relationship between the rate of adsorption and the breakthrough on the adsorbent. This mathematical relationship is described by the linearized Equations 8 and 9 for the Thomas and Yoon-Nelson models, respectively.

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0} - 1\right) = \frac{K_{TH}q_{TH}m}{Q} - K_{TH}C_0t \quad (8)$$

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0} - C_t\right) = K_{YN}t - \tau K_{YN} \quad (9)$$

In these equations, C_t represents the amounts of TCS (mg/L) at any time, m is the MAC weight used in the column (g), Q is the feed flow rate (mL/min), and K_{TH} and q_{TH} represent the Thomas rate constant (mL/mg-min) and the equilibrium TCS uptake (mg/g). Following Equation 8, the Thomas constant values of K_{TH} and q_{TH} can be obtained from the slope and intercept of the linear plot of $\ln(C_t/C_0 - 1)$ versus t at different flow rates, initial concentrations, and bed heights. On the other hand, following Equation 9, K_{YN} represents the Yoon-Nelson rate constant (min^{-1}), t is the time required for contaminant breakthrough (minutes), and τ is the time required for 50% adsorbate breakthrough (minutes). The values of K_{YN} and τ can be obtained from the linear plot of $\ln(C_t/C_0 - C_t)$ versus t . The data resulted in a slope of K_{YN} and an intercept of τK_{YN} .

2.6. Pulsed-Bed Column Adsorption Experiments

A flowchart illustrating the pulsed-bed column adsorption experiments is presented in Figure 2. The experiment was conducted based on the conditions determined from the fixed-bed column study. Various removed pulsed-bed heights ranging from 2, 4, and 6 cm were assessed for adsorption capacity and operational lifespan of the column. The column bed was replaced upon reaching 50% removal ($C_t/C_0 = 0.50$), and fresh MAC was introduced at the top corresponding to the amount of MAC removed. The experiment consisted of a total of 4 cycles, and parameters of the breakthrough curve were subsequently calculated.

2.7. Clogging Pattern Analysis

Fresh and contaminated MAC samples were collected after the completion of the fourth feeding cycle in the pulsed-bed experiment, at depths of 0, 3, 6, and 9 cm from the bottom of the column. These collected samples underwent analysis to determine total porosity, open porosity, and closed porosity using X-ray Tomographic Microscopy (XTM) with a synchrotron X-ray source known as BL1.2W, which integrates X-ray imaging and XTM capabilities. The collected X-ray radiographs were analyzed using Octopus Reconstruction software (TESCAN, Gent, Belgium), resulting in the generation of reconstruction images. The analysis covered a volume with a total size of 0.219 mm³. These reconstruction images were processed using Drishti software to create a three-dimensional tomographic reconstruction. The accuracy of the findings was confirmed through collaboration with the Synchrotron Light Research Institute in Thailand.

3. Results and Discussions

3.1. Characterization of the MAC

Analysis of freshly acquired MAC samples, as revealed by BET analysis, indicated a BET surface area of 985.40 m²/g, a total pore volume of 0.4269 cm³/g, a pore diameter of 2.15 nm, and an impressive 93% of the volume comprised of micropores.

3.2. Batch Adsorption Experiments

3.2.1. Effect of Contact Time, Initial Concentration, Agitation Speed and Temperature

As depicted in Figures 3-a and 3-b, a significant rise in adsorption capacity was evident with an increase in both TCS concentration and contact time. This swift adsorption was attributed to the abundance of active sites on the MAC surface. Higher concentrations contributed to an intensified driving force, thereby facilitating the rapid diffusion of TCS molecules into the pores [13, 21]. The adsorption capacity continued to increase until reaching saturation at 780 minutes, demonstrating a final adsorption capacity of 27.80 mg/g.

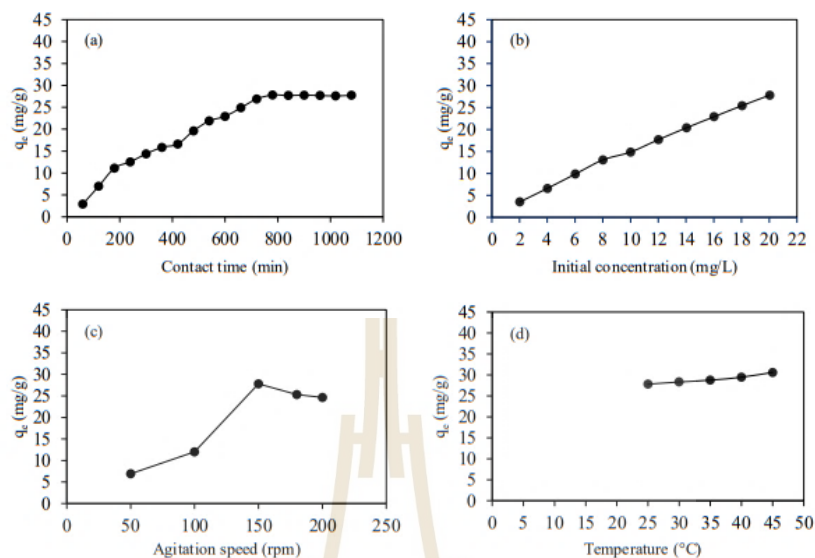


Figure 3. Effect of (a) contact time, (b) initial concentration, (c) agitation speed, and (d) temperature on TCS adsorption

The adsorption capacity showed a consistent increase as the agitation speed escalated, eventually reaching equilibrium at 150 rpm (Figure 3-c). However, beyond this point, the adsorption capacity declined with a further increase in agitation speed to 200 rpm. This decline was primarily attributed to a reduction in the boundary layer thickness surrounding the adsorbent, as discussed by Karthika and Vasuki (2021) [22]. An elevation in temperature correlated with improved adsorption (Figure 3-d), suggesting an endothermic adsorption process. Higher temperatures enhanced the mobility of TCS, facilitating diffusion through the external boundary film and into the inner pores of MAC. Higher temperatures also resulted in a decrease in solution viscosity [23]. However, industrial application of the 45°C temperature range may involve heightened costs.

Therefore, the parameters selected for subsequent batch adsorption experiments included an initial TCS concentration of 20 mg/L, a contact time of 780 minutes, and an agitation speed of 150 rpm. These experiments were conducted at both ambient temperature and 45°C.

3.2.2. Effect of Initial pH

Results revealed that the adsorption capacity reached a peak under acidic conditions (pH 2–6) at both temperatures, ranging from 35.24 to 40.00 mg/g (Figure 4). Heightened adsorption in acidic environments was ascribed to hydrophobic interactions between the MAC surface and phenolic-TCS, along with pore filling, hydrogen bonding, and π - π bonding. TCS demonstrated the capacity to self-couple with the oligomer [24].

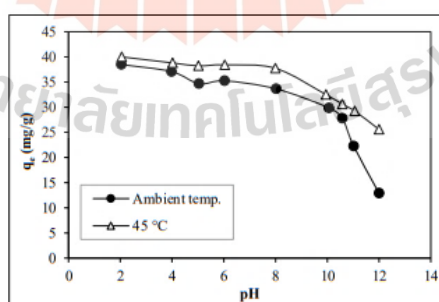


Figure 4. Impact of initial solution pH at ambient temperature and 45°C on TCS adsorption onto MAC

FTIR results of MAC after adsorption at pH 2-6 (Figure 5) displayed peaks in the hydroxyl and aliphatic hydrocarbon stretching vibration ranges of 3600-3100 and 3000-2850 cm^{-1} , respectively, likely associated with hydrogen bonding. Peaks of C=C observed in the range 1600-1450 cm^{-1} indicated the reaction between the TCS ring and the MAC surface (π - π reaction), leading to enhanced stability [25, 26]. These peaks were verified in MAC spectra after the adsorptive process, indicating the presence of TCS.

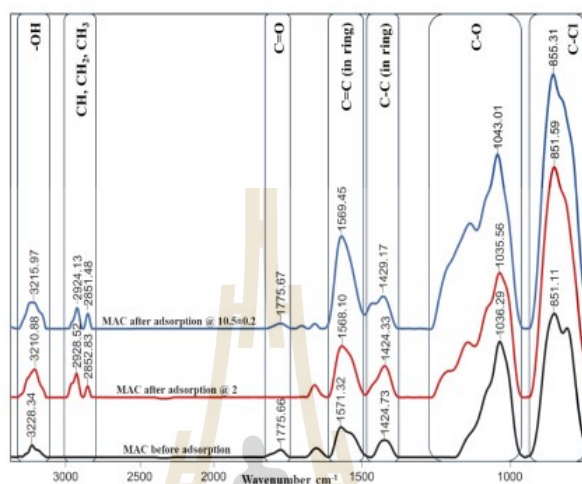


Figure 5. FTIR spectrum analysis of MAC before and after TCS adsorption at initial pH solutions of 2 and 10.5±0.2

A significant decrease in adsorption capacity was noticeable under alkaline conditions (pH 8–12), ranging from 37.75 to 12.91 mg/g. This reduction was attributed to the modulation of surface charges on the adsorbent, resulting in subsequent alterations in the adsorbate state [27]. The study identified the pH at which the MAC reached its point of zero charge (pH_{PZC}) as 7.9, indicating a negatively charged surface beyond this point [28, 29]. Under alkaline conditions, TCS undergoes deprotonation, transforming into the anionic form, phenolate-TCS [26, 30, 31].

Thus, in alkaline environments, the MAC surface acquires a negative charge, while TCS exists in a deprotonated anionic state. This results in enhanced electrostatic repulsion between the triclosan anions and the negatively charged MAC surface, as indicated by the adsorbents' point of zero charge. This phenomenon elucidates the decreased adsorption capacity observed at these pH values. In such conditions, electrostatic repulsion becomes the primary interaction, resulting in a decline in adsorption capacity with increasing pH. This finding was supported by Vidovix et al. (2022) [26].

To optimize cost efficiency and minimize energy consumption, it is crucial to avoid extensive pH adjustments, especially considering that the pH of wastewater in the personal care products industry is in the range of 9–11. Therefore, for practical application in fixed-bed column experiments within a factory setting, the chosen conditions involve an initial solution pH of 10.5±0.2, ambient temperature, TCS initial concentration of 20 mg/L, contact time of 780 minutes, and agitation speed of 150 rpm. These optimal conditions were selected to achieve a high TCS adsorption capacity in subsequent column adsorption experiments, as well as for potential industrial applications and to align with the characteristics of the wastewater.

3.3. Adsorption Isotherms

The experimental adsorption data were analyzed using the Langmuir and Freundlich isotherms, with the corresponding parameters presented in Table 2. Both isotherms exhibited strong correlation coefficients, with values ranging from 0.9245 to 0.9948 for Langmuir and 0.9582 to 0.9864 for Freundlich, indicating a good fit in both cases. Based on the Langmuir isotherm analysis, the maximum adsorption capacity was determined to be within the range of 90.09 to 119.05 mg/g. To validate the adsorption of TCS on the MAC surface, SEM micrograph images of MAC samples were examined before and after adsorption, as depicted in Figure 6. The micrograph illustrates that the surface pores of MAC after adsorption (Figure 6-b) were covered with pollutant molecules, contrasting with the clear pores observed on MAC before adsorption (Figure 6-a).

BET analysis revealed that MAC before adsorption had an impressive 93% of the volume comprised of micropores. Kaur et al. (2018) [32] reported TCS molecular dimensions of $1.42 \times 0.69 \times 0.75$ nm. This discovery supported the feasibility of TCS accessing the MAC micropores. Based on the 3D visualization of MAC from the XTM analysis presented in Figure 7-b, the post-adsorption MAC displayed enhanced connectivity in the green area, representing air as the dispersive phase, and appeared narrower compared to the MAC before adsorption (Figure 7-a). This narrowing was attributed to the increased presence of TCS molecules diffused onto the MAC, thereby expanding the brown area, depicted as the matrix phase. As depicted in Figure 8, the integral areas of the FTIR spectrum indicated that the MAC after adsorption at pH 2 exhibited higher amounts of -OH, C-O, and C-Cl compared to both the MAC before adsorption and at pH 10.5 ± 0.2 conditions. This provided strong evidence of a significant adsorption process. Therefore, both chemical and physical interactions, including H-bonding, π - π reactions, electrostatic forces, and surface diffusion, were deemed crucial in facilitating the adsorption process. These collective results supported the conclusion that TCS adsorbed on the MAC surface, as supported by previous studies [26, 33].

Table 2. Langmuir and Freundlich parameters for TCS adsorption on MAC

| pH | Temp. (°C) | $q_{e,exp}$ (mg/g) | Langmuir isotherm | | | Freundlich isotherm | | |
|----------------|------------|--------------------|-------------------|--------------|--------|---------------------|-----------------------------------|--------|
| | | | q_m (mg/g) | K_L (L/mg) | R^2 | n | K_F (mg/g)(L/mg) ^{1/n} | R^2 |
| 2 | 30 | 98.79 | 102.04 | 0.29 | 0.9551 | 1.61 | 22.67 | 0.9713 |
| 2 | 45 | 109.30 | 119.05 | 1.00 | 0.9245 | 2.80 | 58.64 | 0.9582 |
| 10.5 ± 0.2 | 30 | 75.36 | 90.09 | 0.07 | 0.9948 | 1.45 | 7.38 | 0.9864 |
| 10.5 ± 0.2 | 45 | 91.65 | 98.04 | 0.13 | 0.9846 | 1.59 | 13.15 | 0.9848 |

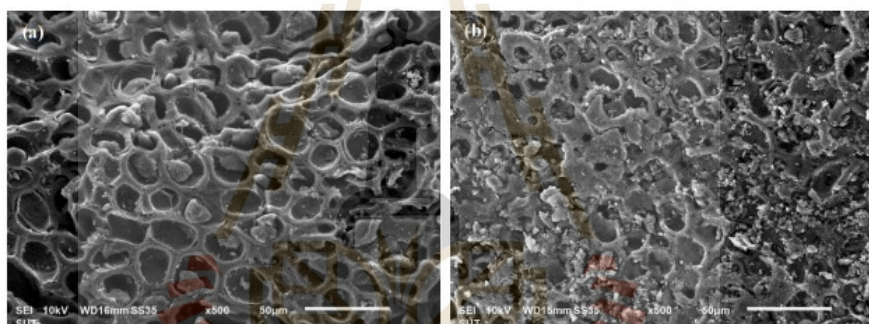


Figure 6. SEM analysis at 500x magnification (a) MAC before adsorption, and (b) MAC after adsorption

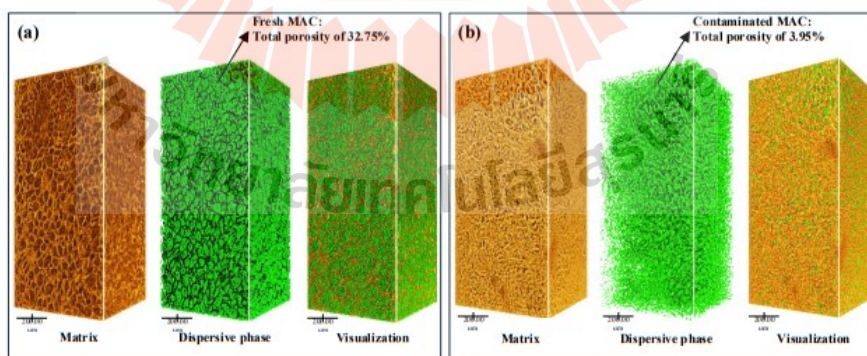


Figure 7. 3D visualization of MAC from XTM analysis (a) MAC before adsorption, and (b) MAC after adsorption

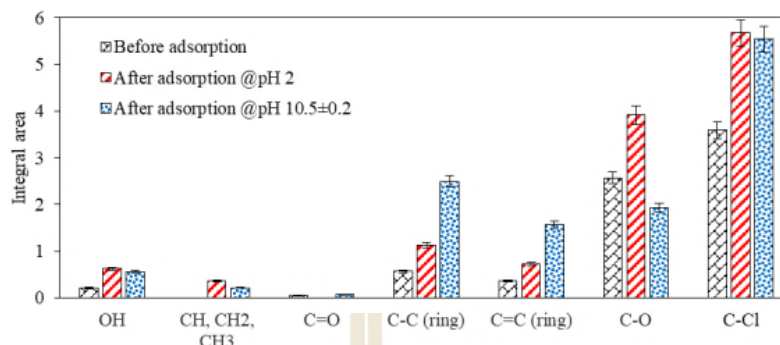


Figure 8. Integral area comparison of MAC before and after adsorption. Varied superscripts on bars denote statistical differences between extraction methods ($p < 0.05$)

3.4. Adsorption Kinetics and Thermodynamics

Thermodynamic parameters including the ΔH° and ΔS° values were calculated and presented in Table 3. Positive values of ΔH° (9.68 kJ/mol) within the physisorption range of 0-20 kJ/mol suggested the presence of van der Waals forces between TCS and MAC, while positive values of ΔS° (0.04 kJ/mol/K) confirmed an increase in the randomness of TCS molecules on the MAC surface. Negative values of ΔG° for all five temperatures indicated that the adsorption reaction occurred spontaneously [27], confirming the TCS adsorption on MAC as an endothermic process.

Table 3. Thermodynamic parameters for adsorption of TCS onto MAC at different temperatures

| Temperature (K) | ln (K) | ΔH° (kJ/mol) | ΔS° (kJ/mol-K) | ΔG° (kJ/mol) |
|-----------------|--------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 298 | 1.19 | 9.68 | 0.04 | -2.90 |
| 303 | 1.23 | 9.68 | 0.04 | -3.11 |
| 308 | 1.27 | 9.68 | 0.04 | -3.33 |
| 313 | 1.34 | 9.68 | 0.04 | -3.54 |
| 318 | 1.45 | 9.68 | 0.04 | -3.75 |

The resulting kinetic parameters are summarized in Table 4. Notably, the pseudo-second-order model exhibited a superior correlation ($R^2=0.9569$) compared to the pseudo-first-order model, suggesting that the adsorption of TCS onto MAC was primarily driven by electrostatic or van der Waals forces, and consistent with findings from the thermodynamics study.

Table 4. Kinetic parameters of TCS adsorption on MAC

| q_{exp} (mg/g) | Pseudo-first-order | | | Pseudo-second-order | | |
|---------------------|--------------------|----------------------------|--------|---------------------|------------------|--------|
| | q_e (mg/g) | k_1 (min ⁻¹) | R^2 | q_e (mg/g) | k_2 (g/mg-min) | R^2 |
| 47.48 | 137.62 | 0.0075 | 0.9122 | 61.73 | 0.0001 | 0.9569 |

3.5. Fixed-bed Column Adsorption Experiments

3.5.1. Influence of Operating Conditions on Fixed-bed Column Adsorption

The fixed-bed column experiments encompassed variations in flow rate, initial concentration, and bed height, as outlined in Table 5. An increase in flow rate (6, 8, and 10 mL/min) and initial TCS concentration (20, 40, and 60 mg/L) resulted in a decrease in breakthrough time from 180 to 60 minutes. This occurred because a higher initial TCS concentration increased the concentration gradient of TCS between the adsorbent and bulk solution, leading to a stronger driving force. This decreased the mass transfer resistance between TCS and MAC, resulting in a shorter required saturation time [26]. The relationship between C_t/C_0 and time is depicted in Figures 9-a and 9-b, revealing an elevated adsorption capacity with an augmented flow rate and high initial TCS concentration. A flow rate of 10 mL/min and an initial TCS concentration of 60 mg/L demonstrated a maximum adsorption capacity of 34.94 mg/g at saturation time, with the breakthrough curve displaying a steeper initial segment and a slower adsorption rate towards the end due to

MAC saturation. This efficiency was attributed to the ability of the column to facilitate rapid mass transfer flux of the TCS bulk solution to the MAC surface, resulting in higher adsorption capacity due to an increased driving force and diffusion coefficient [13].

Results in Table 5 show a significant increase in bed height from 6 cm to 10 cm, resulting in an increase in breakthrough time (t_b) from 40 to 60 minutes, accompanied by an increase in saturation time (t_s) from 1,020 to 1,950 minutes and an increase in adsorption capacity from 21.29 to 34.94 mg/g, respectively. As shown in Figure 9-c, the breakthrough curves shifted from left to right, and the slope of the breakthrough curve became gentler, indicating that breakthrough time and saturation time increased. This was attributed to the increase in bed depth corresponding to a greater amount of adsorbent and providing more adsorption binding sites for TCS removal, thereby resulting in longer breakthrough and saturation times [26]. The non-sharp breakthrough curve, indicative of increased adsorption capacity, suggests prolonged residence times for TCS diffusion on the MAC surface.

Table 5. Parameters of the breakthrough curve in the fixed-bed column for TCS adsorption on MAC

| Fixed-bed column condition | | | Parameters of breakthrough curve | | | | |
|----------------------------|--------------|--------|----------------------------------|-------------|---------------|--------------|--------------|
| Q (ml/min) | C_0 (mg/L) | H (cm) | t_b (min) | t_s (min) | V_{eff} (L) | q_b (mg/g) | q_s (mg/g) |
| 6 | 20 | 10 | 180 | 4,590 | 27.54 | 1.51 | 21.60 |
| 8 | 20 | 10 | 150 | 3,990 | 31.92 | 1.66 | 23.36 |
| 10 | 20 | 10 | 120 | 3,510 | 35.10 | 1.65 | 23.60 |
| 10 | 40 | 10 | 90 | 2,910 | 29.10 | 2.50 | 33.34 |
| 10 | 60 | 10 | 60 | 1,950 | 19.50 | 2.43 | 34.94 |
| 10 | 60 | 8 | 50 | 1,560 | 15.60 | 2.10 | 27.60 |
| 10 | 60 | 6 | 40 | 1,020 | 10.20 | 1.67 | 21.29 |

Consequently, a fixed-bed with a flow rate of 10 mL/min, an initial TCS concentration of 60 mg/L, and a bed height of 10 cm was selected for further experiments in pulsed-bed column adsorption, showcasing the highest adsorption capacity of 34.94 mg/g.

3.5.2. Analysis of Breakthrough Curves Using the Thomas and Yoon-Nelson Models

As illustrated in Figures 9-a to 9-c, the predicted parameters of the Thomas and Yoon-Nelson models were examined to align with the breakthrough curve under the various operational conditions shown in Table 6. The analysis revealed that the Thomas model coefficients exhibited high values ($R^2 = 0.9545-0.9827$) and proved adept at replicating the initial behavior of the breakthrough curve, demonstrating superior agreement with a higher R^2 compared to the Yoon-Nelson model. The Thomas model operates on the assumption that column adsorption adheres to the Langmuir isotherm and pseudo-second-order kinetics of batch adsorption, with no axial dispersion [34].

As the bed height increased, the k_{TH} value decreased from 0.092 to 0.043 mL/mg/min, while the q_{TH} increased from 36.15 to 40.35 mg/g for the Thomas model. Conversely, this led to a decrease in k_{YN} from 0.0056 to 0.0025 min^{-1} and an increase in τ from 501.39 to 948.68 minutes for the Yoon-Nelson model. These changes extended the column retention time and resulted in slower saturation of adsorption, attributed to the increase in bed depth, which induced higher axial dispersion and mass transport resistance [35, 36].

Table 6. Predicted model parameters for triclosan adsorption on MAC

| Fixed-bed condition | | | Thomas model | | | Yoon-Nelson model | | |
|---------------------|--------------|--------|----------------------|-----------------|--------|--------------------------------|--------------|--------|
| Q (ml/min) | C_0 (mg/L) | H (cm) | k_{TH} (mL/mg/min) | q_{TH} (mg/g) | R^2 | k_{YN} (min^{-1}) | τ (min) | R^2 |
| 6 | 20 | 10 | 0.065 | 21.70 | 0.9784 | 0.0013 | 2527.23 | 0.5806 |
| 8 | 20 | 10 | 0.069 | 22.95 | 0.9777 | 0.0014 | 1995.36 | 0.5978 |
| 10 | 20 | 10 | 0.076 | 23.32 | 0.9827 | 0.0015 | 1648.67 | 0.6538 |
| 10 | 40 | 10 | 0.052 | 36.51 | 0.9545 | 0.0020 | 1277.19 | 0.6036 |
| 10 | 60 | 10 | 0.043 | 40.35 | 0.9627 | 0.0025 | 948.68 | 0.5822 |
| 10 | 60 | 8 | 0.056 | 39.76 | 0.9602 | 0.0034 | 746.24 | 0.5822 |
| 10 | 60 | 6 | 0.092 | 36.15 | 0.9813 | 0.0056 | 501.39 | 0.6710 |

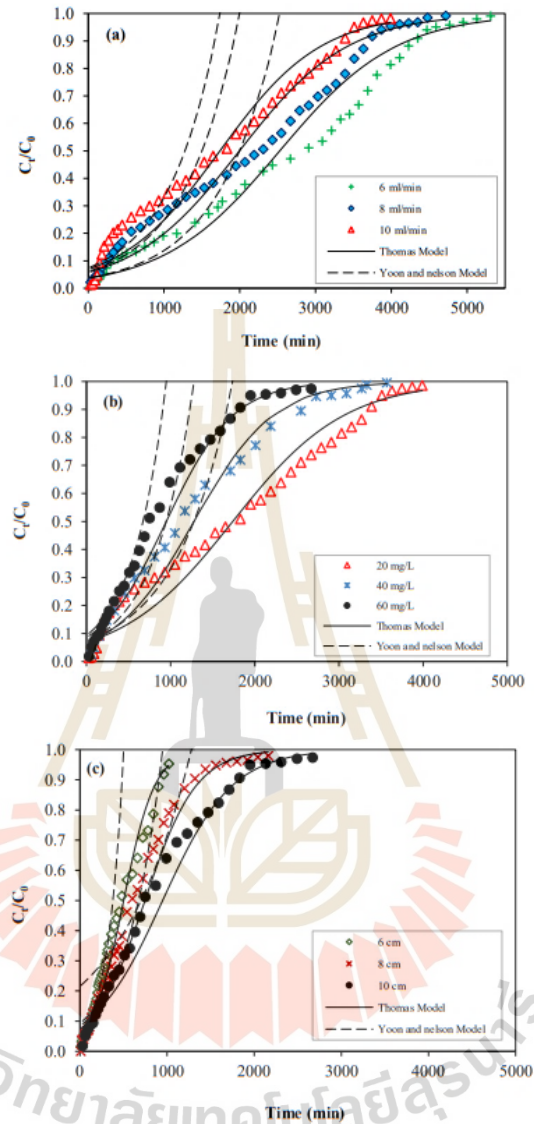


Figure 9. Breakthrough curves for TCS adsorption under varied (a) flow rates, (b) initial concentration, and (c) bed height

3.6. Pulsed-Bed Column Adsorption Experiments

3.6.1. Enhanced Adsorption Capacity and Extended Lifespan in Pulsed-Bed Columns

Breakthrough curve parameters in the pulsed-bed column experiments were calculated and summarized in Table 7. Findings indicated that an increase in the removed bed height at 2, 4, and 6 cm led to a rise in adsorption capacity ($q_{0.5}$) to 31.99, 50.76, and 62.60 mg/g, respectively. As shown in Figures 10-a to 10-c, an increase in the removed pulsed-bed height was reflected in the breakthrough curves extending from left to right on the time scale, respectively. The slope of

the breakthrough curve became gentler, indicating an increase in breakthrough time and saturation time [36]. Therefore, this significantly contributed to extending the lifespan of the column from 1,770 to 5,280 minutes, compared to the lifespan of the fixed-bed column at 870 minutes.

Table 7. Breakthrough curve parameters in the pulsed-bed column for TCS adsorption on MAC

| Pulsed-bed height (cm) | Cycle | t_b (min) | $t_{0.5}$ (min) | V_{eff} (L) | q_b (mg/g) | $q_{0.5}$ (mg/g) |
|------------------------|-------|-------------|-----------------|---------------|--------------|------------------|
| 0 | 1 | 60 | 870 | 8.7 | 2.43 | 25.63 |
| | 1 | 60 | 870 | 8.7 | 2.45 | 26.72 |
| | 2 | - | 1,110 | 11.1 | - | 27.83 |
| | 3 | - | 1,440 | 14.4 | - | 30.41 |
| 2 | 4 | - | 1,770 | 17.7 | - | 31.99 |
| | 1 | 60 | 870 | 8.7 | 2.47 | 25.87 |
| | 2 | 990 | 1,560 | 15.6 | 22.07 | 34.76 |
| | 3 | 1,770 | 2,430 | 24.3 | 31.64 | 42.97 |
| 4 | 4 | 2,670 | 3,450 | 34.5 | 39.76 | 50.76 |
| | 1 | 60 | 870 | 8.7 | 2.50 | 25.30 |
| | 2 | 1,200 | 2,160 | 21.6 | 24.50 | 42.80 |
| | 3 | 2,700 | 3,540 | 35.4 | 41.50 | 53.50 |
| 6 | 4 | 4,320 | 5,280 | 52.8 | 53.40 | 62.60 |

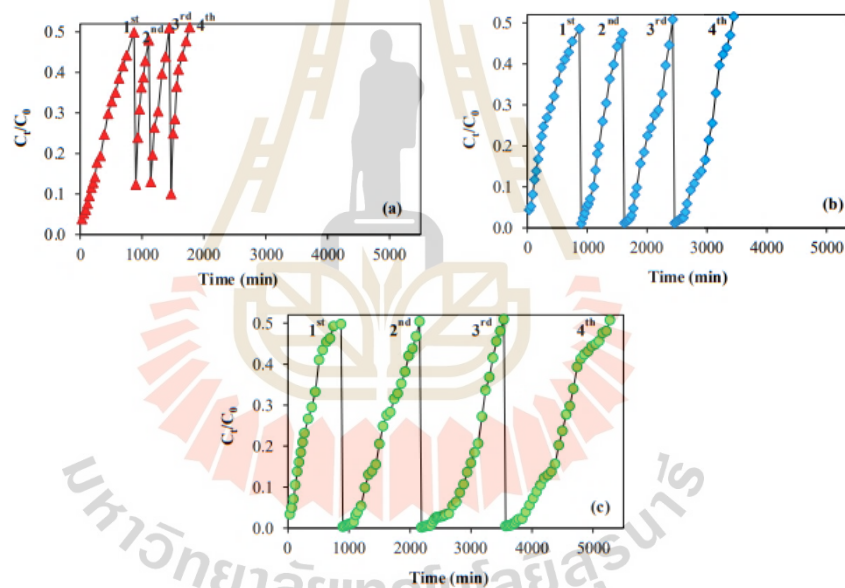


Figure 10. Breakthrough curves for TCS adsorption in a pulsed-bed column at various removed-bed heights (a) 2 cm, (b) 4 cm, and (c) 6 cm

3.6.2. Clogging Pattern Analysis of Pulsed-Bed Column

Figure 11 presents a 3D visualization derived from XTM analysis of contaminated MAC in the pulsed-bed column. Changes were made by removing the used MAC and replacing it with fresh MAC in every cycle. The total porosity by volume of fresh MAC and contaminated MAC in cycles 1, 2, 3, and 4 was measured, showing a decreasing trend as 32.75%, 22.57%, 15.05%, 11.30%, and 3.95%, respectively. These findings suggested that, at the upper bed height of each cycle, sufficient active sites for TCS adsorption were still maintained.

The XTM analysis evaluated the ratio of open and closed pores, where 'open pores' represent the adsorbable active sites on MAC, and 'closed pores' refer to pores that are not connected with others or are non-active sites, posing a potential problem for decreasing active sites and adsorption capacity because the adsorbate molecules cannot transfer within this area. The results indicated a potential issue for decreasing active sites and adsorption capacity.

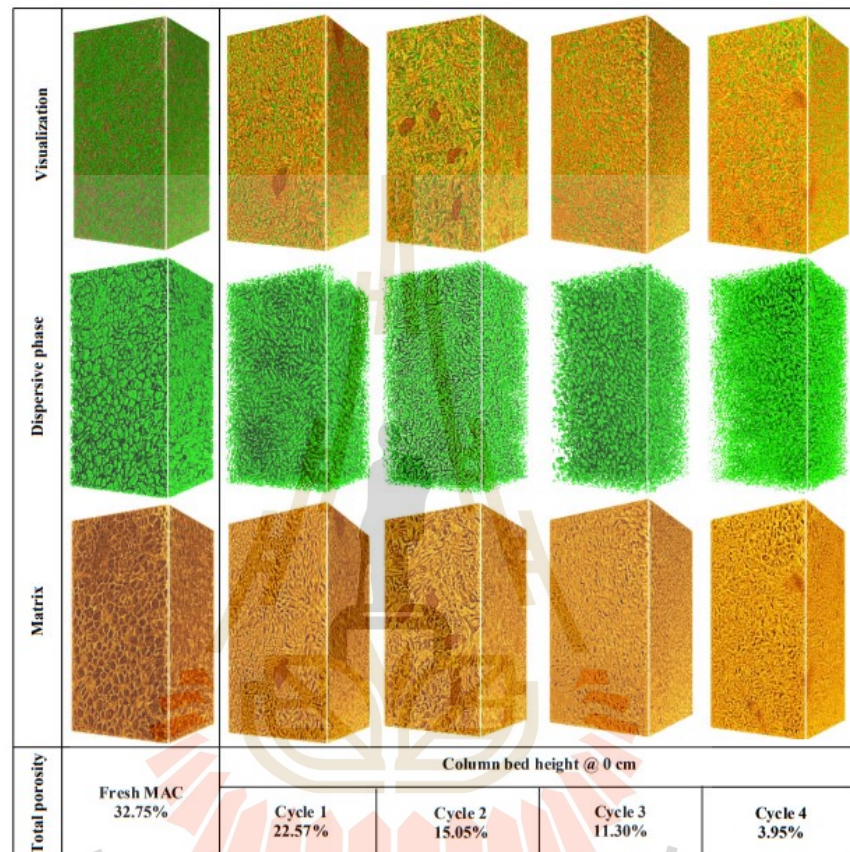


Figure 11. 3D visualization of fresh and contaminated MAC in each cycle using XTM analysis in the pulsed-bed column

Results revealed that fresh MAC had a total pore volume of 32.75%, consisting of a closed pore volume of 8.27% and an open pore volume of 24.48%. As depicted in Figure 12, after the 4th cycle of operation, the open pore volume of contaminated MAC exhibited an increasing trend of 13.92%, 10.62%, 2.52%, and 0.51%, with varied bed depths of 0, 3, 6, and 9 cm, respectively. The remaining total pore volume of the contaminated MAC increased proportionally with column bed height: 3.95%, 7.14%, 9.95%, and 11.29%, respectively. These findings indicated that the open pores of the pulsed-bed column were almost filled, while the closed pores remained, causing clogging.

The observed trend suggested that clogging initiates from the bottom and progresses upwards in the column. This phenomenon was attributed to up-flow feeding, causing the MAC at the bottom to saturate and accumulate more rapidly than in the upper part of the column. Results revealed that MAC columns at bed depths of 6 and 9 cm exhibited sufficient total pore volumes of 9.95% and 11.29%, respectively. These findings suggested that the MAC column at greater depths can retain more pollutants and resist clogging. The efficacy of the pulsed-bed column,

when removing only the 6 cm bottom portion of the column instead of the entire column, was highlighted. This approach extended the lifespan of the column from 1,950 minutes for the fixed-bed to 5,280 minutes for the pulsed-bed and increased the adsorption capacity from 33.34 mg/g for the pulsed-bed to 53.40 mg/g for the fixed-bed. These results suggested practical applications, especially in industrial-scale settings utilizing pulsed-bed columns. The findings can be instrumental in optimizing performance, minimizing adsorbent consumption, and maximizing longevity.

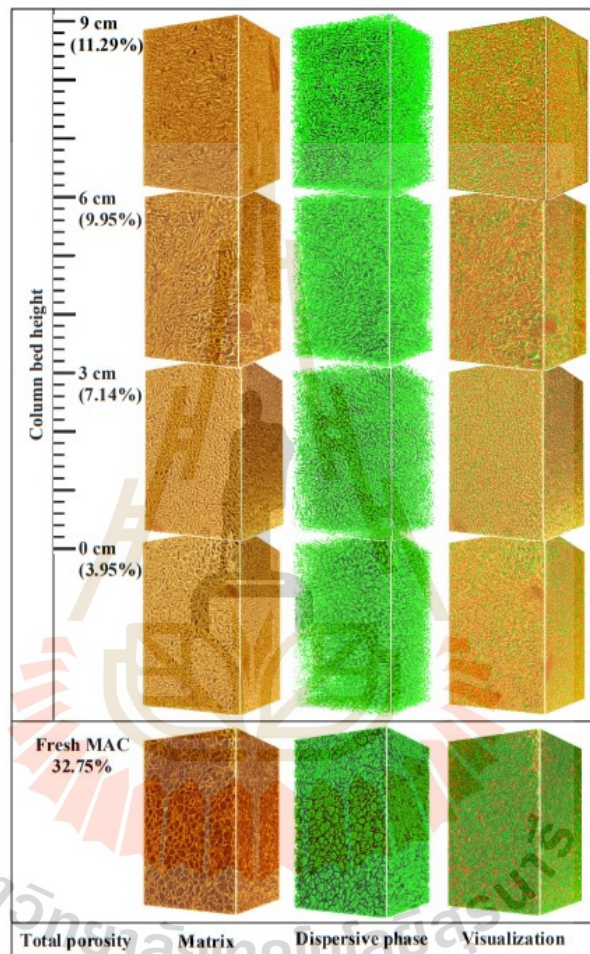


Figure 12. XTM analysis of fresh and contaminated MAC columns at bed depths of 0, 3, 6, and 9 cm

4. Conclusion

Macadamia nut shell activated carbon (MAC) demonstrated significant potential as a cost-effective adsorbent, highlighting the utilization of agricultural waste. MAC effectively adsorbed TCS with a high capacity of 119.05 mg/g under optimal conditions of contact time of 780 minutes, initial TCS concentration of 20 mg/L, agitation speed of 150 rpm, pH 2, and 45°C. The kinetics of adsorption followed a pseudo-second-order model, and the equilibrium data fitted well with both the Langmuir and Freundlich isotherm models.

In fixed-bed column operation under the specific conditions of flow rate 10 mL/min, initial TCS concentration 60 mg/L, and bed column height 10 cm, the highest adsorption capacity was 34.94 mg/g, with an exhaustion time of 1,950 minutes. The superior performance of the pulsed-bed column with a removed bed height of 6 cm led to a rise in adsorption capacity of 53.40 mg/g, coupled with an extended operational lifespan of 5,280 minutes. These findings rendered the pulsed-bed column suitable for TCS removal from wastewater in the personal care product industry. In terms of industrial applications, the pulsed-bed column was proven successful in extending the operational lifespan of the column, increasing the adsorption capacity, and minimizing adsorbent consumption.

5. Declarations

5.1. Author Contributions

Conceptualization, J.Y.; methodology, J.Y. and S.N.; software, S.N. and M.P.; validation, J.Y. and S.N.; formal analysis, M.P. and S.N.; investigation, J.Y. and M.P.; resources, J.Y.; data curation, J.Y. and M.P.; writing—original draft preparation, M.P.; writing—review and editing, J.Y.; visualization, M.P. and S.N.; supervision, J.Y.; project administration, J.Y.; funding acquisition, J.Y. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

5.2. Data Availability Statement

Data presented in this study are available on reasonable request from the corresponding author.

5.3. Funding

The authors received financial support from Suranaree University of Technology, Thailand, for the publication of this article.

5.4. Acknowledgements

This research was supported by Suranaree University of Technology. We would like to thank Dr. Phakphanan Pakawanit, XTM beamline (BL1.2W) and IR beamline (BL4.1) of Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Thailand for providing many facilities and useful assistance.

5.5. Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

6. References

- [1] Mhlongo, S. A., Sibali, L. L., & Ndibewu, P. P. (2023). Occurrence, quantification and removal of triclosan in wastewater of Umbogintwini Industrial Complex in KwaMakhutha, South Africa. *South African Journal of Science*, 119(11–12), 1–9. doi:10.17159/sajs.2023/14743.
- [2] Zhang, Q., Kroeze, C., Cui, S., Li, Y., Ma, L., Stokal, V., Vriend, P., Wang, M., van Wijnen, J., Xu, W., Zhang, F., & Stokal, M. (2024). COVID-19 estimated to have increased plastics, diclofenac, and triclosan pollution in more than half of urban rivers worldwide. *Cell Reports Sustainability*, 1(2023), 100001. doi:10.1016/j.crsus.2023.100001.
- [3] Milanović, M., Đurić, L., Milošević, N., & Milić, N. (2023). Comprehensive insight into triclosan—from widespread occurrence to health outcomes. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 25119–25140. doi:10.1007/s11356-021-17273-0.
- [4] Dar, O. I., Aslam, R., Pan, D., Sharma, S., Andotra, M., Kaur, A., Jia, A. Q., & Faggio, C. (2022). Source, bioaccumulation, degradability and toxicity of triclosan in aquatic environments: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 25. doi:10.1016/j.eti.2021.102122.
- [5] Sinicropi, M. S., Iacopetta, D., Ceramella, J., Catalano, A., Mariconda, A., Pellegrino, M., Saturnino, C., Longo, P., & Aquaro, S. (2022). Triclosan: A Small Molecule with Controversial Roles. *Antibiotics*, 11(6), 735. doi:10.3390/antibiotics11060735.
- [6] Jabłońska-Trypuć, A. (2023). A review on triclosan in wastewater: Mechanism of action, resistance phenomenon, environmental risks, and sustainable removal techniques. *Water Environment Research*, 95(9). doi:10.1002/wer.10920.
- [7] Lee, J. S., Lee, J. S., & Kim, H. S. (2024). Toxic effects of triclosan in aquatic organisms: A review focusing on single and combined exposure of environmental conditions and pollutants. *Science of the Total Environment*, 920. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.170902.
- [8] Li, L. (2021). Toxicity evaluation and by-products identification of triclosan ozonation and chlorination. *Chemosphere*, 263. doi:10.1016/j.chemosphere.2020.128223.
- [9] Phuekphong, A. F., Imwiset, K. J., & Ogawa, M. (2020). Organically Modified Bentonite as an Efficient and Reusable Adsorbent for Triclosan Removal from Water. *Langmuir*, 36(31), 9025–9034. doi:10.1021/acs.langmuir.0c00407.

- [10] Medellín-Castillo, N. A., González-Fernández, L. A., Ocampo-Pérez, R., Leyva-Ramos, R., Luiz-Dotto, G., Ramírez, R. F., Navarro-Frómata, A. E., Aguilera-Flores, M. M., Carrasco-Marín, F., Hernández-Mendoza, H., & Aguirre-Contreras, S. (2022). Removal of triclosan from water by adsorption on activated carbons and photodegradation. *Research Square* (Preprint), 1-46. doi:10.21203/rs.3.rs-1440179/v1.
- [11] Duque-Brito, E., Lobato-Peralta, D. R., Okolie, J. A., Arias, D. M., Sebastian, P. J., & Okoye, P. U. (2024). Fast-kinetics adsorption of a binary solution containing cationic and ionic pollutants using high-surface area activated carbon derived from macadamia nutshell. *Energy, Ecology and Environment*, 9(1), 84–99. doi:10.1007/s40974-023-00304-6.
- [12] Wongcharee, S., Aravinthan, V., Erdei, L., & Sanongraj, W. (2018). Mesoporous activated carbon prepared from macadamia nut shell waste by carbon dioxide activation: Comparative characterisation and study of methylene blue removal from aqueous solution. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 13(2). doi:10.1002/apj.2179.
- [13] Machedi, S., Ejidike, I. P., Mtunzi, F. M., Pakade, V. E., & Klink, M. J. (2019). Chlorinated Phenols Sorption Performance by Macadamia Activated Carbon and Grafted Macadamia Activated Carbon: Characterization, Kinetics, and Thermodynamic studies. *Oriental Journal of Chemistry*, 35(5), 1469–1479. doi:10.13005/ojc/350501.
- [14] Al Mesfer, M. K., Danish, M., Khan, M. I., Ali, I. H., Hasan, M., & Jery, A. El. (2020). Continuous fixed bed co2 adsorption: Breakthrough, column efficiency, mass transfer zone. *Processes*, 8(10), 1233. doi:10.3390/pr8101233.
- [15] AL-Doury, M. M. L., & Alwan, M. H. (2021). Phenol Removal from Synthetic Wastewater by Adsorption Column. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1058(1), 012034. doi:10.1088/1757-899x/1058/1/012034.
- [16] Sazali, N., Hanun, Z., & Sazali, N. (2020). A review on batch and column adsorption of various adsorbent towards the removal of heavy metal. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 67(2), 66–88.
- [17] Patel, H. (2019). Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. *Applied Water Science*, 9(3), 45. doi:10.1007/s13201-019-0927-7.
- [18] Plangklang, C., & Sookkumnerd, T. (2023). Modelling and feedforward control of pulsed bed adsorption column for colorant removal in sugar syrup. *Engineering Journal*, 27(1), 29–38. doi:10.4186/ej.2023.27.1.29.
- [19] Wyllie, G. R. A. (2015). Spectroscopic determination of triclosan concentration in a series of antibacterial soaps: A first-year undergraduate laboratory experiment. *Journal of Chemical Education*, 92(1), 153–156. doi:10.1021/ed5004146.
- [20] Kaur, I., Gaba, S., Kaur, S., Kumar, R., & Chawla, J. (2018). Spectrophotometric determination of triclosan based on diazotization reaction: Response surface optimization using box-behnken design. *Water Science & Technology*, 77(9), 2204–2212. doi:10.2166/wst.2018.123.
- [21] Khader, E. H., Khudhur, R. H., Abbood, N. S., & Albayati, T. M. (2023). Decolourisation of Anionic Azo Dye in Industrial Wastewater Using Adsorption Process: Investigating Operating Parameters. *Environmental Processes*, 10(2), 34. doi:10.1007/s40710-023-00646-7.
- [22] Karthika, M., & Vasuki, M. (2021). Comparative Study of Adsorption of Different Dyes from Aqueous Media onto Physically Activated Carbon: Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Parameter. *International Journal of Applied Engineering*, 16(6), 441–446.
- [23] Ndagijimana, P., Liu, X., Li, Z., Yu, G., & Wang, Y. (2020). The synthesis strategy to enhance the performance and cyclic utilization of granulated activated carbon-based sorbent for bisphenol A and triclosan removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 15758–15771. doi:10.1007/s11356-020-08095-7.
- [24] Sun, K., Li, S., Waigi, M. G., & Huang, Q. (2018). Nano-MnO₂-mediated transformation of triclosan with humic molecules present: kinetics, products, and pathways. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14416–14425. doi:10.1007/s11356-018-1637-7.
- [25] Sultana, M., Rowpok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H., & Alam, S. M. N. (2022). A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner Engineering and Technology*, 6. doi:10.1016/j.clet.2021.100382.
- [26] Vidovix, T. B., Januário, E. F. D., Araújo, M. F., Bergamasco, R., & Vieira, A. M. S. (2022). Investigation of two new low-cost adsorbents functionalized with magnetic nanoparticles for the efficient removal of triclosan and a synthetic mixture. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(31), 46813–46829. doi:10.1007/s11356-022-19187-x.
- [27] Triwiswara, M., Lee, C. G., Moon, J. K., & Park, S. J. (2020). Adsorption of triclosan from aqueous solution onto char derived from palm kernel shell. *Desalination and Water Treatment*, 177, 71–79. doi:10.5004/dwt.2020.24872.
- [28] Rodrigues, L. A., De Sousa Ribeiro, L. A., Thim, G. P., Ferreira, R. R., Alvarez-Mendez, M. O., & Coutinho, A. D. R. (2013). Activated carbon derived from macadamia nut shells: An effective adsorbent for phenol removal. *Journal of Porous Materials*, 20(4), 619–627. doi:10.1007/s10934-012-9635-5.

- [29] Dan, S., & Chatree, A. (2021). Influence of modifiers on point of zero charge (pHPZC) of PMMA modified and PMMA-PEG modified MnFe₂O₄ nanoparticles. *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*, 17(2), 25-29.
- [30] Alvarez-García, S., MacEdo-Miranda, G., Martínez-Gallegos, S., Ordoñez-Regil, E., López-Castillo, J., & Aguirre-Miranda, E. (2020). Removal of triclosan by CTAB-modified zeolite-rich tuff from aqueous solutions. *MRS Advances*, 5, 3257–3264. doi:10.1557/adv.2020.394.
- [31] Li, Q., Huang, L., Zhu, P., Zhong, M., & Xu, S. (2023). Rapid adsorption of triclosan and p-chloro-m-xylene by nitrogen-doped magnetic porous carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1), 1640–1655. doi:10.1007/s11356-022-22084-y.
- [32] Kaur, H., Bansiwala, A., Hippargi, G., & Pophali, G. R. (2018). Effect of hydrophobicity of pharmaceuticals and personal care products for adsorption on activated carbon: Adsorption isotherms, kinetics and mechanism. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 20473–20485. doi:10.1007/s11356-017-0054-7.
- [33] Almeida-Naranjo, C. E., Cuestas, J., Guerrero, V. H., & Villamar-Ayala, C. A. (2024). Efficient Decontamination: Caffeine/Triclosan Removal using Rice Husk in Batch and Fixed-Bed Columns. *Water (Switzerland)*, 16(2), 197. doi:10.3390/w16020197.
- [34] Patel, H. (2020). Batch and continuous fixed bed adsorption of heavy metals removal using activated charcoal from neem (*Azadirachta Indica*) leaf powder. *Scientific Reports*, 10(1), 16895. doi:10.1038/s41598-020-72583-6.
- [35] Thrikkykal, H., Antu, R., & Harikumar, P. S. (2023). Remediation of Pb (II), Cd (II), and Zn (II) from aqueous solutions using porous (styrene-divinylbenzene)/Cu–Ni bimetallic nanocomposite microspheres: continuous fixed-bed column study. *Water Science and Technology*, 87(9), 2277–2291. doi:10.2166/wst.2023.101.
- [36] Li, Y., Gong, F., Yang, W., & Liu, B. (2023). Effective triclosan removal by using porous aromatic frameworks in continuous fixed-bed column studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(57), 121007–121013. doi:10.1007/s11356-023-30714-2.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวมนัญญา พะไลไผ่ เกิดเมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2541 ณ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสุรนารีวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2559 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2563 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในปีการศึกษาถัดมา สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษากิตติบัตินิตในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

เมื่อเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทได้ศึกษาและวิจัยในหัวข้อ “ การดูดซับแบบแบดซ์และคอลัมน์แบบพัลส์ในการกำจัดสารไตรโคลซานโดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากกะลาแมคคาเดเมีย ” และได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้ ทักษะการวิจัย และรู้จักการแก้ปัญหา นอกจากนี้มีโอกาสเข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ International Conference on Environmental Sciences (ICES-23) ณ เมืองนาโกย่า ประเทศญี่ปุ่น ในหัวข้อเรื่อง “ Removal of Triclosan in Aqueous Solution by Using Macadamia Nut Shell Activated Carbon ” เมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2563

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี